



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

MARCOS TANAKA RIYIS

**INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL COM TOMADA DE DECISÃO EM
CAMPO UTILIZANDO O PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE COMO
FERRAMENTA DE ALTA RESOLUÇÃO**

Bauru
2012



MARCOS TANAKA RIYIS

**INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL COM TOMADA DE DECISÃO EM
CAMPO UTILIZANDO O PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE COMO
FERRAMENTA DE ALTA RESOLUÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição

Bauru
2012

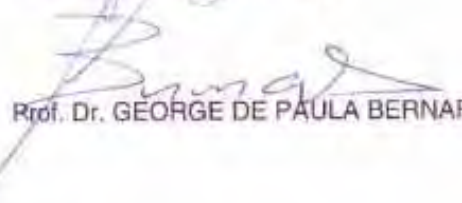


ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCOS TANAKA RIYIS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 17 dias do mês de dezembro do ano de 2012, às 10:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO TÉCNICA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. GIULIANO DE MIO do(a) Empresa e-Geo Ltda, Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCOS TANAKA RIYIS, intitulado "INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL COM TOMADA DE DECISÃO EM CAMPO UTILIZANDO O PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE COMO FERRAMENTA DE ALTA RESOLUÇÃO". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI


Prof. Dr. GIULIANO DE MIO


Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES

Riyis, Marcos Tanaka.

Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução / Marcos Tanaka Riyis, 2012

173 f.

Orientador: Heraldo Luis Giacheti

Coorientador: Fabiano Tomazini da Conceição

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1. Investigação geoambiental. 2. Áreas Contaminadas. 3. Piezocone de resistividade. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Vinícius, Lillian, Miriam, Manoel, Maurão, Yayá, Kimi e Junsuke

Meus exemplos, guias, mentores e razão para levantar todos os dias

AGRADECIMENTOS

A Vinícius e Lillian, pela paciência, compreensão e ajuda durante essa jornada;

A Miriam e Manoel, por 41 anos de orientação, dedicação e felicidade;

A Juliana e Maurão, por todo apoio, ajuda e carinho;

A Yayá, Elizete, Kimi, Junsuke, Nega, Tio Luiz, e Rui pelos exemplos que me deram;

Aos Tanakas e aos Gomes, por fazerem parte de mim;

Aos Sakuma e aos Koreyasu, por me aceitarem como um dos seus;

A Toshio e Guguinha, por me mostrarem uma nova forma de encarar a vida;

Ao meu orientador, Professor Doutor Heraldo Luiz Giacheti, pela paciência, ideias, conselhos e valiosíssimas sugestões, dentro e fora dessa dissertação;

Ao meu coorientador, Professor Doutor Fabiano Tomazini da Conceição, por toda a ajuda durante essa caminhada;

Ao professor Sandro Donini Mancini, por toda a força durante a graduação e pós;

À ECD Sondagens Ambientais, sem a qual nada disso seria possível, em particular a Mauro e Manoel, fontes inesgotáveis de sabedoria;

Ao amigo Rafael Muraro Derrite, pelo auxílio em todas as etapas do trabalho, pela excelente troca de ideias e valiosos conselhos;

A equipe da ECD que muito ajudou na coleta de dados e atividades relacionadas: Ingrid, Charles, Tiago, Eduardo, Gilberto, Fabiano

Ao pessoal da FEB/UNESP, pela inestimável ajuda: Gustavo, Sergio, Anna, Rubens, Marcia e Lucas

À Eliane, pelo help;

Resumo

O objetivo principal do presente trabalho é contribuir para a melhoria da qualidade das investigações geoambientais no Brasil, em particular nas investigações de áreas contaminadas. Entende-se que essa contribuição se dá ao apresentar e demonstrar o uso do Ensaio de Piezocone de Resistividade (RCPTu), uma ferramenta consolidada de investigação geotécnica e geoambiental no exterior, mas ainda com pouco uso no Brasil. Uma tomada de decisão adequada a respeito do gerenciamento de uma área contaminada ou potencialmente contaminada é função direta da qualidade do seu diagnóstico. O resultado final desse diagnóstico detalhado é denominado Modelo Conceitual (MC). A abordagem mais adequada para se estabelecer um MC sólido e com um grau reduzido e gerenciável de incertezas é a “Abordagem Tríade” que, entre outros conceitos, se baseia no uso de equipamentos de investigação de alta resolução para a identificação das heterogeneidades hidrogeológicas em escala de centímetros, conforme tem sido demonstrado por diversos pesquisadores. Um dos equipamentos disponíveis para se efetuar uma investigação desse tipo é o Ensaio de Piezocone, ou CPTu. Nesse ensaio pode-se ainda acoplar um sensor de resistividade. A esse conjunto dá-se o nome de ensaio de piezocone de resistividade, ou simplesmente RCPTu. Tem-se demonstrado que emprego desse sensor adicional pode fornecer um maior detalhamento do perfil estratigráfico, quando se correlacionam os resultados obtidos por ele aos demais sensores do piezocone, gerando uma alta densidade de dados de modo rápido. Nesse trabalho é feita uma análise crítica dos procedimentos adotados no Brasil para a investigação geoambiental e aponta as possibilidades que surgem quando se utilizam ferramentas mais específicas e modernas para esse fim. Para dar suporte a essa premissa realizou-se uma investigação geoambiental numa área específica do município de Bauru-SP, utilizando como ferramentas para a elaboração do MC a amostragem de solo com a metodologia da cravação contínua (*Direct Push*), ensaios RCPTu, sondagens com Trado Oco Helicoidal, instalação de poços de monitoramento e ensaios hidrogeológicos. Os resultados mostraram: uma boa correlação entre a interpretação do perfil pelos diversos métodos; que o sensor de resistividade melhora a interpretação do perfil estratigráfico; que a tomada de decisão em campo melhora significativamente o MC; que os ensaios de RCPTu auxiliaram na identificaram um aquífero confinado e um aquífero na área, que foram comprovados pelos poços instalados. Conclui-se o trabalho afirmando que o Piezocone de Resistividade pode ser uma ferramenta útil e poderosa para a elaboração do MC, especialmente em uma abordagem que priorize a investigação geoambiental em alta resolução.

Palavras-chave: investigação geoambiental, áreas contaminadas, piezocone, resistividade, rcptu, modelo conceitual

Abstract

The main objective of this study is to contribute to improve the geoenvironmental site investigations in Brazil, particularly in contaminated lands. This contribution comes through the presentation and demonstration of the Resistivity Piezocone Test (RCPTu) uses, a consolidated tool on geotechnical and geoenvironmental investigation worldwide, but still with little use in Brazil. A suitable decision-making regarding the management of a contaminated land is a direct function of the quality of the diagnosis. The final result of this detailed diagnosis is called Conceptual Site Model (CSM). The most appropriate approach to establish a solid CSM with a low and manageable degree of uncertainty is the "Triad Approach" which, among other concepts, is based on the use of a high-resolution investigation tools for identification of hydrogeological heterogeneities in centimeters scale. One of the equipment available to carry out such investigation is the Piezocone Test, or CPTu. In this test it is possible to attach a resistivity sensor behind the piezocone. This set is called Resistivity Piezocone Test (RCPTu). It has been shown that the use of this additional sensor can provide a more detailed stratigraphic profile, generating a faster high density data. In this study, a critical analysis of the Brazilian's procedures for geoenvironmental investigation is presented and points out the possibilities that arise when using more specific and modern tools. To support this, a geoenvironmental site investigation was carried out in a specific area of Bauru-SP, Brazil, using several tools to development of the CSM: Direct Push soil sampling (DPT), RCPTu tests, Hollow Stem Auger drilling, monitoring wells installation and bail tests. The results showed: a good correlation between the Hydrostratigraphic Profile obtained by various methods; the resistivity sensor improves the interpretation of Hydrostratigraphic profile; decision-making on the field significantly improves the CSM; the RCPTu tests helped to identify a confined aquifer and an aquitard in the area that have been confirmed by the installed multilevel wells. In conclusion, the Resistivity Piezocone Test can be a useful and powerful tool to elaborate the CSM, especially in an approach that prioritizes a high resolution geoenvironmental site investigation.

Keywords: geo-environmental investigation, contaminated sites, piezocone, resistivity, rcptu, conceptual site model, site assessment

Índice de Figuras

Figura 1 - Remoção de tambores com BHC em Umuarama-PR – UMUARAMA ILUSTRADO (2012).....	7
Figura 2 – Propaganda antiga do Neocid. NEGRÃO (2012)	7
Figura 3 - Outdoor no Aterro Mantovani protestando contra as indústrias que ali destinaram resíduos (NEGRÃO, 2012).....	9
Figura 4 – Placa colocada no foco principal de contaminação na Cidade dos Meninos (FIOCRUZ, 2011)	11
Figura 5 – Evolução do número de áreas contaminadas em SP (GLOEDEN et al, 2011)..	12
Figura 6 – Fluxograma do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2012-d) ...	15
Figura 7 – Modelo Conceitual da área em representação gráfica (LINCH, 2004).....	17
Figura 8 – Distribuição dos Postos de Combustível contaminadas em SP pelo status de encerramento (GLOEDEN et al, 2011)	35
Figura 9 – Distribuição dos Postos de Combustível contaminadas nos EUA pelo status de encerramento (NEGRÃO, 2012)	36
Figura 10 – Planilha de campo com resultados do ensaio de CPT e posicionamento da seção filtrante dos poços de monitoramento (USEPA, 2007)	40
Figura 11 – Correção do efeito de áreas desiguais (IDE, 2009).....	45
Figura 12 – Local de Estudo e trecho erodido (IDE, 2009)	50
Figura 13 – Ramificação da erosão em 2003 (IDE, 2009)	51
Figura 14 – Área como bolsão de entulho (IDE, 2009).....	51
Figura 15 – Início do aterramento em 2004 (CORGHI e GIACHETI 2005).....	52
Figura 16 – Ramificação aterrada e coberta com camada de solo em 2005 (CORGHI e GIACHETI 2005).....	52
Figura 17 – Gabião destruído pela ação da água em 2003 (CORGHI e GIACHETI 2005)	52
Figura 18 – Perfil geotécnico transversal à erosão (IDE, 2009).....	54
Figura 19 – Localização dos ensaios SPT (IDE, 2009).....	55
Figura 20 – Perfil geotécnico longitudinal da erosão (IDE, 2009).....	55
Figura 21 – Localização das sondagens SPTs e dos ensaios CPTUs (IDE, 2009).....	56
Figura 22 – Ensaio de campo: SPT (esq) e CPTU (dir) (IDE, 2009)	57

Figura 23: Resultados dos ensaios RCPTU e interpretação do perfil estratigráfico (Fagundes et al, 2011)	58
Figura 24 – Componentes do equipamento de amostragem Direct Push da AMS-Samplers (adaptado de AMS, 2012).....	60
Figura 25 – Cravação da composição com equipamento mecanizado, acoplado à sonda hidráulica ECD-SMA-01	61
Figura 26 – Retirada do <i>liner</i> de dentro do amostrador e identificação	61
Figura 27 – Sonda ECD-SMA-01 montada sobre caminhão	62
Figura 28 – Sonda Hidráulica montada sobre Trator com Trados Sólidos	63
Figura 29 –Trados Sólidos utilizados na sondagem	63
Figura 30 –Preparação da Sonda sobre trator para ensaios RCPTu	64
Figura 31 – Tampão superior (Cap de Pressão)	65
Figura 32 – Pistão para desenvolvimento preliminar	65
Figura 33 – Utilização da bomba elétrica submersível para desenvolvimento dos poços ..	66
Figura 34 – Cone com ponteira Geotech.....	66
Figura 35 – Cone montado, com sensor de Condutividade elétrica à esquerda	67
Figura 36 – Ferramenta de Ancoragem	67
Figura 37 – Microfone para aquisição de dados.....	68
Figura 38 – Amostragem de solo por cravação contínua com furo aberto – diagrama esquemático do funcionamento (traduzido de AMS, 2012).....	69
Figura 39 – Composição sendo cravada com equipamento mecanizado	69
Figura 40 – Retirada da composição com equipamento mecanizado.....	70
Figura 41 – Composição sendo retirada de dentro dos Trados Ocos	71
Figura 42 – Ferramentas auxiliares para desmontagem da composição, detalhe do amostrador (à esquerda) e do <i>liner</i> identificado (à direita)	71
Figura 43 – Detalhe dos <i>liners</i> preparados para descrição	71
Figura 44 – Tubo-Revestimento e Tubo-Filtro sendo rosqueados e colocados por dentro dos trados ocos	72
Figura 45 – Tubos adequadamente embalados sendo colocados por dentro dos trados ocos	73
Figura 46 – Colocação do pré-filtro no espaço anelar.....	73
Figura 47 – Desenvolvimento preliminar	74
Figura 48 – Aplicação da Calda de cimento e bentonita	74

Figura 49 – Vista do poço de monitoramento acabado (à esquerda) e em acabamento (à direita).....	75
Figura 50 – Utilização da bomba elétrica submersível para desenvolvimento dos poços. .	75
Figura 51 – Poço instalado após sondagem com Trado Sólido.....	76
Figura 52 – Monitoramento dos parâmetros durante o ensaio	77
Figura 53 – Saturação da pedra porosa com glicerina deaerada e manipulada em recipiente adequado.....	77
Figura 54 – Filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva	78
Figura 55 – Microfone para aquisição de dados.....	78
Figura 56 – Ábaco de classificação de solos (Robertson et al, 1986)	79
Figura 57 – Sensores sendo cravados. No detalhe, o sensor de resistividade	80
Figura 58 – Slug Test (A) e Bail Test (B) – OLIVA et al (2005)	81
Figura 59 – Mapa de Localização da Área Estudada	85
Figura 60 – Localização das Sondagens SPT	87
Figura 61 – Perfis de SPT – Seção Longitudinal – Reinterpretados de IDE, 2009.....	88
Figura 62 – Perfis de SPT – Seção Transversal – Reinterpretados de IDE (2009)	88
Figura 63 – Modelo Conceitual Prévio	89
Figura 64 – Localização das Sondagens DP e das antigas sondagens SPT.....	91
Figura 65 – Perfis Longitudinal elaborado com base nas sondagens por cravação contínua	95
Figura 66 – Perfis Transversal elaborado com base nas sondagens por cravação contínua	96
Figura 67 – Modelo Conceitual revisado (após amostragem de solo por cravação contínua)	97
Figura 68 – 10 cm de um amostrador <i>liner</i> e as heterogeneidades da amostra de um aquífero inicialmente classificado de “homogêneo” (KILLIMBECK, 2012).....	98
Figura 69 – Localização dos ensaios RCPTu e amostragens de solo por cravação direta	100
Figura 70 – Perfis estratigráficos de seção longitudinal interpretados a partir dos ensaios RCPTu utilizando classificação de Robertson et al (1986).....	101
Figura 71 – Modelo Conceitual elaborado após os ensaios RCPTu de acordo com o ábaco de Robertson et al (1986).....	102
Figura 72 – Ensaio RCPT-01: 0,0m a 5,0 m	103
Figura 73 – Ensaio RCPT-01: 5,0m a 10,0 m	104
Figura 74 – Ensaio RCPT-01: 10,0m a 15,0 m	105
Figura 75 – Ensaio RCPT-02: 0,0m a 5,0 m	107

Figura 76 – Ensaio RCPT-02: 5,0m a 10,0 m	108
Figura 77 – Ensaio RCPT-02: 10,0m a 15,0 m	109
Figura 78 – Ensaio RCPT-03: 0,0m a 5,0 m	111
Figura 79 – Ensaio RCPT-03: 5,0m a 10,0 m	112
Figura 80 – Ensaio RCPT-03: 10,0m a 15,0 m	113
Figura 81 – Ensaio RCPT-02 com a interpretação	114
Figura 82 – Posicionamento dos poços multiníveis – visão geral	116
Figura 83 – Posicionamento dos poços multiníveis	117
Figura 84 – Perfis construtivos dos poços multiníveis PMN-01 e PMN-02 e comparação com o perfil obtido a partir da sondagem por cravação contínua (à esquerda) e do ensaio RCPTu (à direita)	119
Figura 85 – Ensaio RCPT-03 com interpretação	120
Figura 86 – Perfis construtivos dos poços multiníveis PMN-03 e PMN-04 e comparação com o perfil obtido a partir da sondagem por cravação contínua (esq) e do ensaio RCPTu (dir)	123
Figura 87 – Novo Modelo Conceitual revisado após a instalação dos poços multiníveis.	124
Figura 88 – Posicionamento dos poços de monitoramento do aquífero livre – Visão geral	126
Figura 89 – Posicionamento dos poços de monitoramento do aquífero livre – Visão detalhada	127
Figura 90 – Ensaio RCPT-10 interpretado	130
Figura 91 – Modelo conceitual hidrogeológico – aquífero livre	131

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Par Multinível PMN-01 x PMN-02.....	118
Tabela 2 - Par Multinível PMN-03 x PMN-04.....	121
Tabela 3 – Condutividade Hidráulica após Ensaio Hidrogeológicos	122
Tabela 4 – Cargas Hidráulicas dos poços do aquífero livre	128
Tabela 5 – Condutividade Hidráulica dos poços do aquífero raso	128

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	VII
SUMÁRIO	VIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	5
3 REVISÃO DA LITERATURA	6
3.1 ÁREAS CONTAMINADAS – PANORAMA GERAL	6
3.1.1 - <i>Love Canal</i> :.....	8
3.1.2 - <i>Aterro Mantovani</i>	8
3.1.3 - <i>Cidade dos Meninos</i>	9
3.1.4 - <i>Condomínio Barão de Mauá</i>	11
3.1.5 – <i>As Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo</i>	12
3.2 CONCEITOS BÁSICOS E PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	13
3.2.1 <i>Etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas</i>	13
3.2.2 <i>Modelo Conceitual da Área</i>	16
3.3 ARCABUÇO LEGAL NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	20
3.4 O MERCADO BRASILEIRO DAS ÁREAS CONTAMINADAS	21
3.5 PADRÕES E METODOLOGIAS PARA O GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS NOS EUA	23
3.6 ABORDAGEM TRÍADE E A AVALIAÇÃO EXPEDITA DA ÁREA	24
3.7 PROBLEMAS NAS INVESTIGAÇÕES BRASILEIRAS.....	29
3.7.1 <i>Falta de Modelo Conceitual Hidrogeológico Prévio</i>	30
3.7.2 <i>Seção Filtrante do Poço de Monitoramento Muito Longa</i>	30
3.7.3 <i>Camada de Pré-Filtro Abaixo da Seção Filtrante</i>	31
3.7.4 <i>Falta de desenvolvimento preliminar</i> :.....	32
3.7.5 <i>Limitações do Método de Amostragem de Solo por Cravação Contínua</i>	32
3.8 INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO	36
3.9 CPT, CPTU E RCPTU COMO FERRAMENTA DE INVESTIGAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS E ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL DA ÁREA	39
3.10 ENSAIO CPTU PARA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	43

3.11	PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE PARA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA	47
3.12	ESTUDOS PRÉVIOS NA ÁREA DE ESTUDO (INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR)	49
3.12.1	<i>Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT)</i>	53
3.12.2	<i>Ensaio de Penetração do Piezocone (CPTU)</i>	55
3.12.3	<i>Piezocone de Resistividade (RCPTU)</i>	57
4	MATERIAIS E MÉTODO	59
4.1	MATERIAIS	59
4.1.1	<i>Amostragem de Solo por Cravação Contínua (“Direct Push”)</i>	59
4.1.2	<i>Sondagem com Sonda Hidráulica Sobre Caminhão</i>	61
4.1.3	<i>Sonda Hidráulica Sobre Trator</i>	62
4.1.4	<i>Materiais para Instalação e Desenvolvimento de Poços de Monitoramento</i>	64
4.1.5	<i>Materiais para Ensaios RCPTu</i>	66
4.1.6	<i>Materiais para Ensaios Hidrogeológicos (Bail Test)</i>	68
4.2	MÉTODO	68
4.2.1	<i>Amostragem de Solo por Cravação Contínua</i>	68
4.2.2	<i>Instalação de Poços de Monitoramento por Dentro dos Tradados Ocos</i>	72
4.2.3	<i>Instalação de Poços de Monitoramento com “Furo Aberto” e Tradados Sólidos</i>	76
4.2.4	<i>Ensaios RCPTu</i>	76
4.2.5	<i>Ensaios Hidrogeológicos (“Bail Test”)</i>	80
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
5.1	INTRODUÇÃO	83
5.2	INFORMAÇÕES PRELIMINARES	84
5.3	AMOSTRAGEM DE SOLO PELO MÉTODO DA CRAVAÇÃO CONTÍNUA	90
5.3.1	<i>Colapso da parede do furo de sondagem</i>	92
5.3.2	<i>Pressão hidráulica carregando material para dentro do revestimento:</i>	93
5.3.3	<i>Solo saturado não permite uma boa recuperação da amostra no liner:</i>	93
5.4	ENSAIOS DE PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE (RCPTU)	98
5.5	POÇOS DE MONITORAMENTO MULTINÍVEIS	114
5.6	POÇOS DE MONITORAMENTO AQUIFERO LIVRE	125
5.7	ENSAIOS RCPTU ADICIONAIS	128
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
6.1	ASPECTOS GERAIS	132
6.2	RESULTADOS	133
6.3	CONCLUSÕES	135
6.4	LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	135
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

8 ANEXOS 149

1 INTRODUÇÃO

As áreas contaminadas são geradas pela deposição, ao longo do tempo, de materiais ou substâncias de maneira inadequada no subsolo. Essa deposição ocorreu por desconhecimento de práticas adequadas ou por falta de consciência dos responsáveis do passivo ambiental que estavam deixando para as gerações futuras. Essas áreas contaminadas podem causar graves danos à saúde humana, à biota, ao meio ambiente ou às propriedades, sendo fundamental encontrá-las, investigá-las e recuperá-las.

O estudo das áreas contaminadas é recente no Brasil. Os dois principais instrumentos legais específicos foram publicados em 2009: a Lei Estadual 13577/2009 (SÃO PAULO, 2009) do Estado de São Paulo e a Resolução CONAMA 420/2009 (CONAMA, 2009), essa em nível nacional. Antes dessas leis, havia resoluções, regulamentações e procedimentos que eram praticamente restritos ao Estado de São Paulo, aplicados e fiscalizados por ocasião do processo de licenciamento ambiental conduzido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

O ônus pela eventual contaminação da área é do Responsável Legal, que pode ser o causador da contaminação, aquele que obteve ganhos financeiros com ela ou o proprietário da área, de modo solidário, ou seja, não é preciso comprovar que o empreendedor que está atualmente na área causou a contaminação para que ele seja responsabilizado e obrigado a investigar e recuperar a área. Desta forma, no Brasil, o Responsável Legal, de modo geral, encara os trabalhos de estudo de áreas contaminadas como um “gasto sem retorno”, e procura formas de gastar o menos possível. Como segunda opção, procura-se protelar o dispêndio de recursos, fazendo o trabalho no maior número de etapas e no maior prazo que a legislação vigente permitir.

O Responsável Legal pela área em geral contrata um Responsável Técnico, que é chamado de “Consultoria”. Essa consultoria representa o Responsável Legal perante o órgão ambiental e/ou o poder público (prefeitura, Ministério Público, Câmara dos

Vereadores, entre outros), conduz tecnicamente os trabalhos de gerenciamento da área contaminada e apresenta os relatórios e laudos exigidos. Normalmente a consultoria subcontrata alguns serviços terceirizados, ou os gerencia. Como exemplos desses serviços terceirizados tem-se os laboratórios de análises químicas e as empresas “executoras” ou “de coleta de dados”, que fazem os trabalhos de campo (amostragem de solo, de água subterrânea, de vapores, instalação de poços de monitoramento, instalação e monitoramento de sistemas de remediação, ensaios hidrogeológicos, entre outros serviços) sob a orientação técnica da consultoria.

Dentro da lógica do “mercado”, as consultorias concorrem entre si e fazem o máximo para reduzir o custo do seu projeto sob a pena de não conseguirem o cliente. Embora a preocupação principal seja atender as exigências do órgão ambiental, seguir ao pé da letra os procedimentos determinados pela CETESB, na maior parte das vezes, não garante que a área será adequadamente investigada, conseqüentemente, não será adequadamente remediada.

A tônica dos trabalhos no Brasil é a consultoria fragmentar o projeto o máximo que conseguir e cobrar o menor valor possível para as etapas de investigação com o objetivo de conseguir “ganhar” o trabalho de remediação. O Responsável Legal, aparentemente, sairia ganhando, pois dilui o custo em várias etapas e atende as exigências legais. Porém, na etapa da remediação, esse Responsável Legal irá perceber que a área que não teve um diagnóstico adequado não será reabilitada de acordo com as exigências legais ou não será reabilitada no prazo adequado, ou irá gastar muito mais com o projeto global, embora tenha gastado menos na etapa de investigação.

Nos EUA, a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) já estuda as áreas contaminadas há mais tempo que o Brasil, pelo menos desde o famoso caso do *Love Canal*, na década de 70 (USEPA, 2004). Essa agência tem uma estrutura física e de massa crítica muito grande, além de protocolos, procedimentos e normas baseadas em muitos estudos e pesquisas que permitem uma abordagem diferente da que é utilizada no Brasil. O programa *Superfund* é um fundo público que libera recursos para a reabilitação de áreas contaminadas prioritárias, o foco é na reabilitação total da área no menor tempo e no menor custo total do projeto, não no custo de cada etapa.

Pelo modelo aplicado nos EUA, o objetivo do Responsável Legal ou do poder público que libera os recursos, é realizar a reabilitação da área da maneira mais eficaz, mais rápida e mais barata, considerando o projeto como um todo. Para isso, muito se

investe em pesquisa e desenvolvimento de metodologias, ferramentas e equipamentos de investigação e diagnóstico de áreas contaminadas.

Para se atingir esses objetivos, as consultorias estadunidenses lançam mão de algumas abordagens institucionalizadas (*Triad Approach*, *Expedite Site Assessment*) ou não, mas que têm três princípios básicos:

- As tomadas de decisão têm de ser rápidas e em campo

- O Modelo Conceitual da Área – muitas vezes chamado no mercado de Modelo Conceitual do *Site* (MCS) – tem de ser continuamente revisado e, ao final dos trabalhos de diagnóstico em campo, deverá estar com o menor grau de incertezas possível, e essas incertezas têm de ser gerenciáveis (AQUINO NETO, 2009; QUINAM, 2012; KILLINBECK, 2012).

- Os equipamentos de coleta de dados têm de ser de alta resolução e permitirem uma coleta de grande densidade de dados em um curto espaço de tempo (CLEARLY, 2010; LINCH, 2004; MARTIN & St GERMAIN, 2008).

Dentro desses princípios, os ensaios de cone elétrico (CPT), piezocone (CPTu) e piezocone de resistividade (RCPTu) têm lugar de destaque, pois coletam alta densidade de dados, em curto espaço de tempo (QUINAM, 2012; WELTY, 2012; KILLINBECK, 2012; AHLERS, 2012), em alta resolução, com custo relativamente baixo (LEE et al, 2008; SHIN III et al, 2004; GIACHETI et al, 2002), permite tomada de decisão em campo e proporciona um entendimento muito bom da geologia, variável mais crítica para a elaboração do Modelo Conceitual (QUINAM, 2012; WELTY, 2012; KILLINBECK, 2012; CLEARLY, 2010) e a elaboração de um perfil hidroestratigráfico muito bom (QUINAM et al, 2010; CLEARLY, 2010; VIENKEN et al, 2012), além de permitir a obtenção de dados do solo e água subterrânea que seriam muito difíceis (ou impossíveis) de se obter. Todos esses ensaios são utilizados com muita frequência nos estudos de áreas contaminadas nos EUA (VIENKEN, 2012).

No Brasil, ao optar-se pela abordagem equivocada, as investigações acabam sendo muito mais lentas e com muito mais incertezas, pois as decisões não são tomadas em campo (o mais comum é a coleta de dados em campo ser feita por profissional júnior, que leva os dados ao escritório para serem analisados pelo profissional sênior, que revê o MCS, remobiliza as equipes de campo para coletar mais dados, e assim por diante). A investigação é feita empregando-se métodos tradicionais (muito mais lentos, com densidade de dados muito menor) e que utilizam ferramentas de baixa resolução. Além da opção pela abordagem equivocada, em grande parte dos trabalhos, mesmo os métodos

tradicionais não são adequadamente utilizados, acarretando em remediações ineficazes, com prazos extremamente longos, e com custos excessivos para o Responsável Legal e para a sociedade, muitas vezes inviabilizando a revitalização da área.

Alguns equipamentos de investigação de alta resolução já estão disponíveis no Brasil, como sensores que medem qualitativamente concentrações de alguns compostos químicos de interesse (por exemplo, o MIP – *Membrane Interface Probe*, e o LIF – *Laser-Induced Fluorescence*), laboratórios móveis, ferramentas mecanizadas de alta capacidade para amostragem de solo e água subterrânea, e equipamentos para a realização de ensaios CPT, CPTu e RCPTu. Esses são largamente utilizados nas investigações geotécnicas no Brasil e, mais recentemente, começam a ser utilizados nas investigações geoambientais de áreas contaminadas.

O presente trabalho apresenta um estudo de caso em que se utiliza o ensaio RCPTu como ferramenta para a elaboração de um modelo conceitual da área sólida e com baixo grau de incerteza em uma investigação geoambiental simulada, realizada de acordo com a abordagem estadunidense. Os ensaios RCPTu são uma ferramenta poderosa para complementar os estudos hidrogeológicos, fornecendo dados em alta densidade e alta definição para delimitar com elevada precisão o perfil geológico-hidroestratigráfico da área e que tem potencial de utilização também em nosso país.

Nesse trabalho é feita também uma análise crítica dos procedimentos adotados no Brasil para a investigação geoambiental, bem como se apontar as possibilidades que surgem quando se utilizam ferramentas mais específicas e modernas para esse fim.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho foi contribuir para uma melhora na qualidade das investigações geoambientais no Brasil, em particular nas investigações de áreas contaminadas. Entende-se que essa contribuição se dá ao se analisar o uso do Ensaio de Piezocone de Resistividade (RCPTu) na investigação geoambiental de áreas contaminadas no Brasil. Essa ferramenta já está consolidada internacionalmente e, no Brasil, é muito usada nas investigações geotécnicas. No entanto, seu uso nas investigações geoambientais brasileiras ainda é incipiente, mas os resultados indicam que o ensaio RCPTu pode contribuir com um aumento expressivo na qualidade dessas investigações, especialmente para a diminuição das incertezas na elaboração do Modelo Conceitual da Área, ao se apresentar como ferramenta de investigação de alta resolução.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Áreas Contaminadas – Panorama Geral

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) define áreas contaminadas como “área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. Nessa área, os poluentes ou contaminantes podem concentrar-se em subsuperfície nos diferentes compartimentos do ambiente, como, por exemplo, no solo, nos sedimentos, nas rochas, nos materiais utilizados para aterrar os terrenos, nas águas subterrâneas ou, de uma forma geral, nas zonas não saturada e saturada, além de poderem concentrar-se nas paredes, nos pisos e nas estruturas de construções” (CETESB, 2012).

As áreas contaminadas podem ser um problema muito grave para a saúde humana, meio ambiente ou para a sociedade e são decorrentes, basicamente, da sociedade industrial que vivemos. A origem das áreas contaminadas está relacionada ao desconhecimento, em épocas passadas, de procedimentos seguros para o manejo de substâncias perigosas, ao desrespeito a esses procedimentos e à ocorrência de acidentes ou vazamentos durante o desenvolvimento dos processos produtivos, de transporte ou de armazenamento de matérias primas e produtos. Em décadas passadas, não havia a preocupação ambiental que existe no século XXI, e tampouco havia conhecimento técnico sobre o problema que estava sendo deixado para as futuras gerações, o chamado “passivo ambiental”.

Como exemplos dessa mudança de paradigma, pode-se citar o uso de antigos inseticidas, como o Neocid e o BHC (nome comercial do composto hexaclorociclohexano). Ambos são pesticidas e inseticidas poderosos, o primeiro é o nome comercial de um produto a base de Dicloro-Difenil-Tricloroetano (DDT), e o segundo é base para pesticidas

utilizados por muito tempo no Brasil. Ambos foram banidos na década de 70 na Convenção de Estocolmo, por serem considerados carcinogênicos e POPs (Produtos Orgânicos Persistentes).

O Neocid foi largamente utilizado no Brasil na década de 70 (Figura 2) como produto para matar piolhos e outros parasitas urbanos, e o BHC, embora proibido, é ainda utilizado no Brasil como pesticida para a agricultura, motivando campanhas governamentais (Figura 1) para o recolhimento das sobras desse produto em poder de agricultores (UMUARAMA ILUSTRADO, 2012).



Figura 1 - Remoção de tambores com BHC em Umuarama-PR – UMUARAMA ILUSTRADO (2012)



Figura 2 – Propaganda antiga do Neocid. NEGRÃO (2012)

A extrapolação desses exemplos para outras substâncias químicas, outros processos industriais, outras práticas, nos levam a inferir que o problema decorrente das áreas contaminadas é muito grave e não se tem ainda, no Brasil, a dimensão desse problema. Dentre os casos emblemáticos de áreas contaminadas, pode-se citar os que serão brevemente descritos a seguir:

3.1.1 - Love Canal:

Esse caso é considerado o símbolo mundial para o estudo das áreas contaminadas (USEPA, 2004). Situada próxima às Cataratas do Niágara, o local foi projetado para diversão, natação e canoagem no início do século XX. Nos anos 1920 foi vendido à Hooker Chemical Co. para servir de depósito de resíduos. No período entre 1942 e 1953 foram depositados mais de 21 mil toneladas de produtos químicos como DDT, solventes, Bifenilas Policloradas (PCB), dioxinas e metais.

Quando a capacidade do aterro se esgotou a empresa aterrou o local. A Hooker vendeu o terreno ao conselho escolar local para a construção de uma escola, mesmo sabendo que haviam resíduos tóxicos enterrados. A venda ocorreu por 1 Dólar e deixando uma cláusula no contrato afirmando que em caso de problemas com a contaminação ela não seria processada.

A escola foi construída e no final da década de 1960 já existiam em Love Canal 800 moradias, 240 apartamentos e 3 escolas. Mesmo com as reclamações dos moradores de lixo que aparecia nos jardins e do forte cheiro as autoridades nada faziam, até que diversos problemas de saúde surgiram entre os que lá moravam.

Doenças como leucemia, problemas respiratórios, nos rins, abortos espontâneos, deficiências em recém-nascidos eram comuns e com média sensivelmente maior que a população em geral dos EUA (USEPA, 1979). Exames na água identificaram 82 compostos, dos quais 11 potencialmente carcinogênicos. Em 1978 a zona foi declarada como área de emergência médica e seus moradores realojados. A escola foi fechada. Mesmo com a cláusula, a Hooker teve que pagar 98 mil Dólares ao Estado de Nova Iorque e 129 mil ao governo federal, além de uma indenização de 20 mil aos residentes (USEPA, 1979). Em 2004, o Love Canal foi declarado “revitalizado” pela USEPA (USEPA, 2004), porém, a massa principal de contaminantes permanece na área, foram instaladas medidas de contingência para que essa contaminação não migre para outros locais pela água subterrânea.

Foram consumidos mais de 20 milhões de dólares no processo de investigação e remediação da área (USEPA, 2004).

3.1.2 - Aterro Mantovani

Considerado o “Love Canal Brasileiro” (NEGRÃO, 2012). Muitas indústrias destinaram seus resíduos (legal ou ilegalmente) a esse aterro industrial, localizado em

Santo Antônio da Posse-SP, entre 1974 e 1987, quando a CETESB verificou contaminação da área e interditou o aterro (CETESB, 2012-a). A área vem sendo monitorada pela CETESB desde então. Uma ação civil pública acarretou, em 1995, na condenação do proprietário do aterro a remediar a área. No entanto, devido à falta de condições financeiras, a condenação não foi atendida. A CETESB acionou, no ano 2000, todas as empresas que pra lá destinaram seus resíduos (Figura 3). Desde então, a área vem sendo investigada e algumas ações emergenciais e de recuperação do local estão em vigor, mas a área, considerada crítica pela CETESB, ainda não está recuperada (CETESB, 2012-a).



Figura 3 - Outdoor no Aterro Mantovani protestando contra as indústrias que ali destinaram resíduos (NEGRÃO, 2012)

3.1.3 - Cidade dos Meninos

Cidade dos Meninos é uma área de domínio da União com aproximadamente 19,4 milhões de metros quadrados, localizada no município de Duque de Caxias no estado do Rio de Janeiro. Nesta área, existem aproximadamente 750 famílias expostas a uma contaminação ambiental por organoclorados abandonados no local desde 1965 quando foi desativada uma fábrica de produção de Hexaclorociclohexano (HCH) e manipulação de outros organoclorados (FIOCRUZ, 2011).

A partir de 1947, na área, funcionou o Abrigo Cristo Redentor que estava sob a responsabilidade do Ministério da Educação e Saúde e passou a albergar o Instituto de Malariologia. Em 1950, o Instituto instalou uma fábrica para produção de hexaclorociclohexano (HCH) e manipulação de outros organoclorados, que eram utilizados nas campanhas nacionais de saúde pública. Em 1961, iniciou-se processo de desativação gradual da fábrica, que culminou no encerramento definitivo das atividades em 1965. Em 1989, ocorreram denúncias, noticiadas pelos meios de comunicação, sobre a venda

irregular de "pó de broca" em feiras livres do Município de Duque de Caxias, sendo identificado posteriormente, que a origem era da área da antiga fábrica em Cidade dos Meninos. A Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA), hoje Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro (INEA), estimou que existiam aproximadamente 300 toneladas de produtos adicionadas ao solo no local da fábrica, além de 40 toneladas de organoclorados puro sobre o solo que foram armazenado, estocados e posteriormente, incinerados (FIOCRUZ, 2011).

O local onde funcionou a fábrica ficou conhecido como foco principal de contaminação e possui uma área cercada de aproximadamente 70.000 m². Os resíduos abandonados foram disseminados por via aérea, águas pluviais e, principalmente, por carreamento mecânico para utilização em aterros, aplicação como agrotóxico, utilização em reboco de casas, utilização para tapar buracos na estrada principal e vendidos em feiras. Em 1994, o Juizado de Menores expediu liminar para interdição da área, desativação das atividades educacionais e transferência das crianças para outros abrigos, medidas estas que foram concluídas em 1996 (FIOCRUZ, 2011).

A partir da Avaliação de Risco à Saúde humana, 2002, os contaminantes existentes na Cidade dos Meninos foram identificados: hexaclorociclohexano (HCH) e seus isômeros; diclorodifeniltricloroetano (DDT) e seus metabólitos (DDD e DDE); triclorobenzenos (TCB); triclorofenóis (TCB) e policlorados dibenzodioxina e policlorados dibenzofurano (DDD e DDE). Em 2001, as dez famílias que residiam nas imediações do foco principal foram transferidas para casas alugadas. Até que se alcance uma solução geral para o problema da exposição humana, o Ministério da Saúde paga o aluguel destas dez famílias mensalmente. As casas que eram localizadas, na área do foco principal, foram demolidas (FIOCRUZ, 2011).

Em 2003 foi realizada uma pesquisa para dosar os níveis de HCH no sangue da população residente na Cidade dos Meninos. Os resultados desta pesquisa revelaram que 97,3% da população pesquisada apresentaram algum dos resíduos dos contaminantes de interesse analisados e que os níveis de contaminação por esses resíduos organoclorados estavam acima dos valores de referências internacionais permitidos pela Organização Mundial da Saúde (FIOCRUZ, 2011).

Até o momento (julho/2012), os focos de contaminação seguem sem um diagnóstico adequado, conseqüentemente, sem sequer um plano de intervenção definido para a área (Figura 4).



Figura 4 – Placa colocada no foco principal de contaminação na Cidade dos Meninos (FIOCRUZ, 2011)

3.1.4 - *Condomínio Barão de Mauá*

O Conjunto Residencial Barão de Mauá, localizado no município de Mauá é uma área contaminada por diversos compostos químicos, como: benzeno, clorobenzeno, trimetilbenzeno e decano (CETESB, 2012-b). O condomínio residencial foi implantado em terreno pertencente à empresa de amortecedores Cofap, que havia sido aterrado com resíduos industriais. Outras substâncias tóxicas, de origem desconhecida, foram ali sendo depositadas inadequadamente. Em 2000, ocorreu uma explosão na área que causou uma morte.

A CETESB multou a construtora responsável pelo condomínio, além de exigir medidas emergenciais para eliminação do risco iminente. Uma ação civil pública determinou que uma parcela dos imóveis deveriam ser demolidos e os moradores removidos.

Em 2011, a CETESB considerou o estudo realizado no ano anterior insatisfatório, aplicou autos de infração de penalidade de advertência à Cofap, à SQG Empreendimentos e à Paulicoop Empreendimentos, e exigiu a apresentação de um Plano de Intervenção para remediação da área (CETESB, 2012-b). Entretanto, diante da postura adotada pelos responsáveis legais em protelar a apresentação de um Plano de Intervenção que contemple a adoção de medidas destinadas à eliminação dos cenários de risco a que estão expostos os moradores, apontados pelos próprios estudos apresentados pela Cofap, e das incertezas associadas aos mesmos estudos, a CETESB entende ser necessária a remoção dos moradores de 11 edifícios do Conjunto Residencial, instalados em áreas prioritárias de risco.

3.1.5 – As Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo

Além dos riscos à saúde humana e dos danos ao meio ambiente, as áreas contaminadas representam uma perturbação econômica, acarretando na desvalorização de propriedades. Um caso característico de danos econômicos é o do Shopping Center Norte (CETESB, 2012-c), em que a interdição do empreendimento por uma semana devido a riscos iminentes a funcionários e frequentadores e a estudos insuficientes e com muitas incertezas por parte dos responsáveis legais e da consultoria acarretou em enormes prejuízos financeiros e à imagem do Shopping, que precisou de ações intensas de marketing para tentar consertar a imagem arranhada.

Um estudo da CETESB, divulgado em dezembro de 2011 (GLOEDEN et al, 2011), mostra que o Estado de São Paulo possui 4131 áreas contaminadas cadastradas, sendo 78% delas postos de combustíveis, 14% Indústrias, 3% Resíduos e 5% de outras causas (Figura 5).

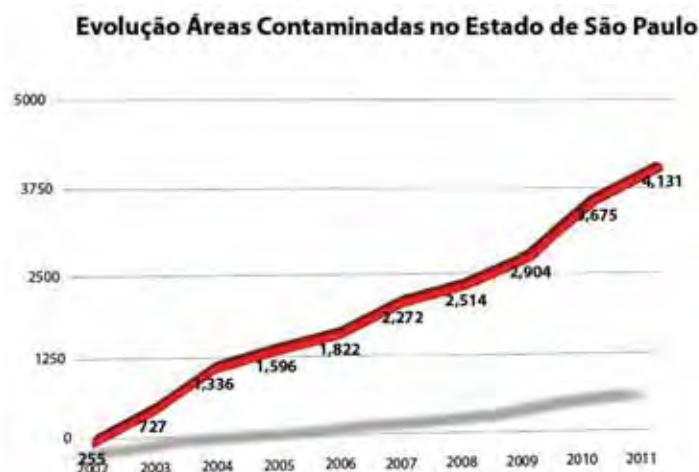


Figura 5 – Evolução do número de áreas contaminadas em SP (GLOEDEN et al, 2011)

A princípio, pode-se pensar que os postos representam o maior problema ambiental referente às áreas contaminadas no estado de São Paulo, no entanto, as áreas contaminadas industriais e os antigos depósitos de resíduos industriais estão, certamente, entre as mais críticas devido, principalmente, aos contaminantes presentes nos processos industriais (especialmente nos processos antigos), que apresentam um comportamento mais complexo no meio subterrâneo e frequentemente geram maior risco à saúde humana. Dentre as 10 áreas denominadas “Áreas Contaminadas Críticas” pela CETESB (CETESB, 2012-d), cinco são antigas áreas industriais (Jurubatuba, Barão de Mauá, Vila Carioca, Indústrias

Matarazzo e Mansões Santo Antonio), duas eram antigos Aterros Industriais (Aterro Mantovani e Jardim das Oliveiras) – e três eram antigos lixões ou aterros sem controle (COHAB Heliópolis, Shopping Center Norte, COHAB Nossa Senhora da Penha).

O mesmo documento aponta que, em dezembro/2011, dessas 4131 áreas contaminadas cadastradas, 6% estavam Reabilitadas, 19% na fase final de reabilitação (monitoramento para encerramento), totalizando 25% das áreas. 30% delas estavam sob investigação e 45% estavam contaminadas aguardando a tomada de ação do Responsável Legal da área.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, existem cerca de 8.500 postos de combustíveis no Estado de São Paulo, número condizente com as licenças emitidas pela CETESB (2012-d). De acordo com a FIESP (2010), o número de indústrias no estado de São Paulo chega a 150 mil. Pode-se perceber que ainda há muitas áreas potencialmente contaminadas em São Paulo. Inference-se que no Brasil, esse número seja ainda maior.

3.2 Conceitos Básicos e Problemas Específicos

3.2.1 *Etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas*

A CETESB, na sua Decisão de Diretoria 103/2007 (CETESB, 2007) apresenta uma série de definições que norteiam os conceitos utilizados no Gerenciamento de Áreas Contaminadas. As mesmas definições foram utilizadas na Lei Estadual 13.577/09 do Estado de São Paulo e na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 420/2009. Algumas dessas definições estão colocadas abaixo:

Área contaminada sob investigação (AI): área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria onde há comprovadamente contaminação, constatada em investigação confirmatória, na qual estão sendo realizados procedimentos para determinar a extensão da contaminação e identificar a existência de possíveis receptores, bem como para verificar se há risco à saúde humana. A área também será classificada como área contaminada sob investigação (AI), caso seja constatada a presença de produtos contaminantes (por exemplo, combustível em fase livre), ou quando houver constatação da presença de substâncias, condições ou situações que, de acordo com parâmetros específicos, possam representar perigo.

Área contaminada (AC): área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria, anteriormente classificada como área contaminada sob investigação (AI) na qual, após a realização de avaliação de risco, foram observadas quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana. A critério da CETESB, uma área poderá ser considerada contaminada (AC) sem a obrigatoriedade de realização de avaliação de risco à saúde humana quando existir um bem de relevante interesse ambiental a ser protegido.

Área em processo de monitoramento para reabilitação (AMR): área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria, anteriormente classificada como contaminada (AC) ou contaminada sob investigação (AI), na qual foram implantadas medidas de intervenção e atingidas as metas de remediação definidas para a área, ou na qual os resultados da avaliação de risco indicaram que não existe a necessidade da implantação de nenhum tipo de intervenção para que a área seja considerada apta para o uso declarado, estando em curso o monitoramento para encerramento.

Área reabilitada para o uso declarado (AR): área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria, anteriormente classificada como área em processo de monitoramento para reabilitação (AMR) que, após a realização do monitoramento para encerramento, for considerada apta para o uso declarado.

Avaliação de risco: processo pelo qual são identificados, avaliados e quantificados os riscos à saúde humana ou a bem de relevante interesse ambiental a ser protegido.

Responsável Legal: pessoa(s) física(s) ou jurídica(s), de direito público ou privado, responsável(is), direta ou indiretamente, pela contaminação, ou pela propriedade potencial ou efetivamente contaminada e, conseqüentemente, pelos estudos necessários à sua identificação, investigação, avaliação de risco e pela implementação da intervenção, visando a reabilitação da área para o uso declarado.

Responsável Técnico: pessoa física ou jurídica contratada por um dos Responsáveis Legais para a elaboração ou apresentação de laudos, estudos, relatórios ou informações relacionadas às diferentes etapas do processo de gerenciamento de uma determinada área.

Risco: compreende o risco à saúde e o risco ecológico. O risco à saúde é definido como a probabilidade de ocorrência de câncer em um determinado receptor exposto a contaminantes presentes em uma área contaminada ou a possibilidade de ocorrência de outros efeitos adversos à saúde decorrentes da exposição a substâncias não carcinogênicas.

O risco ecológico é definido como a possibilidade de ocorrência de efeitos adversos aos organismos presentes nos ecossistemas.

De acordo com o mesmo documento (CETESB, 2007), o processo de reabilitação de áreas contaminadas tem como objetivo principal possibilitar a adoção de medidas corretivas visando atingir as metas estabelecidas para um uso preestabelecido, adotando-se, desta forma, o princípio da “aptidão para o uso”, e é constituído por seis etapas: investigação detalhada; avaliação de risco; concepção da remediação; projeto de remediação; remediação; monitoramento.

O fluxograma utilizado para ilustrar o Gerenciamento de Áreas Contaminadas está na Figura 6.

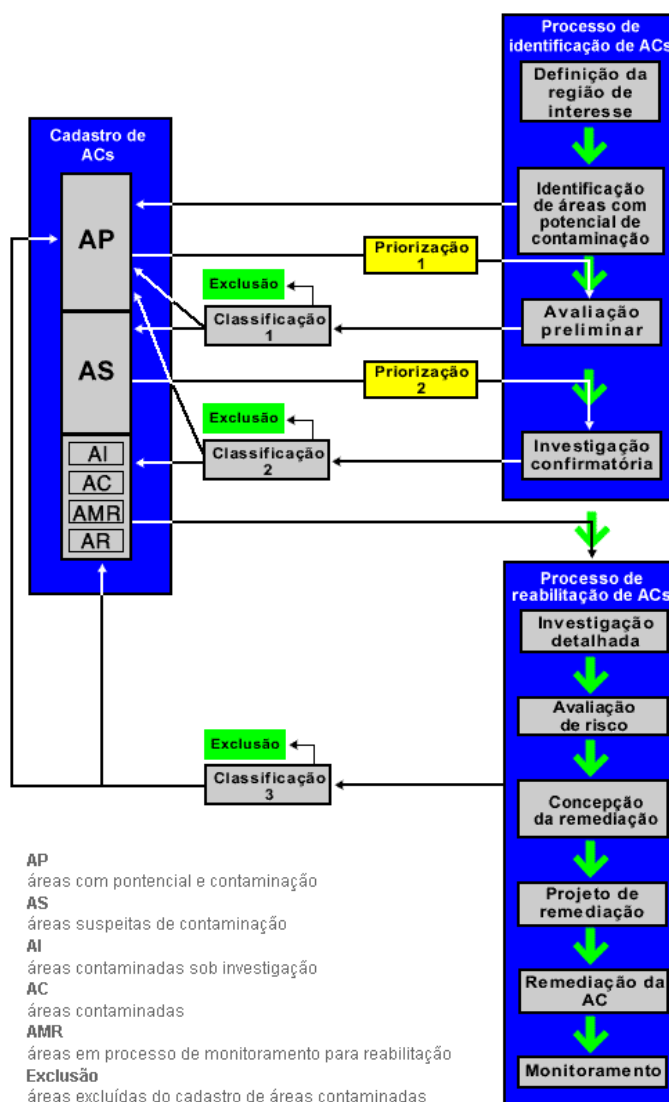


Figura 6 – Fluxograma do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2012-d)

3.2.2 **Modelo Conceitual da Área**

Modelo conceitual da área, conceito difundido no mercado como “Modelo conceitual do *site*” (MCS), ou simplesmente modelo conceitual, é o entendimento completo do meio, das fontes, das vias de exposição da eventual contaminação e dos receptores. O meio, a ser entendido, compreende a geologia, a pedologia, a hidrogeologia, as interfaces desses com os compostos químicos de interesse e tudo o que se relacionar com a eventual contaminação da área.

A USEPA define o MCS como o veículo inicial para comunicação de dados técnicos (USEPA, 2000). Em outro documento, a USEPA complementa essa definição ao considerar que o MCS é qualquer representação da natureza, extensão ou risco de contaminação, que permite a avaliação dos potenciais de contaminação, para que os tomadores de decisão possam escolher as melhores estratégias de mitigação desse risco (USEPA, 2008). Nesse estudo, a USEPA trata o MCS como hipótese de trabalho que representa o meio físico do site, ou ainda a imagem (ainda que mental) que os profissionais e tomadores de decisão têm das características hidrogeoquímicas do site, que permitem avaliar o risco e elaborar uma estratégia de remediação.

O MCS deve fornecer um resumo adequado de posição e estado em que se encontram os contaminantes, onde, como e quando esses vão migrar atingir algum receptor sensível e qual a dimensão possível do impacto causado por esse contaminante. O documento da USEPA (2000) diz que o MCS deve ajudar a estabelecer e justificar as abordagens para a caracterização da área, sempre com foco nos receptores mais sensíveis, de modo a priorizar os recursos na investigação e na remediação da área.

Dessa forma, o MCS é a hipótese científica a ser testada, modificada e refinada até que as incertezas sejam reduzidas a um nível que permita uma tomada de decisão confiável e segura. Em suma, é o ponto focal de todo o estudo de uma área contaminada ou suspeita e é o instrumento que norteia todos os trabalhos.

HUNTT (2004) relaciona como objetivos do MCS: caracterizar as vias de exposição, caracterizar o risco, selecionar ações de remediação, desenhar o sistema de remediação mais adequado, projetar a rede de monitoramento de eficiência e eficácia das ações de remediação, e documentar o encerramento do caso.

VOLT (2012), em seu documento canadense, baseado nos estudos publicados pela USEPA, ressalta a importância da elaboração de um sólido MCS, e o define como representação escrita ou gráfica do sistema ambiental e dos processos físicos, químicos e

biológicos que determinam fluxo, transporte e armazenamento de contaminantes nas diferentes mídias ambientais (ar, solo, sedimento, água subterrânea, entre outros) para os receptores em seus diversos modos de exposição. As justificativas para a elaboração do MCS, de acordo com VOLT (2012) são: reunir todos os dados técnicos das diversas fontes do site; apoiar a seleção de pontos de amostragem e compostos químicos de interesse; identificar as necessidades de dados e incertezas; descrever e integrar os processos que determinam a liberação e migração de contaminantes; determinar as rotas de exposição, identificar as incertezas do modelo para estabelecer as necessidades de estudos futuros; facilitar a seleção de alternativas de remediação; efetuar a avaliação da efetividade das ações de remediação para reduzir o risco.

Definida a importância do MCS para a investigação da área, VOLT (2012) estabelece o mínimo necessário para que se possa elaborar um Modelo Conceitual adequado: identificar e caracterizar as fontes de contaminação; delimitar os caminhos preferenciais da contaminação; estabelecer o *background* das áreas estudadas; estabelecer os limites da área a ser estudada; identificar e caracterizar os potenciais receptores;

Para iniciar a aquisição de dados que vão subsidiar a elaboração do MCS, LINCH (2004), propõe que o profissional se faça as seguintes perguntas: Como gerenciar incertezas? De quantas amostras eu preciso? Onde eu colete essas amostras? Essas amostras são representativas? Quando eu sei que tenho dados suficientes? LINCH (2004) reforça que a elaboração do MCS é dinâmica e deve ser revisada todos os dias, **durante os trabalhos de campo** (grifo do autor). A Figura 7 mostra um exemplo de modelo conceitual na forma de representação gráfica

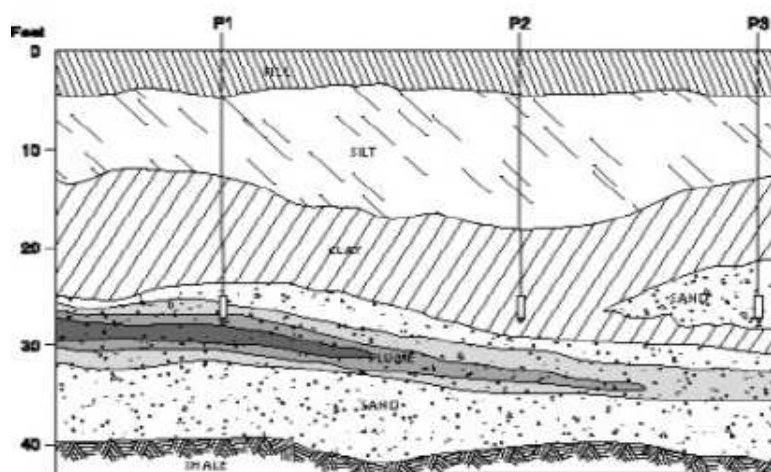


Figura 7 – Modelo Conceitual da área em representação gráfica (LINCH, 2004)

No seu documento “Manual para Amostragem de Solo – Varredura”, a USEPA contextualiza o MCS, dando especial atenção aos estudos hidrogeológicos (USEPA, 1996). Para que um modelo conceitual hidrogeológico seja adequadamente desenvolvido, é essencial que se tenha muito claro as condições geológicas e geomorfológicas do site. Os recursos de investigação, portanto, devem ser utilizados para se obter essas informações: perfil estratigráfico, direção preferencial de fluxo tridimensional de água subterrânea, delimitação dos aquíferos e aquitardes, parâmetros hidráulicos dos aquíferos, como condutividade hidráulica (k), gradiente hidráulico (i) e espessura do aquífero.

A elaboração desse Modelo Conceitual é etapa fundamental para a investigação da área. Sem isso, as medidas de intervenção podem ser ineficientes, mal dimensionadas, excessivamente custosas, mal planejadas, mal executadas, entre outras falhas comuns nessa etapa do processo.

Na definição da CETESB, modelo conceitual é uma representação mais realista da área contaminada investigada, com a representação das características das fontes de contaminação, extensão e taxa de avanço da contaminação e o posicionamento dos bens a proteger (CETESB, 2001).

Um modelo conceitual adequado deve conter, no mínimo:

- Identificação das fontes potenciais de contaminação, das fontes primárias e das fontes secundárias
- Delimitação tridimensional dessas fontes em todos os meios
- Estimativa da rota por onde essas fontes podem atingir os receptores sensíveis
- Identificação dos receptores sensíveis
- Estimativa do tempo que as fontes levarão para atingir os receptores.

Para a elaboração desse modelo conceitual, portanto, deve-se, no mínimo, conhecer:

- o perfil litológico / estratigráfico / hidroestratigráfico
- camadas mais hidraulicamente condutivas
- as zonas de fluxo e zonas de armazenamento
- os aquíferos e aquitardes
- os valores de condutividade hidráulica para cada camada de interesse
- os compostos químicos de interesse (CQI) presentes na área
- as concentrações desses CQI nos diferentes meios
- as características desses CQI
- as características físicas do solo nas camadas de interesse

Para se conhecer esses parâmetros, é necessário, no mínimo:

- realizar sondagens
- coletar amostras de solo
- coletar amostras de água subterrânea

Uma investigação em alta resolução também chamada de “*High Resolution Site Investigation*” pela USEPA promete a elaboração de um modelo conceitual mais preciso, com menor incerteza e em um tempo muito menor. O princípio desse modelo de investigação é gerar uma grande quantidade de dados, em alta densidade espacial, mesmo com precisão menor (USEPA, 2007; CLUMBING, 2004; USEPA, 2008; WELTY, 2012; SINGER e FIACCO, 2010).

A importância da elaboração adequada do MCS está ressaltada por CLUMBING (2004), que escreve que a tecnologia dos métodos de remediação evolui muito e de forma extremamente rápida, mas todos os métodos são totalmente dependentes de um Modelo Conceitual bem desenvolvido e com poucas incertezas. Não há, portanto, método de remediação eficiente o bastante para funcionar sem que a investigação do site tenha sido bem feita.

Dentro dessa premissa, uma das ferramentas que pode ser utilizada para a elaboração de um bom Modelo Conceitual é o ensaio de piezocone de resistividade (RCPTu), foco do presente trabalho, pois é uma ferramenta importante na detecção das heterogeneidades do meio físico, principal variável para a obtenção de um adequado diagnóstico da área (QUINAM et al, 2010; WELTY, 2012; SCHULMEISTER, 2008; CHRISTY et al, 1994).

Entre os documentos mais importantes para o estudo das áreas contaminadas no Brasil, está o “Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas” da CETESB cuja 1ª versão data de 1999, que se tornou a base para a elaboração das leis, normas e procedimentos estaduais e nacionais. Esse manual deixa clara a importância da elaboração do modelo conceitual e do seu refinamento, conforme vão avançando as etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), bem como a obrigatoriedade de se conhecer muito bem o meio para se propor alguma intervenção na área, seja remediação, seja outra forma de reabilitação. Sem esse entendimento claro do meio físico (e, conseqüentemente, sem um modelo conceitual adequadamente elaborado e com um baixo grau de incerteza), a intervenção na área não terá sucesso ou, se tiver, esse provavelmente terá sido conseguido a um custo mais elevado que o necessário.

Nos Capítulos V, VI e VIII, destinados, respectivamente à Investigação Preliminar, Investigação Confirmatória e Investigação Detalhada, estão descritas as exigências à elaboração de um modelo conceitual sólido da área.

No documento Procedimento para Investigação Detalhada e Plano de Intervenção em Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis, de 2009, as diretrizes lá apresentadas são claramente para diminuir as incertezas frente a uma investigação de um grupo de compostos químicos de interesse de comportamento conhecido (Hidrocarbonetos de Petróleo), onde a maior incerteza está na geologia e hidrogeologia do site (AQUINO NETO, 2009). A obrigatoriedade de instalação de poços multiníveis para se verificar a existência de fluxo vertical é o maior indicador dessa preocupação em delimitar tridimensionalmente uma eventual pluma e em estabelecer o modelo conceitual tridimensional da área. No procedimento, está indicada a instalação da seção filtrante do poço mais profundo do par multinível na próxima camada condutiva. O que está implícito nessa exigência é que é fundamental saber exatamente onde fica essa próxima camada condutiva. Na prática, as consultorias consideram o meio homogêneo e isotrópico e instalam essa seção filtrante 2 metros abaixo do fundo do poço raso do par (RIYIS e RIYIS, 2011). Um capítulo exclusivo desse documento é destinado a explicitar a necessidade do Responsável Técnico apresentar o modelo conceitual da área (AQUINO NETO, 2009)

A norma ABNT NBR 15.495-1 diz claramente que os poços de monitoramento somente devem ser instalados após o modelo conceitual da área ser conhecido. Ou seja, um poço de monitoramento só está corretamente instalado, de acordo com a norma, se houver um trabalho prévio de estabelecimento de um modelo conceitual da área. Na prática, o que acontece é que o poço de monitoramento e a sondagem para a sua instalação são os únicos instrumentos utilizados para se estabelecer o modelo conceitual (RIYIS e RIYIS, 2011).

3.3 Arcabouço Legal no Estado de São Paulo

O estado de São Paulo aprovou, em 2009, sua Lei Estadual número 13.577/2009, que regulamenta o gerenciamento de áreas contaminadas no Estado. Essa Lei amplia as resoluções e decisões de diretoria da CETESB publicada nos anos anteriores, como a Decisão de Diretoria 103/2007, entre outras, e estabelece mais claramente, as responsabilidades pelas áreas contaminadas.

A publicação dessa lei aumentou a demanda dos Responsáveis Legais pela solução de seus passivos ambientais decorrentes de contaminação, especialmente devido a dois movimentos simultâneos: o maior rigor na aplicação das sanções (administrativas, cíveis e criminais) contra os Responsáveis Legais e da obrigatoriedade de averbação no registro do imóvel quando a área está contaminada. Nesse segundo movimento, o mercado imobiliário gerou uma ampliação na necessidade de se investigar e reabilitar rapidamente antigas áreas industriais, contaminadas ou suspeitas de contaminação, uma vez que a demanda por áreas, especialmente na Grande São Paulo, cresceu muito nos últimos 10 anos de acordo com estudo do SECOVI (2012). Também seguindo essa necessidade, os bancos ou instituições financiadoras de habitação também têm a necessidade de investigar ou exigir que as incorporadoras investiguem suas áreas, pois podem se tornar corresponsáveis pelo eventual passivo ambiental. Por fim, os órgãos públicos, pelos mesmos motivos, geram também uma demanda, pois, ao desapropriarem áreas para obras de infraestrutura (metrô, obras viárias, entre outras), se tornam os novos proprietários das áreas que podem estar contaminadas.

Mais recentemente, em 2009, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), aprovou uma resolução de número 420/2009, que estabelece para todo território nacional os parâmetros para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Em linhas gerais, ele amplia a Lei Estadual 13.577/2009, do âmbito do estado de São Paulo para o Brasil.

3.4 O Mercado Brasileiro das Áreas Contaminadas

No Brasil, o mercado das áreas contaminadas funciona, basicamente, da seguinte forma: o responsável legal ou o interessado na investigação da área contrata um profissional ou empresa especializada como seu “responsável técnico”. O responsável técnico deve ser um profissional devidamente habilitado e, no mínimo, com registro no Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura (CREA). Em geral essa empresa contratada como responsável técnico é chamada de “Consultoria Ambiental”, ou simplesmente “Consultoria”. Existem consultorias de variados tamanhos e graus de capacitação: desde profissionais autônomos recém-formados ou que migraram para essa área de estudo devido à demanda de serviços, até grandes corporações, nacionais ou internacionais, com muitos profissionais altamente especializados e capacitados.

Essa consultoria tem a responsabilidade pelo projeto de gerenciamento de áreas contaminadas do responsável legal. Algumas vezes, a consultoria realiza todas as etapas

desse processo de gerenciamento: desde a investigação preliminar até a reabilitação final da área. Outras vezes, a cada etapa, o responsável legal resolve contratar uma consultoria diferente. Existem algumas consultorias especializadas em investigação preliminar, outras especializadas em remediação, mas a maior parte delas, em particular as maiores e mais conhecidas no mercado, atuam em todas as etapas.

Em geral, as consultorias contratam empresas parceiras para executar partes do seu projeto. São empresas que fazem os trabalhos de coleta de dados em campo. Os serviços mais comumente terceirizados são as sondagens, instalação de poços de monitoramento, amostragens de solo e amostragem de água subterrânea. Da mesma forma que nas consultorias, existem empresas executoras de diversos tamanhos e com diversos tipos de equipamentos e especialidades, o que fornece às consultorias uma grande variedade de soluções para a aquisição de dados em campo.

As empresas executoras são conhecidas no mercado como empresas “de sondagem”, por terem nessa atividade o seu carro-chefe. São empresas com variado grau de tecnologia e de capacitação: atuam nesse segmento desde empresas informais, sem capacitação técnica nenhuma, com baixíssima tecnologia (Trado Manual), até empresas transnacionais, com profissionais de nível superior ou especializados na área e utilizando equipamentos de ponta (Sondas, sensores, entre outros). Com isso, as consultorias podem obter um variado leque de serviços, com uma ampla gama de preços e de qualidade do produto final gerado.

Como regra geral, as consultorias que atuam no Brasil, têm como princípios básicos: obedecer às leis, normas, procedimentos e outras regras; agir como representante do seu cliente perante o órgão ambiental e/ou Ministério Público, defendendo seus interesses; realizar o serviço com o menor preço possível, pois existe uma competição grande no mercado. É comum que o objetivo principal seja ganhar a concorrência para realizar o projeto de reabilitação da área, em especial, o projeto de remediação. O cenário, na consultoria, é basicamente o seguinte: os profissionais de maior conhecimento (os Gerentes, Coordenadores e outros profissionais Sênior) ficam no escritório para interpretar as informações recebidas do campo, coletadas por profissionais “Junior”, ou recém-formados, ou de nível médio (Técnicos) ou ainda estagiários. Muitas vezes surgem profissionais especializados em uma fração do projeto, mas que sequer conhecem a área de estudo, muito menos a qualidade dos dados coletados.

O foco das consultorias na remediação pode ser comprovado pelos seguintes fatores: os melhores profissionais das consultorias normalmente estão no setor de remediação; os profissionais focam sua atualização e capacitação em cursos, seminários e eventos ligados

à remediação; as consultorias brasileiras conhecem e aplicam as mais modernas técnicas de remediação existentes no mercado internacional, mas não fazem o mesmo com as demais etapas do processo de gerenciamento de áreas contaminadas.

Esses princípios do mercado acarretam na seguinte situação: as consultorias seguem estritamente as normas dos órgãos ambientais durante as fases de investigação preliminar, confirmatória e detalhada, ao invés de fazer o melhor trabalho possível, por limitações orçamentárias, e focam seus recursos na reabilitação da área. As investigações, então, têm uma qualidade inferior (embora obedeçam às normas e leis), o que, em geral, acarreta em menor qualidade na remediação ou em gastos excessivos nessa etapa do gerenciamento. Essa falta de foco na qualidade da investigação torna possível a existência de empresas executoras sem qualificação, uma vez que essas praticam preços menores, característica importante para uma parte expressiva das consultorias, principalmente nas etapas de investigação.

Devido às características do mercado, as consultorias permanecem nesse modelo, pois todas estão interessadas em reduzir os custos de investigação para poder realizar a remediação, mesmo que essa acabe ocorrendo em um prazo maior ou com custo maior que o necessário.

3.5 Padrões e Metodologias para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas nos EUA

O estudo das áreas contaminadas já está estabelecido há mais tempo nos países do hemisfério norte, especialmente EUA, Canadá, Alemanha, Reino Unido, Holanda e Japão. Embora o governo alemão, através da Sociedade de Cooperação Técnica (GTZ, em alemão) tenha contribuído com a CETESB para a elaboração do seu “Manual para Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, a maior parte das tecnologias, aparelhos, ferramentas, metodologias, softwares, utilizados pelas consultorias, empresas de coleta de dados e agências reguladoras se baseiam no que é recomendado, exigido ou referendado pela USEPA e pelas agências estaduais nos EUA, motivado, provavelmente, pela facilidade de acesso às informações, documentos e estudos da agência estadunidense.

Os responsáveis legais e as consultorias nos EUA têm de seguir as leis e normas estabelecidas pela USEPA, pelos órgãos estaduais, pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), e ainda devem agir de modo a evitarem processos judiciais. As consultorias e as empresas executoras devem possuir certificados e licenças para

realizarem suas atividades (licenças essas específicas para cada estado), e as capacitações e treinamentos obrigatórios para todos os profissionais devem ser comprovadas com certificados de instituições habilitadas para tal. Cenário, portanto, que prioriza, em todos os aspectos, a qualidade aos serviços ligados ao gerenciamento de áreas contaminadas, tanto pela questão profissional dos envolvidos quanto pelas questões legais, uma vez que um serviço executado com má qualidade que acarrete em dano ambiental, à saúde humana ou à valoração de uma propriedade traz consequências graves ao responsável legal e ao profissional.

A USEPA possui diversos projetos onde ocorre financiamento público, por meio de fundos que arrecadam recursos provenientes de multas e outras sanções econômicas impetradas aos responsáveis por contaminações, para executar projetos de reabilitação em áreas órfãs, ou de elevado risco, ou ainda com danos muito graves que superam os valores das áreas contaminadas. O maior desses projetos é o “*Superfund*”, que prioriza as áreas de maior risco.

O foco, nesse cenário, é no custo total do projeto, englobando todas as fases, da investigação preliminar à reabilitação da área, incluindo remediação. Como o foco é no custo total, e não no custo das partes, existe uma prioridade muito forte nas etapas de investigação. Alguns estudos estimam a redução dos custos na remediação entre 5 e 10 vezes o valor investido em uma investigação de alta qualidade (QUINAM, 2012; SINGER e FIACCO, 2010). Os trabalhos, nos EUA, dão muita ênfase aos métodos modernos de investigação, e as consultorias focam seus recursos, financeiros, tecnológicos e humanos, dessa etapa do processo.

Dentro dessas premissas, existem duas abordagens nos EUA que apontam para esse foco na investigação: A “Abordagem Tríade” (*TRIAD Approach*) e a “Avaliação Expedita da Área” (*Expedite Site Assessment – ESA*). Ambas as abordagens possuem a característica principal de realizar as investigações com a maior qualidade possível e no menor tempo possível, focando os principais e melhores recursos tecnológicos e humanos nessa etapa do processo.

3.6 Abordagem Tríade e a Avaliação Expedita da Área

A “Abordagem Tríade” ou *TRIAD Approach* se baseia em três pontos fundamentais: Planejamento Sistemático, Estratégias Dinâmicas de Trabalho e Sistema de Aquisição de

Dados em Tempo Real (CRUMBLING, 2004). O termo Tríade, criado pela USEPA (USEPA, 2006), se refere a essa abordagem apoiada nesses três pontos citados.

Nessa abordagem, procura-se evitar: remobilizações de equipes de campo, decisões demoradas e baseadas em informações passadas em várias mãos, demora para se obter resultados e refazer o modelo conceitual e muitas incertezas na investigação. As empresas que trabalham com essa abordagem fazem um exaustivo planejamento antes de mobilizar as equipes de campo, conversam com todos os tomadores de decisão (*stakeholders*) envolvidos – órgãos governamentais, órgãos ambientais, prefeituras, proprietários, população, empresas terceirizadas – estudam com afincamento as informações prévias da área, mobilizam todos os recursos necessários que permitam uma investigação em alta resolução e que obtenham uma grande densidade de dados com a maior rapidez possível (isso inclui laboratório móvel, sondas, máquinas, sensores e equipamentos de última geração que realizem coleta de dados “*in situ*”), mobilizam seus principais profissionais sêniores para tomada de decisão em campo, constroem e aperfeiçoam o modelo conceitual no próprio local. Essas empresas contratam empresas executoras com o padrão de qualidade e o nível tecnológico compatível com as exigências dessa abordagem.

O website da *Triad Center* (disponível em <http://www.triadcenter.org>) contém uma série de documentos, procedimentos e protocolos para a utilização dessa abordagem, recomendada pela USEPA. O órgão ambiental estadunidense, em um de seus documentos de apresentação da abordagem (USEPA, 2006), preconiza que a evolução tecnológica dos equipamentos de aquisição de dados e das ferramentas de processamento de dados em tempo real permitiu que essa abordagem fosse criada, com o intuito de se ter uma reabilitação do site mais confiável, com grau de incerteza gerenciável, com menor custo e em um tempo sensivelmente menor.

O Documento básico para a Abordagem Tríade foi publicado por CRUMBLING (2004), e estabelece que a essência dessa abordagem é gerenciar as incertezas para tomada de decisões. A tomada de decisão envolve a recuperação do site da maneira mais eficaz possível e com menor custo total, e deve ser fundamentada no Modelo Conceitual da Área. A Abordagem Tríade é, segundo a mesma autora, uma evolução na investigação de áreas contaminadas, pois leva em conta metodologias que são o estado-da-arte e o estado-da-ciência, parte do princípio que a heterogeneidade do meio é que produz o maior nível de incertezas e que a investigação deve ser “*better, faster and cheaper*”, ou seja, melhor, mais rápida e mais barata.

Dos três elementos da Tríade, CLUMBING (2004) considera o Planejamento Sistemático como o mais importante, pois prevê a participação ativa e conjunta de tomadores de decisão de todos os setores envolvidos (órgão ambiental, poder judiciário, poder público, responsável legal responsável técnico, comunidade), para manter os objetivos da abordagem (fazer um diagnóstico melhor, mais rápido e mais barato, com poucas incertezas no modelo conceitual e com foco na eliminação dos riscos aos receptores). O gerenciamento do projeto deve ter um grau aceitável de incertezas, e participação integral e em tempo real dos tomadores de decisão com foco em estabelecer estratégias de investigação e remediação com baixo grau de incertezas (USEPA, 2006). É importante que se estabeleça, nessa etapa, a demonstração de aplicabilidade dos métodos de investigação em tempo real que serão utilizados durante o projeto.

O segundo elemento da Tríade é a utilização das estratégias dinâmicas de trabalho. Esse elemento garante que o projeto será mais rápido e, na maior parte das vezes, que será também com o menor custo (CLUMBING, 2004), pois o objetivo dessa abordagem é utilizar ferramentas e protocolos que consigam adquirir uma grande densidade de dados, mesmo que esses tenham menor precisão ou menor confiabilidade, e permitir que as estratégias sejam modificadas e adaptadas em campo, por um profissional que tome as decisões no local, ao invés de trabalhar com a abordagem tradicional, que consiste em realizar-se a coleta de dados em campo, leva-los ao escritório, adaptar o projeto, voltar ao campo remobilizando equipe e equipamentos e assim por diante, gerando demora e excesso de custos. Desta forma, a elaboração do Modelo Conceitual tem menor grau de incerteza, pois vai sendo testado, corrigido e reformado durante os trabalhos. USEPA (2006) reforça a importância dessa etapa ao sugerir que ajustes de sintonia fina sejam continuamente realizados. Para se utilizar adequadamente as estratégias dinâmicas, a USEPA (2008), recomenda que se dê especial atenção aos itens: metodologias para verificar a *performance*; uso de *softwares* e outros instrumentos colaborativos para tratamento de dados; metodologias para tomada de decisão em tempo real; uso de árvores lógicas de decisão em campo, coleta de muitas amostras em pequena escala; implementação de plano de contingência; criação de planos de trabalho coletivos.

Pode-se dizer que, na abordagem Tríade, se o Planejamento Sistemático é a estratégia, a utilização de Estratégias Dinâmicas de Trabalho é a tática, que varia conforme as condições encontradas. Em campo, as heterogeneidades e incertezas do MCS prévio vão sendo investigadas, avaliadas em escala cada vez menor, novas hipóteses vão sendo testadas, e uma grande densidade de dados é coletada.

O terceiro elemento é o uso de equipamentos que possibilitem a aquisição de dados em tempo real. Esse tipo de equipamento é que viabiliza a realização das estratégias dinâmicas de trabalho, correções do modelo conceitual em campo e tomada de decisão em tempo real, pois a aquisição, análise e interpretação de dados são rápidas e feitas no próprio local. Dentre os equipamentos de aquisição de dados em tempo real, tem-se: laboratórios móveis, ferramentas de aquisição de dados *in situ* e as ponteiras geotécnicas instrumentáveis (CLUMBING, 2004; USEPA, 2006, USEPA, 2008). Dentre esses, considera-se um dos mais importantes e mais utilizados o piezocone (CPTu), se possível, com sensor de resistividade (RCPTu) incorporado a ele (VIEKEN, 2012; QUINAM et al, 2010; SCHULMEISTER, 2008).

Uma das principais vantagens de se utilizar instrumentos de aquisição de dados em tempo real é o menor custo para obter-se uma alta quantidade de dados, uma vez que a equipe participante do projeto tem melhores condições de equilibrar o custo com necessidade de gerenciar as incertezas do Modelo Conceitual (USEPA, 2006).

A aquisição de alta densidade de dados em tempo real possibilita o desenvolvimento de um Modelo Conceitual bem acurado. Embora o custo individual por amostra coletada possa ser maior nessa abordagem, o custo final do projeto é sensivelmente menor quando se utiliza estratégias dinâmicas de trabalho e aquisição de dados em tempo real, pois o custo analítico é menor (CLUMBING, 2004) e o custo total do projeto é menor (USEPA, 2006; WOLL, 2003).

Um projeto com Abordagem Tríade tem como condições mínimas para ser definido como tal: consenso dos tomadores de decisão sobre os objetivos do projeto; qual grau de incerteza e quais limites de risco são aceitáveis; definição desses objetivos antes do início dos trabalhos de campo; um modelo conceitual prévio que antecipe as heterogeneidades do meio; estratégias para refinar o Modelo Conceitual durante o trabalho; tomada de decisão em campo; discussões e consenso sobre o gerenciamento dos dados e das incertezas no processo de aquisição desses dados.

Os custos de um projeto com Abordagem Tríade tendem a serem menores que a abordagem tradicional, segundo WOLL (2003). Nesse estudo, uma área investigada pelo método tradicional continuava apresentando muitas incertezas, gerando uma estimativa de custos de remediação da ordem de US\$ 1.9 milhões. Com um investimento de 30 mil dólares em uma investigação pela abordagem Tríade, as incertezas diminuíram, e a estimativa de custos de remediação baixaram para 100 mil dólares, uma redução da ordem

de US\$ 1.8 milhões. Observa-se, portanto, um aumento no custo da investigação, mas uma queda sensível no custo global do projeto.

A aceitação dessa abordagem pelos órgãos ambientais estaduais e agências reguladoras nos EUA vem aumentando a cada ano (USEPA, 2008), pois é do interesse de toda a sociedade que as áreas contaminadas sejam revitalizadas o mais rapidamente possível, sem que haja riscos à saúde e/ou ao meio ambiente, com os custos (sociais, ambientais e financeiros) sendo os menores possíveis e que restem poucas incertezas ao final do processo de remediação.

Entre as ferramentas utilizadas pelas empresas de consultoria que trabalham com a Abordagem Tríade estão os ensaios CPTu (WELTY, 2012; PALAIA et al, 2007; SINGER E FIACCO, 2010; YARSBEKI et al, 2007, HOOD et al, 2005, VIEKEN, 2012, QUINAM et al, 2010; EINARSON, 1998; entre outros), principalmente para se estabelecer com rapidez e alto grau de precisão e de detalhe o perfil hidroestratigráfico do site, identificando as heterogeneidades e as zonas preferenciais de fluxo e armazenamento. No Brasil, essa abordagem é conhecida, mas muito pouco utilizada (o autor não tem conhecimento de nenhum caso que utilizou a Abordagem Tríade no nosso país), embora tenha ocorrido uma apresentação das vantagens do uso da Abordagem Tríade pela unidade brasileira de uma consultoria internacional (ERM/Brasil) na versão 2010 do Seminário Internacional de Revitalização de Áreas Contaminadas do Instituto Ekos (SINGER e FIACCO, 2010), mas os aspectos econômicos do mercado, descritos no item 3.4 dificultam a disseminação do uso dessa metodologia.

A Avaliação Expedita da Área (*Expedite Site Assessment* – ESA) (USEPA, 1997) é uma metodologia que se aproxima da Abordagem Tríade especialmente no 2º pilar, que é a Estratégia Dinâmica de Trabalho. A ESA prega a presença em campo de profissionais sênior para tomada de decisão rápida a partir de dados coletados que permitam a elaboração de um Modelo Conceitual sem muitas incertezas. É uma metodologia oposta ao que é feito no Brasil, aonde quem vai ao campo coletar dados é, em geral, o profissional com a pior formação e com a menor experiência dentro do quando da Consultoria. Com a ESA, o objetivo é ter um modelo conceitual sólido, com poucas incertezas, refinado em campo, estabelecido com alta densidade de dados e de maneira rápida, com o objetivo de dar um diagnóstico preciso na área e economizar muitos recursos (especialmente tempo e dinheiro) na reabilitação da área.

3.7 Problemas nas Investigações Brasileiras

Em resumo, considera-se que, como regra geral, as investigações geoambientais de áreas contaminadas no Brasil não têm a qualidade necessária para que ocorra a reabilitação adequada dessas áreas, comparadas com os trabalhos que são realizados nos EUA (AQUINO NETO, 2009), e essa falta de qualidade na investigação é a principal causa das dificuldades na reabilitação da área (AQUINO NETO, 2009; CLEARLY, 2010).

As investigações brasileiras procuram seguir estritamente o que é exigido pela legislação, e se baseiam em estabelecer o modelo conceitual através de amostragens de solo (Amostragem por Cravação Contínua – *Direct Push* – somente quando é obrigatório, ou no próprio instrumento de sondagem para instalação de poços de monitoramento), sondagem e posterior instalação de poços de monitoramento com seção filtrante longa e amostragem de água subterrânea. Mesmo quando todos esses métodos são adequadamente realizados, essa estratégia de elaboração do modelo conceitual é, quase sempre, pobre, pouco representativa e com muitas incertezas associadas. QUINAM (2012), WELTY (2012), St GERMAIN (2012), St GERMAIN et al (2012), KILLEMBECK (2012), SINGER e FIACCO (2010), NEGRÃO (2012), AQUINO NETO (2009), entre outros, apontam que investigar uma área somente com amostragem de solo e instalando poços de monitoramento é ineficiente, demorado e ultrapassado. No Brasil, como essa estratégia é permitida pela legislação, essa é a única forma de se investigar uma área contaminada ou potencialmente contaminada.

Muitas investigações no Brasil utilizam, além da metodologia ineficiente, ferramentas ineficientes para essa metodologia. Por exemplo, ao invés de realizar sondagens com “Trados Ocos Helicoidais” – *Hollow Stem Auger*, que ao mesmo tempo realizam a perfuração e revestem a sondagem concomitante com amostragem de solo por cravação contínua, utilizam um equipamento totalmente ultrapassado conhecido como Trado Manual, que consiste em três trabalhadores girando uma espécie de “caneca”, ou Trado, utilizando somente a força manual desses trabalhadores como energia para sua rotação. Quando é preciso revestir o furo de sondagem, eles utilizam um revestimento, o que torna o trabalho ainda mais desgastante e demorado. Alguns relatos informais apontam uma produtividade dez vezes menor no Trado Manual com a aplicação de Revestimento comparado aos Trados Ocos Helicoidais com sonda hidráulica, especialmente em solos saturados. Outros relatos informais indicam que aproximadamente 80% das sondagens para investigação de áreas contaminadas no Brasil sejam feitas com Trado Manual.

Outra característica que torna as investigações brasileiras imperfeitas é a instalação de poços de monitoramento. Além de ser um método ineficiente e caro na maior parte das vezes (QUINAM, 2012; WELTY, 2012, St GERMAIN, 2012) ele, no Brasil, apresenta muitos problemas como: falta de modelo conceitual hidrogeológico prévio, seção filtrante do poço muito longa, camada de pré-filtro abaixo da seção filtrante, falta de desenvolvimento preliminar e limitações do método de amostragem de solo por cravação contínua (RIYIS e RIYIS, 2011).

3.7.1 Falta de Modelo Conceitual Hidrogeológico Prévio

Difícilmente há um estudo prévio da área onde se pretende instalar os poços de monitoramento, como prevê a norma brasileira 15.495-1 (ABNT, 2007). A desobediência a essa parte da norma, ou seja, a falta desse estudo prévio (sondagens de reconhecimento, ensaios de SPT, ensaios CPT, geofísica, instalação de piezômetros, amostragem de solo por cravação contínua, entre outras técnicas que poderiam ser utilizadas), normalmente acarreta em instalação de poços mal posicionados espacialmente, principalmente no posicionamento e comprimento da seção filtrante (AQUINO NETO, 2009; RIYIS e RIYIS, 2011). O poço, mesmo adequadamente construído, não permite a coleta de amostra representativa de água subterrânea nesses casos, uma vez que a seção filtrante está mal dimensionada.

3.7.2 Seção Filtrante do Poço de Monitoramento Muito Longa

Nas poucas vezes em que ocorre esse estudo (em geral porque já se instalou outros poços na área), existe a tendência a se instalar um poço com seção filtrante muito longa, com três argumentos: variação do nível d'água (NA) devido à sazonalidade, necessidade de se verificar a presença de fase livre aquosa menos densa que a água (LNAPL na sigla em inglês) e “obrigatoriedade devido às normas e procedimentos”. Nenhum dos três argumentos se sustenta, mas o senso comum do mercado continua a instalar poços dessa forma. Quanto à variação do NA, a própria CETESB já se manifestou pela necessidade de se instalar poços diferentes para o período de seca e para o período de cheia (CETESB, 2007), o que é muito claro do ponto de vista técnico, mas foi necessário o órgão ambiental obrigar para que se tornasse prática, ainda que incomum, nas investigações.

Quanto à necessidade de se avaliar a presença de LNAPL, a CETESB obriga a isso somente no seu procedimento para investigação confirmatória em Postos de combustíveis (AQUINO NETO, 2009) embora muitos estudos apontem para a ineficiência dessa medida

(AHLERS, 2012; SAINT GERMAN, 2012; HAWTHORN & KIRKMAN, 2011). A CETESB somente obriga a instalação de poços com seção filtrante longa e não afogados (ABNT, 2007; CETESB, 2006; HAWTHORN, 2011) para investigação confirmatória em Postos e quando se está buscando verificar a presença de LNAPL. Esses poços não são indicados para a verificação da concentração dos CQI em fase dissolvida, apenas para verificar se existe ou não LNAPL. Já existem disponíveis sensores que apontam a presença de LNAPL exatamente onde ele está, diferente do poço de monitoramento, que mostra um LNAPL aparente (BERTOLO, 2007). Esses sensores são conhecidos genericamente por LIFs (Laser-induced Fluorescence) (BUJEWSKI e RUTHERFORD, 2007; USEPA, 1995; St GERMAIN, 2008; MARTIN e St GERMAIN, 2008; St GERMAIN et al, 2012), e já existe pelo menos duas empresas no Brasil que possuem esse sensor.

O terceiro argumento (“obrigatoriedade”) não existe. Na norma ABNT 15.495-1 não recomenda em nenhum momento a utilização de poços com seção filtrante longa, pelo contrário, desencoraja o seu uso. Nos procedimentos da CETESB, a única referência ao comprimento da seção filtrante está no documento SASC (CETESB, 2006) e somente para a determinação da presença de LNAPL em postos de combustíveis na investigação confirmatória, não em todo e qualquer poço de monitoramento que seja instalado.

A principal limitação da instalação do poço de monitoramento com a seção filtrante longa é que ele atravessa muitas camadas litológicas diferentes e as informações que podem ser obtidas desse poço (condutividade hidráulica do aquífero ou concentração de CQI) não são representativas, pois são uma média ponderada das informações de todas as camadas atravessadas, não de um ponto específico de interesse (NIELSEN, 2006; AQUINO NETO, 2009).

3.7.3 Camada de Pré-Filtro Abaixo da Seção Filtrante

Em muitas ocasiões a Consultoria pede para a empresa executora avançar a sondagem até uma determinada profundidade, mas, ao perceber que passou da camada de interesse, solicita que a empresa executora adicione pré-filtro (areia lavada e selecionada, com granulometria conhecida e adequada ao tubo-filtro e à formação geológica – ABNT, 2007) ao fundo da sondagem, até a profundidade de interesse e aí se coloca os tubos-filtro e os tubos-revestimento do poço de monitoramento. Posteriormente, em seu relatório, o profissional de campo omite essa informação e o profissional que vai elaborar o projeto, o modelo conceitual e o relatório o fazem com base em uma informação equivocada. Esse pré-filtro é um elemento de alta condutividade hidráulica, então, as camadas que o poço de

monitoramento está mensurando não é somente aquela onde está posicionada a seção filtrante, mas sim, todas as camadas em contato com o pré-filtro, mais a seção filtrante (NIELSEN, 2006). Essa é mais uma incerteza decorrente do método de investigação que utiliza somente o poço de monitoramento como ferramenta para elaboração do modelo conceitual, e mais uma incerteza decorrente do uso de metodologias equivocadas para instalar esse poço de monitoramento.

3.7.4 Falta de desenvolvimento preliminar:

Sem essa operação, descrita na norma brasileira (ABNT, 2007), não se estabelece uma conexão hidráulica entre o pré-filtro e a formação geológica (NIELSEN, 2006). Deve ser realizada antes do selamento do espaço anular e após a introdução do pré-filtro nesse espaço anular. Consiste em realizar movimentos lentos e repetidos de subida e descida com um instrumento (pistão) para forçar um movimento de entrada e saída de água no poço, fazendo com que o pré-filtro se acomode e uma conexão hidráulica dele com a formação seja estabelecida. Se, no momento da realização desse desenvolvimento preliminar, não houver recarga suficiente no poço, pode-se adicionar água de fonte conhecida para fazer essa operação, fundamental para a qualidade do poço de monitoramento. Desconhecido da maioria das consultorias e, em geral, ignorado pelas empresas executoras, raramente um poço de monitoramento é instalado seguindo essa etapa fundamental descrita na norma NBR 15.495-1.

3.7.5 Limitações do Método de Amostragem de Solo por Cravação Contínua

Para se elaborar os perfis geológicos, litológicos, estratigráficos, as seções e outros dados fundamentais para a elaboração do modelo conceitual, a estratégia mais moderna utilizada no Brasil é a Amostragem de Solo por Cravação Contínua (conhecida no meio técnico pelo nome em inglês “*Direct Push*”) com o uso de amostradores tubulares de polietileno denominados “*liner*” (CETESB, 2006; AQUINO NETO, 2009; AQUINO NETO, 2007; USEPA 2009; AMS, 2012; GEOPROBE, 2012; NIELSEN, 2006).

É reconhecidamente a melhor metodologia para se obter amostras de solo representativas para análises químicas, especialmente para compostos voláteis e é um recurso muito bom para se coletar amostras de solo para descrição litológica a fim de se estabelecer o perfil geológico e estratigráfico da área. Porém, para essa função, a Amostragem de Solo por Cravação Contínua possui algumas limitações quando o solo é

muito friável e quando se pretende amostrar em solo saturado com expressiva coluna de água.

Na primeira situação, ao se coletar a amostra, o furo, em geral feito sem revestimento, tende a colapsar, e a amostra do ponto seguinte não é representativa. Para diminuir esse problema, existem algumas ferramentas (que só podem ser utilizadas com equipamento mecanizado) que revestem o furo (“Amostrador de Tubo Duplo” ou *Dual Tube* (AMS, 2012)) ou que coletam somente a amostra do ponto em que se pretende (“Amostrador de Pistão” ou “*Piston Sampler*” (AMS, 2012), também chamado de “Amostrador Fechado”).

O Amostrador de Tubo Duplo não é fabricado no Brasil, e o Amostrador de Pistão tem a desvantagem de não permitir uma amostragem contínua muito fácil.

Na segunda situação, de solos saturados, o amostrador é cravado no chão e, quando é sacado, a amostra não é recuperada, devido a ação da água. Existem ferramentas que ajudam nessa recuperação, como molas-cesto ou “*core catchers*” (GEOPROBE, 2012), mas têm eficiência questionável. A técnica de cravação contínua, embora seja a mais indicada para amostragem de solos em subsuperfície para análises químicas e para a descrição litológica, tem muitas limitações.

Em resumo, os principais problemas nas investigações geoambientais brasileiras são:

- escolha da abordagem errada para efetuar o diagnóstico da área e elaborar o modelo conceitual da área (ao invés da Abordagem Tríade, Avaliação Expedida da Área, ou mesmo da investigação de alta resolução, o uso exclusivo de amostragem de solo por cravação contínua / instalação de poços de monitoramento).

- dentro da abordagem escolhida, a preferência a metodologias menos eficientes (ao invés de sondagem mecanizada, tanto para realizar a cravação contínua quanto Trados Ocos para instalação de poços de monitoramento, como regra, se utilizam Trado Manual + Revestimento + Bomba Balde + Tripé para tudo: amostragem de solo e instalação de poços de monitoramento).

- dentro da metodologia menos eficiente, ocorrem alguns erros conceituais, especialmente na instalação de poços de monitoramento. Em geral, nas instalações brasileiras, utiliza-se qualquer pré-filtro e qualquer abertura de ranhuras do tubo-filtro independente da granulometria da formação, instala-se poços com seção filtrante longa,

sem modelo conceitual prévio, sem desenvolvimento preliminar ou sequer desenvolvimento final adequado.

Esses problemas decorrem, basicamente, de dois motivos: falta de conhecimento de parte dos profissionais da área e opção pelo custo (aparente) menor.

A falta de conhecimento pode ser verificada pela quantidade de seminários, congressos e outros eventos ligados à remediação de áreas contaminadas em relação aos que tratam dos métodos modernos de investigação. Um exemplo disso é o Seminário Internacional de Remediação e Revitalização de Áreas Contaminadas, que em 2012 promoveu sua oitava edição em 10 anos. Não há um evento similar com foco na investigação.

As poucas empresas executoras que trabalham com equipamentos para investigação de alta resolução não possuem relatos de muitos projetos em que o uso desses equipamentos foi solicitado, especialmente pelo desconhecimento de seus clientes (as Consultorias) sobre a existência e/ou sobre a utilidade desses métodos.

O desconhecimento dos tomadores de decisão, seja dos responsáveis legais (para exigir as abordagens, metodologias e execuções corretas de suas consultorias), seja dos órgãos ambientais (certamente o panorama iria mudar se houvesse a obrigatoriedade), seja das Consultorias, é um dos motivos principais para a manutenção das investigações nacionais com os padrões que estão (AQUINO NETO, 2009). Uma ressalva nesse ponto: muitos tomadores de decisão nos três níveis citados conhecem bem essas ferramentas e inclusive publicam trabalhos a respeito (AQUINO NETO, 2007; AQUINO NETO, 2009; SINGER e FIACCO, 2010), mas são exceções, decorrentes de iniciativas individuais, não de um estudo sistematizado.

A dificuldade relacionada ao custo é real. Uma vez que o responsável legal pretende investir o menos possível nessa questão (que é considerada um custo, um passivo), em geral ele faz uma espécie de concorrência ou licitação de fragmentos do projeto, e as Consultorias, para poderem vencer essa concorrência, utilizam o mínimo de recursos possível para realizar exclusivamente aquele fragmento de estudo. Muitas vezes esse fragmento se baseia exclusivamente em um parecer técnico do órgão ambiental, e a licitação ocorre item a item estritamente da exigência legal. Sem dúvida uma investigação utilizando a abordagem correta terá mais custos do que a investigação “normal”, porém o custo final do projeto provavelmente seria menor (de acordo com QUINAM (2012), para cada 1 dólar investido na investigação, são economizados 10 dólares na remediação da

área). No entanto, esse fator não importa nem para o responsável legal, nem para a consultoria, uma vez que ambos estão focados naquele fragmento específico. Da mesma forma, o custo aparente de metodologias inadequadas é, em geral, menor para determinadas partes do processo, porém, o retrabalho, a falta de qualidade, as incertezas na coleta de dados vão gerar um custo maior em um prazo médio. A questão do custo, então, pode ser entendida como uma falha na abordagem da montagem dos escopos das investigações e na falta de mensuração dos custos reais do projeto global do que propriamente o custo em si.

Um dos efeitos das diferenças de abordagens investigativas pode ser visto nas Figuras 8 e 9. Nelas, é possível verificar a diferença de casos totais detectados e, especialmente, a porcentagem de casos encerrados, com a área reabilitada adequadamente. Na figura 8, que mostra o panorama das áreas contaminadas referentes a Postos de Combustíveis no Estado de São Paulo, somando-se as áreas reabilitadas (6%) com as que estão em monitoramento para reabilitação (20%), tem-se 26%. Nos EUA (Figura 9), 71% das áreas contaminadas que são Postos de Combustíveis já são considerados casos encerrados.

Percebe-se que há um longo caminho a percorrer no Brasil.



Figura 8 – Distribuição dos Postos de Combustível contaminados em SP pelo status de encerramento (GLOEDEN et al, 2011)

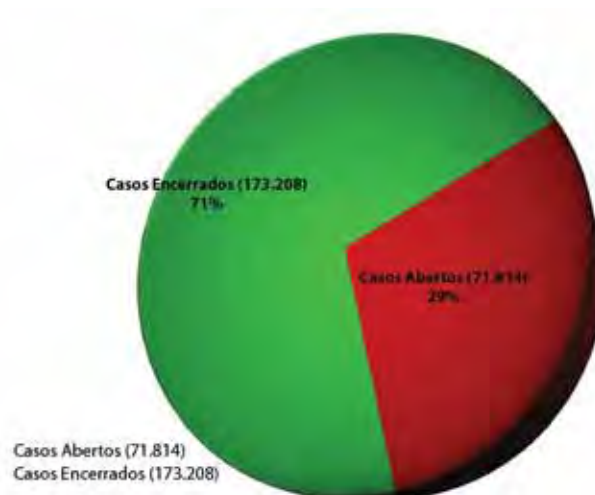


Figura 9 – Distribuição dos Postos de Combustível contaminadas nos EUA pelo status de encerramento (NEGRÃO, 2012)

3.8 Investigação de Alta Resolução

A abordagem correta para o gerenciamento de áreas contaminadas é fazer um diagnóstico muito bem feito, gerar uma grande densidade de dados (mesmo que esses dados tenham menor precisão e acurácia), evitar ao máximo o retrabalho, realizar a tomada de decisões rapidamente, reduzir ao máximo as incertezas e, principalmente, elaborar um modelo conceitual sólido (WELTY, 2012; AQUINO NETO, 2009; CLEARLY, 2010).

A melhor abordagem para isso é a “Abordagem Tríade”, descrita no item 3.6. Essa abordagem requer um planejamento muito bem feito antes de mobilizar as equipes de campo para coleta de dados, inclusive com a participação do órgão ambiental, responsável legal, outros órgãos governamentais, populações afetadas, entre outros tomadores de decisão (CRUMBLING, 2004).

Além disso, é essencial ter disponíveis equipamentos de coleta de dados em tempo real, laboratório móvel, e priorizar as tomadas de decisão em campo e a presença dos profissionais sênior durante a coleta de dados. Tipicamente, os equipamentos utilizados nessa abordagem são: CPTu, LIF, *Membrane Interface Probe* (MIP), amostragem de água por cravação contínua (*Direct Push*), coleta de amostras de solo por cravação contínua com equipamento mecanizado, instalação de piezômetros, poços temporários ou pré-montados, ensaios hidrogeológicos para determinação da condutividade hidráulica em perfil (*pneumatic slug test* (PST), CPTu, *Hydraulic Pressure Test* (HPT), Ensaio de Dissipação

de excesso de poro pressão com piezocone – QUINAM et al, 2010), Cromatógrafo de campo, laboratório móvel para amostragem de vapores, entre outros.

Esses equipamentos permitem, em um curto espaço de tempo, obter muitos dados representativos em uma escala espacial muito pequena (QUINAM et al, 2010), porém, com uma acurácia e uma precisão baixa, mas, nessa etapa do estudo pela Abordagem Tríade, essa precisão é secundária, o objetivo é, realmente, obter muitos dados em escalas muito pequenas.

Os dados são coletados, o modelo conceitual é estabelecido, calibrado, comprovado e refinado em campo por uma equipe multidisciplinar de profissionais sênior, e estabelece-se a rede de monitoramento necessária para se coletar as amostras de solo e água subterrânea que serão enviadas a laboratórios acreditados para a última etapa do diagnóstico da área, para confirmar e corroborar o modelo conceitual que foi elaborado (USEPA, 2007; CRUMBLING, 2004).

Ao contrário do que se imagina no Brasil, essa abordagem não prescinde de análises químicas, nem de poços de monitoramento, mas sim, essas são algumas ferramentas, não a única para se realizar um diagnóstico ambiental da área. Nos EUA, existem empresas especializadas em investigação geoambiental (“*site assesment*”) pela Abordagem Tríade, porém, no Brasil, isso ainda é uma novidade.

Outra opção de abordagem, mais simples na questão do planejamento e envolvimento de tomadores de decisão, mas igualmente focada no diagnóstico preciso da área, a Avaliação Expedita da Área é também uma abordagem que prioriza a tomada de decisão em campo, a presença de profissionais sênior na coleta de dados e a alta densidade na coleta de dados para elaboração de um modelo conceitual sólido e com poucas incertezas. Os equipamentos típicos de aquisição de dados são os mesmos da Abordagem Tríade (AQUINO NETO, 2007)

Dentro dos parâmetros e abordagens nacionais de investigação geoambiental de áreas contaminadas, é indicado e recomendado que se estabeleça um modelo conceitual sólido da área e com suas incertezas gerenciadas (CETESB, 2006). Os procedimentos e normas da CETESB estabelecem o mínimo necessário para se estabelecer um diagnóstico aceitável da área, porém, para se obter um diagnóstico adequado, com modelo conceitual definido com poucas incertezas, recomenda-se efetuar uma investigação em alta resolução, com abordagem semelhante à Tríade ou à Avaliação Expedita da Área.

Com os equipamentos atualmente disponíveis comercialmente no Brasil, é possível elaborar-se um diagnóstico de alta resolução, com custo não muito elevado, que traria

grandes benefícios na elaboração dos estudos e uma grande economia na etapa de reabilitação da área. A abordagem básica sugerida seria, após uma investigação preliminar que contemplasse a mobilização das ferramentas adequadas a essa abordagem de alta resolução e um método de “*varredura*” (AQUINO NETO, 2007) adequado (Geofísica, Soil Gas Survey, XRF, entre outros): entendimento das heterogeneidades, elaboração de um perfil de condutividade hidráulica relativa, avaliação da presença de CQI e avaliação dos dados em campo por profissional sênior.

- Entendimento das heterogeneidades: significa reduzir ao máximo as incertezas sobre a geologia local (QUINAM et al, 2010; KILINBECK, 2012; WELTY, 2012). As ferramentas que poderiam ser utilizadas nessa etapa são: Sondagens de Simples Reconhecimento ou tipo SPT; sondagens com amostragem de solo por cravação contínua, preferencialmente com Amostrador de Tubo Duplo; Ensaios CPT, CPTu ou RCPTu. Com a combinação dessas, é possível se estabelecer um modelo conceitual do site sólido, do ponto de vista geológico e hidroestratigráfico (QUINAM, 2012; WELTY, 2012; QUINAM et al, 2010; VIENKEN et al, 2012; LEE et al, 2008).

- Elaboração do perfil de condutividade hidráulica (QUINAM, 2012; WELTY, 2012; QUINAM et al, 2010, AQUINO NETO, 2007, KILINBECK, 2012, VIENKEN et al, 2012): significa entender as diferenças de condutividade hidráulica entre as camadas determinadas na fase anterior. Estabelecer os mapas potenciométricos dos diversos aquíferos presentes na área. Identificar as zonas preferenciais de fluxo e armazenamento (WELTY, 2012). As ferramentas que poderiam ser utilizadas nessa etapa são: poços temporários, piezômetros, ensaios hidrogeológicos, CPT, CPTu, ensaios de dissipação de excesso de poro-pressão, PST, HPT (QUINAM et al, 2010). No momento, não se tem conhecimento sobre a disponibilidade, no Brasil, dessas duas últimas ferramentas.

- Avaliar qualitativamente, em campo, a presença de CQI em 3D (tanto em fase vapor, quanto retida ou dissolvida): Para essa etapa, poderiam ser utilizadas: sensores de subsuperfície, como MIP ou LIF, ou coleta de amostras rápidas (via amostragem por cravação contínua ou de poços temporários) e análise em laboratório de campo ou com kits de campo.

- Após avaliação desses dados, em campo, por um profissional sênior da consultoria, utilizando ferramentas compartilhadas (modelo físico ou computadorizado), é possível estabelecer um modelo conceitual sólido e com baixa incerteza, para que se projete a rede de monitoramento para coleta de amostras “oficial”, ou com as melhores técnicas disponíveis para se obter amostras representativas. Nessa etapa, devem ser instalados os

poços de monitoramento de acordo com a norma NBR 15.495-1, coletadas as amostras de solo e água subterrânea (essa, pela norma NBR 15.487) e enviadas a um laboratório acreditado pela norma ISO 17025, realizar os ensaios hidrogeológicos nos poços devidamente instalados. Ao final dessa etapa, há um diagnóstico oficial da área, dentro de todas as leis, normas e procedimentos e com uma quantidade e qualidade de dados suficientes para estabelecer um modelo conceitual adequado e indicar a melhor forma de reabilitação da área.

3.9 CPT, CPTu e RCPTu como ferramenta de investigação de áreas contaminadas e elaboração do Modelo Conceitual da Área

Ensaio de cone elétrico (CPT), piezocone (CPTu) ou piezocone de resistividade (RCPTu) têm sido utilizados com frequência no exterior como ferramenta de aquisição de dados em tempo real para elaboração do Modelo Conceitual Hidrogeológico da Área e investigação de alta resolução de áreas contaminadas, totalmente compatível com a Abordagem Tríade e com a Avaliação Expedida da Área, ambas metodologias utilizadas e recomendadas pela USEPA.

SHIN III (2004) cita uma grande quantidade de investigações realizadas com CPT pelos órgãos *U.S. Department of Energy* (DOE) e *Department of Defense* (DOD) como alternativa mais rápida, precisa e barata para obtenção das características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas das áreas investigadas, especialmente quando comparada com métodos convencionais de coleta de amostras (sondagens rotativas com trados ocos helicoidais e amostragem de solo por cravação contínua).

Shields (2004) utilizou o ábaco de ROBERTSON et al (1986) para comparar os resultados de ensaios de CPTu com amostras de solo e encontrou boa correlação, também indicando a utilidade desse ensaio para a determinação do perfil estratigráfico.

Um estudo da USEPA (2000) realizou ensaios CPT ao lado de Sondagens com coleta de amostras de solo e análise em laboratório. Esse estudo indicou boa correlação entre os dois métodos, indicando que resultados dos ensaios CPT fornecem a mesma qualidade da informação, porém com maior quantidade de dados (ao fornecer dados a cada 2 cm) em um tempo menor que as sondagens tradicionais, com coleta de amostras de solo.

Outro estudo da USEPA (2007) mostrou a utilidade do uso do CPT como ferramenta de aquisição de dados em tempo real de um projeto Tríade. Nesse estudo, o posicionamento da seção filtrante da rede de poços de monitoramento foi definido em

campo após os ensaios de CPT. No referido estudo, a equipe de campo utilizou como referência o ábaco de Robertson et al (1986), como pode ser visto na Figura 10.

Observa-se, na referida figura, que os autores identificaram nos resultados dos ensaios CPT, as camadas de fluxo preferencial e posicionaram as seções filtrantes dos poços de monitoramento temporários e permanentes, que foram posteriormente instalados, nessas camadas, além de posicionarem as seções do poço multinível nas camadas identificadas como areia (*sand* – letra “S”), diferenciando essas camadas das argilas (*clay* – letra “C”), relacionadas com aquitardes, de baixa condutividade hidráulica.

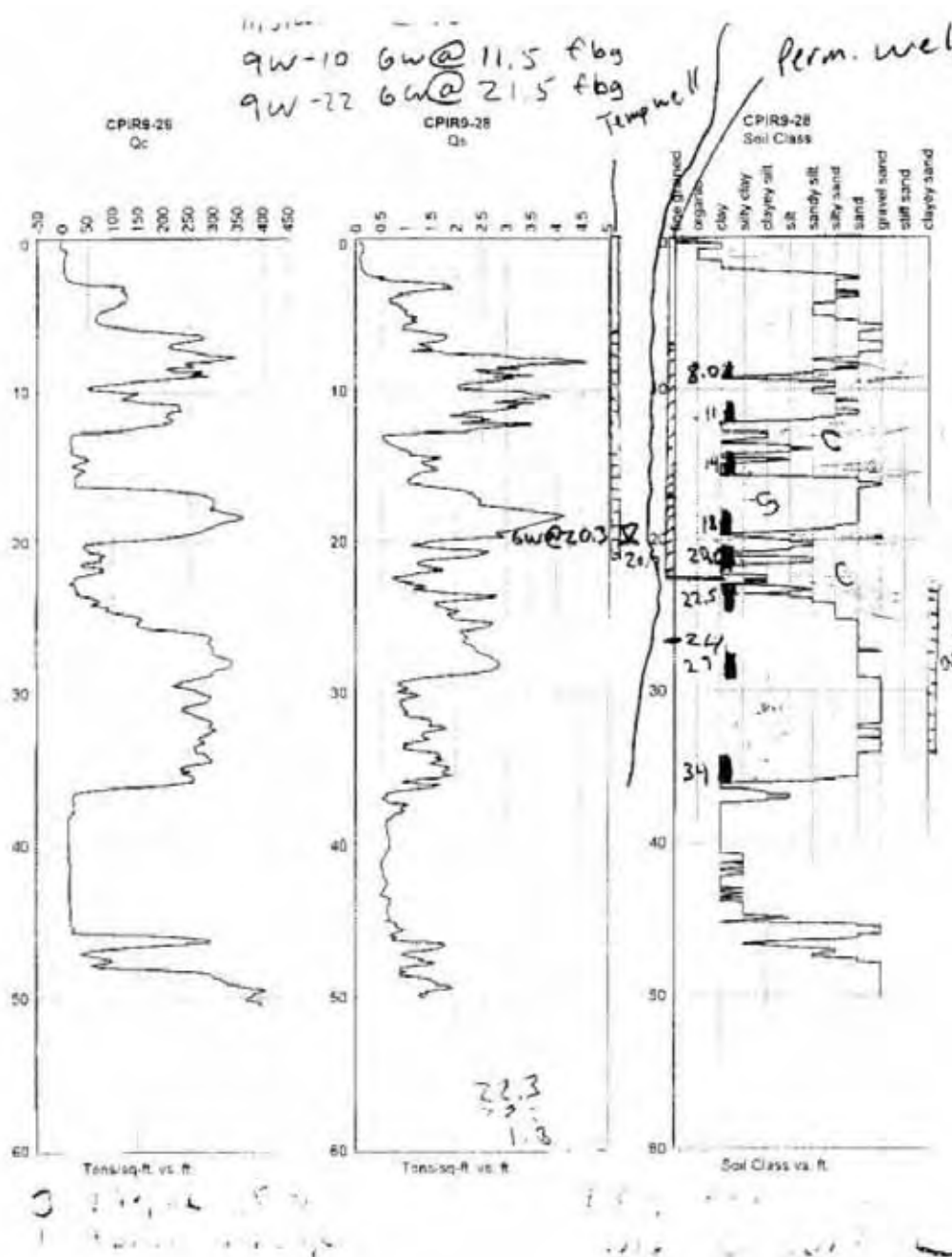


Figura 10 – Planilha de campo com resultados do ensaio de CPT e posicionamento da seção filtrante dos poços de monitoramento (USEPA, 2007)

Outro estudo importante que ressalta as vantagens da utilização do CPTu como ferramenta importante para aquisição de dados para elaboração do Modelo Conceitual da Área, especialmente para se investigar em alta definição a geologia e hidrogeologia da área é o de LEE (2007). A contribuição desse estudo está em verificar que os ensaios CPTu vão além da descrição estratigráfica em escala pequena (que, por si só, já seria uma ferramenta poderosa para a investigação de áreas contaminadas), mas possibilitam uma aproximação interessante dos resultados de condutividade hidráulica nas medidas de poro-pressão. Os autores encontraram uma boa correlação entre os resultados dos ensaios com as medidas de permeabilidade obtida por permeômetros em diferentes profundidades. Da mesma forma que USEPA (2000) e CRISTY et al (1994) conseguiram mostrar que os ensaios CPT são uma boa aproximação das amostras de solo, LEE et al (2008) faz o mesmo, ao concluir que as medidas de poro-pressão são uma boa aproximação da condutividade hidráulica, igualmente com a vantagem de obter uma quantidade de dados muito maior (1 medida a cada 2 cm).

Quinam et al (2010) e Vienken et al (2012) comparam diversas técnicas para elaborar um mapa de condutividade hidráulica com a finalidade de detectar as heterogeneidades hidrogeológicas e verificaram que tanto os ensaios CPTu quanto os ensaios de dissipação de poro pressão são ferramentas úteis para esse fim.

Os ensaios RCPTU já provaram que são uma ferramenta muito útil para a investigação geoambiental, em particular para interpretar a estratigrafia (DANIEL et al, 1999; GIACHETI et al, 2000, PEIXOTO et al, 2010; GIACHETI et al, 2004).

Esse ensaio tem sido utilizado nos EUA como uma ferramenta importante para a determinação do perfil hidroestratigráfico do site, com uma precisão muito boa em uma escala muito pequena. A ferramenta mais utilizada para esse ensaio, nos EUA é o sensor de Resistividade ou Condutividade Elétrica (EC), comercializado pela companhia estadunidense Geoprobe. Seus idealizadores publicaram alguns estudos já nos anos 90 (CRISTY et al, 1994; McCALL, 1996; SCHULMEISTER et al, 2003) que exemplificam as vantagens do uso dessa ferramenta e da correlação da condutividade elétrica do solo com seu teor de argilo-minerais.

Um trabalho importante e pioneiro que emprega o sensor de EC para elaboração de Modelo Conceitual Hidrogeológico da área é o de SCHULMEISTER et al (2003), que detalha as vantagens do uso dessa ferramenta para obter dados da hidroestratigrafia da área, com um alto grau de detalhamento. Isso significa que, além do perfil estratigráfico, o

sensor EC pode fornecer informações importantíssimas sobre os aquíferos e as zonas preferenciais de fluxo.

Os autores consideram como o ganho mais importante desse sensor de condutividade elétrica a possibilidade de se estabelecer o perfil com um grau de precisão muito grande e obter informações fundamentais de pontos onde seria muito difícil obtê-las (SCHULMEISTER et al, 2003).

Schulmeister et al (2003) concluem dizendo que o sensor EC é uma ferramenta poderosa para investigação em alta resolução, especialmente para se obter o perfil hidroestratigráfico e, com ele, estabelecer as zonas preferencias de fluxo, transporte e armazenamento de contaminantes, ou seja, é um instrumento que está totalmente de acordo com a abordagem Tríade e que serve muito bem para o estabelecimento de um Modelo Conceitual Hidrogeológico da área com baixo grau de incerteza. Comparando-se com os métodos tradicionais de se obter o perfil hidroestratigráfico da área, o sensor de EC (portanto, o ensaio RCPTu) é mais eficiente, rápido, barato, de maior resolução e que obtém maior densidade de dados, sem prejuízo da qualidade desses dados.

As aplicações do EC, de acordo com Cristy et al (1994) e Schulmeister et al (2003) são, basicamente: determinação das condições litológicas específicas do site, reduzindo a necessidade de coleta de amostras de solo; construção de seções geológicas precisas; definição dos aquíferos e aquitardes; indicar o posicionamento correto (em 3 dimensões) dos poços de monitoramento.

Outro estudo aponta para o sucesso em realizar uma investigação geoambiental de áreas contaminadas utilizando ferramentas “inovadoras” (EINARSON et al, 1999). Nesse estudo, os autores comparam oito ferramentas, sendo cinco para determinação do perfil estratigráfico: Geofísica de superfície; dois métodos diferentes de coleta de amostras pelo método de Cravação Contínua tipo “amostrador de pistão”, o sensor EC da Geoprobe, e o CPT com resistividade (RCPTu, porém, sem a medida de poro-pressão). Além desses, os autores utilizaram três métodos diferentes de delimitação da pluma em fase dissolvida, ou seja, que tinham como objetivo principal estudar a água subterrânea. Concluiu-se que a variável mais importante para o encaminhamento da pluma do CQI estudado (Metil-Tec-Butil Eter, ou MTBE, um aditivo para gasolina utilizado nos EUA) era a variação da geologia, portanto, as ferramentas que fornecem essa informação com a precisão necessária foram as mais importantes. Dessas, a que se mostrou mais eficiente, rápida e com melhor relação custo-benefício foi o CPT com resistividade, ou seja, o RCPTu.

Na segunda década do século XXI, o mesmo fabricante desenvolveu outras ferramentas para a coleta de dados em campo, e todas são complementadas pelo sensor de EC, que mostra os parâmetros geológicos em perfil com grau de detalhamento necessário para utilizar as demais ferramentas na sua plenitude.

Uma dessas ferramentas é o *Hydraulic Pressure Test* (HPT – ainda sem tradução para o português). McCALL (2011) e BINDER (2007) tratam desse importante instrumento para identificar as zonas de fluxo e de armazenamento dos aquíferos e sempre relacionam seus resultados aos obtidos nos ensaios de EC.

O EC, portanto, é uma ferramenta que foi desenvolvida por um fabricante nos EUA na década de 90 e vem sendo largamente utilizado como um dos equipamentos para se obter informações em tempo real do perfil hidroestratigráfico. Muitas empresas de coleta de dados ambientais possuem essa ferramenta nos EUA, e muitas consultorias contratam esse serviço, em particular as que trabalham com a Abordagem Tríade.

Destaca-se que o sistema EC é exatamente o mesmo sensor de resistividade que é acoplado ao equipamento de CPTu para se realizar o ensaio RCPTu. Desta forma, percebe-se que o ensaio RCPTu já vem sendo utilizado com bastante sucesso nos EUA para a finalidade que se propõe, ou seja, fornecer, em detalhe, em escala muito pequena, o perfil geológico, estratigráfico e, em condições favoráveis, o perfil hidroestratigráfico do local. O RCPTu ainda tem a vantagem adicional de fornecer as medidas de resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e poro-pressão (u), enriquecendo ainda mais os dados obtidos em um mesmo ensaio.

Cristy et al (1994) apontaram uma correlação excelente entre amostras do solo e os resultados dos ensaios CPT com a inclusão de um sensor de condutividade elétrica, porém, esse sensor era cravado com percussão, não com cravação hidráulica, como são os modernos equipamentos de ensaios RCPTu. Os autores recomendam o uso sensor de condutividade elétrica do solo como ferramenta para elaboração do perfil estratigráfico de alta precisão.

3.10 Ensaio CPTu para Investigação Geotécnica

O cone e o piezocone são ensaios de penetração quasi-estática in situ, que permitem identificar o perfil estratigráfico do terreno e avaliar preliminarmente os parâmetros geotécnicos dos solos (GIACHETI, 2001; GIACHETI et al, 2011; FAGUNDES et al, 2010, VEIGA, 2012). O procedimento de ensaio está padronizado pela ASTM D3441,

tanto para o ensaio com medida de poro-pressões (CPTu), como para o ensaio sem essa medida (CPT). No Brasil, o ensaio é padronizado pela ABNT, MB 3406 (GIACHETI, 2001). Segundo Veiga (2012), os resultados dos ensaios podem ser avaliados no campo e em tempo real, pois ficam imediatamente disponíveis a partir de um computador acoplado ao sistema de aquisição de dados. A grande quantidade de dados de alta qualidade gravados durante a execução do ensaio permite o posterior processamento e um melhor conhecimento das condições do subsolo, definindo as camadas, os tipos e parâmetros geotécnicos do solo. Fornece também informações para a avaliação de sistemas de fundação. O CPT/CPTU pode ser utilizado em solos desde argilas muito moles até areias densas, não sendo adequado para cascalhos ou terreno rochoso (VEIGA, 2012).

O primeiro cone elétrico foi introduzido em 1948 e melhorado posteriormente por De Ruiter (1971, apud GIACHETI, 2001). Desde então, diversos modelos foram desenvolvidos.

Um cone de 10 cm^2 de área na ponta, com uma ponta de 60° é o normalmente aceito como padrão e foi recomendado pelas normas européia e americana (GIACHETI, 2001). A luva de atrito localizada acima da ponta cônica tem uma área padronizada de 150 cm^2 . A luva de atrito nos cones elétricos tem o mesmo diâmetro da ponta cônica e das hastes, isto é, $35,7 \text{ mm}$ (GIACHETI, 2001).

Segundo Fagundes et al (2010), no ensaio CPT, uma ponteira em forma cônica é conectada à extremidade de um conjunto de hastes. Crava-se essa ponteira no solo a uma velocidade padronizada e constante igual a 2 cm/s . O cone tem um vértice de 60° e uma área de ponta igual a 10 cm^2 , ou seja, um diâmetro típico de $35,7 \text{ mm}$. O diâmetro das hastes é igual ou menor do que o diâmetro do cone. Durante o ensaio, a resistência à penetração da ponta do cone é medida constantemente. Também é medida a resistência à penetração de uma luva de atrito que é alojada logo atrás do cone.

A diferença de um ensaio CPT para um ensaio CPTu é que, nesse último, são medidas as pressões neutras, ou poro pressão (u). A introdução da medida de poro pressão no cone elétrico permitiu ampliar a aplicação desse tipo de sondagem (FAGUNDES et al, 2011; VEIGA, 2012). A medição da poro pressão assume particular importância em solos de granulometria fina na presença de água. O conhecimento das pressões neutras é especialmente importante na determinação de alguns parâmetros de engenharia (VEIGA, 2012).

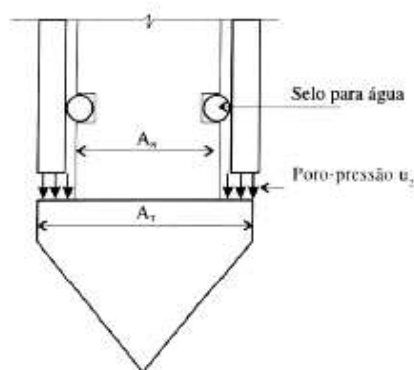
Entretanto, para realizar medidas de poro pressão é necessário um cuidado especial no projeto e na utilização do penetrômetro, principalmente quanto à escolha da posição do

elemento poroso e quanto à sua saturação (GIACHETI, 2001). O projeto mecânico do cone precisa garantir que, enquanto a ponta estiver sendo solicitada, nenhuma carga seja transferida para o transdutor de poro-pressão.

Os penetrômetros elétricos possuem células de carga que registram a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s). Os valores da poro-pressão (u) são determinados através de um transdutor de pressão, o qual pode estar localizado na ponta do cone (u_1), atrás da ponta (u_2) ou atrás da luva de atrito (u_3) (FAGUNDES et al, 2011).

Devido ao efeito das áreas desiguais (figura 11), deve-se corrigir a resistência de ponta medida no ensaio (q_c), obtendo assim a resistência real mobilizada (q_t), dada pela equação 1.

$$q_t = q_c (1 - a) + u_2 \quad (1)$$



$$a = \frac{A_N}{A_T} \approx \frac{(A_T - A_L)}{A_T}$$

Figura 11 – Correção do efeito de áreas desiguais (IDE, 2009)

O sistema de reação utilizado para penetração do cone consiste basicamente de um equipamento hidráulico de cravação, com capacidade usualmente variando entre 100 e 200 kN, uma vez que 200 kN é a máxima carga que pode ser aplicada nas hastes rotineiramente utilizadas, que possuem 35,7 mm de diâmetro (GIACHETI, 2001).

As hastes são compostas por barras cilíndricas ocas 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 redutor 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 (GIACHETI, 2001).

As diferenças entre o procedimento de ensaio CPT e CPTu são referentes à preparação do piezo-elemento, a qual usualmente consiste das seguintes operações (GIACHETI, 2001):

- Deaeração do filtro poroso ou do filtro com cavidade;
- Deaeração do cone, especialmente da câmara de pressão imediatamente adjacente ao transdutor de pressão;
- Montar cone e filtro;
- Proteger o sistema durante o transporte.

A prática para saturação do elemento poroso consiste em submergi-lo em água fervida e em seguida, ao vácuo. Outra opção que pode ser utilizada é submergir o elemento poroso em glicerina aquecida dentro de um recipiente com ultra-som e vácuo. Depois de vibrá-lo por algumas horas, a glicerina aumenta sua temperatura, o que reduz sua viscosidade e melhora a saturação. O elemento poroso é, então, colocado num pequeno recipiente cheio de glicerina, e está pronto para ser transportado para o campo (GIACHETI, 2001). Os vazios do cone devem ser deaerados por lavagem utilizando-se uma seringa e uma agulha hipodérmica. O processo de saturação deve ser repetido em cada nova sondagem.

Quando uma sondagem com o piezocone é realizada em solos que geram elevadas poro-pressões negativas, como os siltes, ou quando se atravessa uma espessa camada de solo não saturado, é difícil manter a saturação do piezocone. Em algumas situações, para garantir a saturação do elemento poroso, é necessária a abertura de um pré-furo, especialmente em solos argilosos com elevada sucção (GIACHETI, 2001). Alguns autores, como por exemplo, Larsson (1995, apud GIACHETI, 2001), tem recomendado o uso de um filtro de cavidade, preenchida com material de alta viscosidade, muitas vezes graxa automotiva. Nesse caso, a ponta é desparafusada, o bico do tubo de graxa é inserido diretamente nela e pressionado até preencher todas as cavidades da ponta. O piezocone é, então, virado de cabeça para baixo e a cavidade próxima do transdutor de poro-pressão é preenchida com água deaerada. Nesse momento, a ponta é parafusada, fazendo com que a graxa espirre para fora. Dessa maneira, o cone pode ser facilmente manuseado, sem necessidade de recursos adicionais para manter a saturação, uma vez que, pela alta viscosidade da graxa, tanto ela como a água de dentro da cavidade próxima do transdutor, estão impedidas de escapar.

Além disso, verificou-se as vantagens adicionais do emprego do filtro com cavidade em regiões com argila dura e matacões, onde a abrasão do elemento poroso é muito grande (GIACHETI, 2001). Em regiões onde o nível d'água é profundo, esse recurso é muito interessante e as vantagens e limitações do mesmo devem ser melhor investigadas (GIACHETI, 2001).

A medida de poro-pressão durante uma sondagem CPTu, depende da posição do piezo-elemento (Tavenas et al,1982 e Campanella et al,1982, apud GIACHETI, 2001). Em argilas moles, normalmente adensadas e em siltes, a poro-pressão medida na face do cone é geralmente 10 a 20% maior do que aquela medida imediatamente atrás da ponta. Em argila e siltes normalmente adensados e em areias finas, a poro pressão gerada na face do cone (u_1) tende a ser elevada e positiva, enquanto a poro-pressão medida imediatamente atrás da ponta pode ser muito baixa e, às vezes, negativa. Portanto, para corrigir a resistência de ponta (q_t), a poro-pressão deve ser medida atrás da ponta (u_2) (GIACHETI, 2001).

Um piezo-elemento, em uma única posição, não fornece todas as informações necessárias para uma interpretação adequada de poro-pressões. Padroniza-se a posição da medida de poro pressão na posição u_2 principalmente porque esta é a posição apropriada para realizar a correção da resistência de ponta, devido ao efeito de áreas desiguais (GIACHETI, 2001).

3.11 Piezocone de Resistividade para Investigação Geotécnica

O piezocone de resistividade (RCPTu) possui um dispositivo para medida contínua da resistividade que é instalado atrás de um piezocone padrão (PEIXOTO et al, 2010). Esse recurso permite medir continuamente a resistência a um fluxo de corrente elétrica aplicada ao solo (GIACHETI et al, 2011). A partir da resistência que o solo oferece à passagem dessa corrente, tem-se a resistividade do solo.

O uso do RCPTu nas investigações geotécnicas teve início em 1977, com o objetivo de avaliar a densidade do solo em campo e a porosidade de areias e siltes (DE GRAFF E ZUIDBERG, 1985, apud DE MIO, 2005)

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 (GIACHETI, 2001).

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. 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. (GIACHETI, 2001).

O módulo de resistividade é composto por um arranjo de quatro eletrodos. Tais condutores são feitos de latão, isolados por um material polimérico e selados por anéis de vedação. Os eletrodos tem 5 mm de largura e estão espaçados de 15 mm e 150 mm, de centro a centro. O menor espaçamento (15mm) é utilizado para detectar finas camadas com contraste do módulo de resistividade, 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 (GIACHETI, 2001)

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 fonte de corrente constante é controlada da superfície. Como o pico de corrente aplicada é muito pequeno, em geral da ordem de 150 μA , o potencial medido através dos eletrodos deve ser amplificado dentro do furo, para que o valor caia dentro do nível de medida do equipamento (GIACHETI, 2001).

Os preparativos envolvidos no ensaio RCPTu são similares àqueles de qualquer outro ensaio CPT, com a adição da 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 (GIACHETI, 2001, FAGUNDES et al, 2010).

Como a condutividade (C) é o inverso da resistividade (R), pode-se converter uma grandeza na outra de acordo com a Equação 2 (PEIXOTO et al, 2010):

$$C [\mu\text{s/cm}] = 10.000/R [\text{Ohm-m}] \quad (2)$$

De Mio (2005) ressalta que os ensaios RCPTu podem medir contrastes de resistividade da ordem de 1%, enquanto a geofísica de superfície (outro instrumento para medir a resistividade/condutividade elétrica do solo) pode medir contrastes da ordem de 5-10%. Assim, o ensaio RCPTu é mais preciso e fornece maior densidade de dados, especialmente quando os sensores CPTu funcionam simultaneamente ao sensor de resistividade.

3.12 Estudos Prévios na Área de Estudo (Investigação Preliminar)

O local estudado encontra-se na cidade de Bauru, no centro-oeste do estado de São Paulo, em uma região de processo geodinâmico predominante erosivo, pois nela encontram-se solos arenosos resultantes das Formações do Grupo Bauru e Sedimentos Cenozóicos, bastante susceptíveis a fenômenos erosivos provocados pela inadequada ocupação do meio físico (IDE, 2009).

Corghi e Giacheti (2005) descrevem o local, que se encontra na Bacia do Córrego da Água Comprida, entre os loteamentos residenciais, Jardim Colonial, Chácara Odete e Tavano. A área compreendida por esses condomínios margeia o fundo de vale do córrego da Água Comprida.

O município de Bauru está localizado no centro do Estado de São Paulo. O relevo regional é formado em sua maioria (65%) por colinas amplas e suaves, com solos residuais em arenitos das Formações Marília, Adamantina, do Grupo Bauru, e Cenozóicas, com textura de areia fina pouco argilosa (IDE, 2009). Duas bacias hidrográficas dividem o município, sendo os principais rios o Batalha e o Bauru.

Segundo Ferreira *et al.* (1993, apud IDE, 2009), os sedimentos do grupo Bauru ocupam no estado de São Paulo quase todo o Planalto Ocidental onde predominantemente se assentam sobre os basaltos da Formação Serra Geral. Sugere que a seqüência estratigráfica é a que subdivide o grupo nas Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina, Marília e Itaqueri. Dentre essas, as presentes na cidade são: Adamantina e Marília. Segundo IPT (1981, apud IDE, 2009), a Formação Adamantina (Grupo Bauru) ocorre por vasta extensão do oeste do estado de São Paulo, constituindo os terrenos da maior parte do Planalto Ocidental, só deixando de aparecer nas porções mais rebaixadas dos vales dos principais rios, onde já foi removida pela erosão.

A textura do solo pode ser arenosa ou argilosa, dependendo do material de origem, com as cores vermelho e marrom variando de claro a escuro. A ação do intemperismo, aliada às condições climáticas tropicais, causou o processo de laterização (IDE, 2009).

O processo erosivo estudado por IDE (2009) (Figura 12) localiza-se ao longo do Córrego da Água Comprida, afluente do Rio Bauru, em uma região cercada por loteamentos residenciais.



Figura 12 – Local de Estudo e trecho erodido (IDE, 2009)

A área margeia o fundo de vale do córrego da Água Comprida, região Sudeste da cidade, entre as rodovias SP-255 e SP-300. A origem da erosão do Jardim Colonial remete ao carregamento de seu sistema de dissipação de águas pluviais devido ao mau dimensionamento e à falta de manutenção. O processo erosivo aumentou devido à falta de rigor técnico ao se lidar com reparos de danos ambientais, enquanto proprietários e secretarias públicas ausentavam-se da responsabilidade sobre o ocorrido (IDE, 2009). Por fim, a erosão cresceu vertiginosamente desde que se vem acompanhando o processo, que data do segundo semestre de 2003 (Figura 13).

A erosão na área verde foi licenciada para servir de bolsão de entulho (Figura 14), como medida emergencial no segundo semestre de 2003 e o depósito de sedimentos era procurado pela maioria dos caçambeiros, devido à boa localização da área. Porém, como a preocupação era a de se estabilizar o crescimento da erosão, o interesse era de que o material tivesse sido corretamente depositado e compactado no fundo da erosão, o que não foi rigorosamente seguido (IDE, 2009).



Figura 13 – Ramificação da erosão em 2003 (IDE, 2009)



Figura 14 – Área como bolsão de entulho (IDE, 2009)

Esses locais de deposição de resíduos de construção civil e resíduos sólidos urbanos (lixo residencial orgânico), aliados às quebras de tubulações de esgoto, degradaram a área erodida e podem ter criado maiores problemas ambientais e sanitários IDE (2009).

A evolução da erosão se deu através da falta de estrutura dos sistemas de drenagem e do mau dimensionamento das mesmas, associados às chuvas de grande intensidade, características do local. Com a evolução do processo, sistemas de dissipação de energia foram atingidos e destruídos, colaborando com o avanço e aumentando a erosão na ramificação do processo principal (IDE, 2009)

Tal ramificação, devido suas grandes dimensões, foi aterrada principalmente com entulho de construção e coberta com uma camada de solo. Uma vez que o local não foi revegetado após o aterro, o solo da superfície foi removido por erosão laminar. Apesar disso, atualmente, encontra-se no local a presença de grama e mato, que contribuem com a resistência superficial do solo, fato que foi igualmente constatado por IDE (2009). As Figuras 15 e 16 mostram o histórico da evolução do processo erosivo no local estudado.



Figura 15 – Início do aterramento em 2004 (CORGHI e GIACHETI 2005)



Figura 16 – Ramificação aterrada e coberta com camada de solo em 2005 (CORGHI e GIACHETI 2005)

A ausência de sistemas de dissipação de energia ao final das tubulações de água associado ao período de concentração de chuvas durante o verão colaborou com a evolução do processo erosivo e assoreamento ao longo do córrego. Medidas paliativas foram utilizadas no controle do processo erosivo principal, porém não suportaram a ação da água da chuva, como pode ser observado na Figura 17 (IDE, 2009).



Figura 17 – Gabião destruído pela ação da água em 2003 (CORGHI e GIACHETI 2005)

Um dos fatores responsáveis foi o fato das medidas corretivas não levarem em conta as feições do terreno, fato esse verificado pela execução de aterros somente para “tampar” as ramificações existentes e, ao longo do córrego, foram feitos taludes laterais de pequena inclinação até o nível do terreno, a fim de garantir a estabilidade. Além disso, observa-se que na maioria dos locais afetados não houve preocupação com a influência da água subterrânea, levando a ocorrência de novos escorregamentos (IDE, 2009).

Como o seu avanço colocava em risco o limite do Residencial Tavano, o local foi aterrado com solo de outras localidades seguindo o nível do terreno imposto pelas construções locais (IDE, 2009). Dessa forma, o afloramento de água foi controlado e o que se observa atualmente é a presença de grama com pequenas áreas erodidas em forma de sulcos.

3.12.1 Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT)

Ide (2009) executou sondagens de simples reconhecimento com medida de SPT conforme ABNT NBR 6484/01. Através dessas, obteve o perfil longitudinal e transversal às bordas do processo.

Na Figura 18, IDE (2009) apresenta o perfil transversal, onde é possível observar a variabilidade do solo que ocorre no local, com alternância de camadas mais arenosas e mais argilosas, conforme identificação tátil e visual do mestre sondador que realiza a sondagem SPT. Tem-se também nessa figura a posição do nível d'água, entre 2,5 e 3,5 m de profundidade.

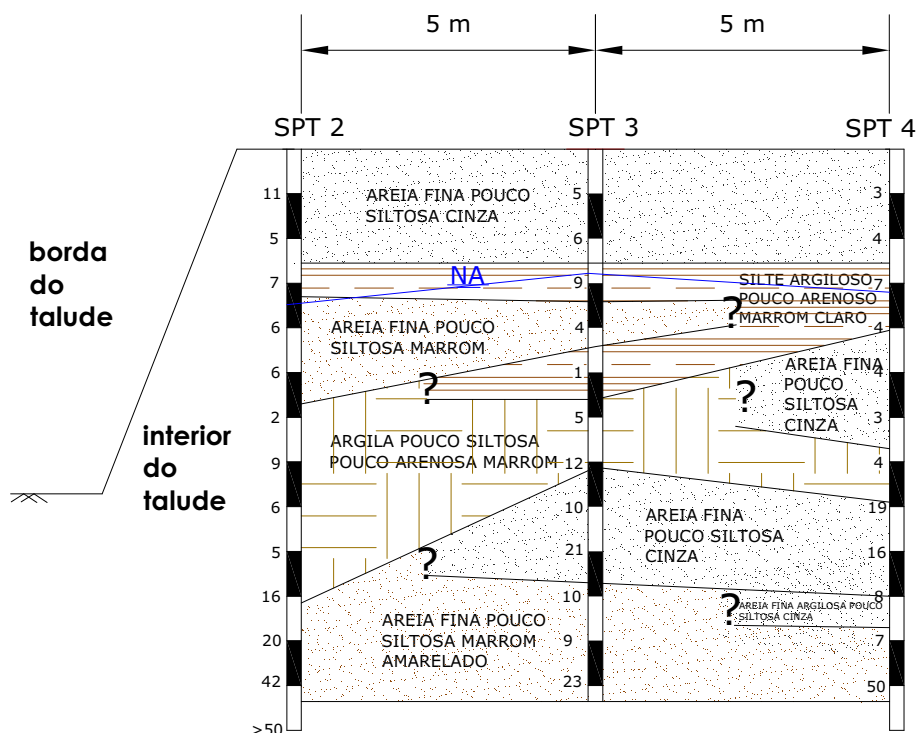


Figura 18 – Perfil geotécnico transversal à erosão (IDE, 2009)

A interpretação de resultados de ensaios de granulometria conjunta com as amostras de solo coletadas nos ensaios SPT realizados por IDE (2009) possibilitou constatar que a variação da porcentagem de argila é claramente notada à medida que se afasta da borda do talude. É possível analisar que, na borda do talude (SPT 2), a quantidade de argila é muito menor que a 5m (SPT 3) e 10m (SPT 4) de distância da borda do talude, mostrando a influência do fluxo de água em direção à sua face. Quanto mais distante do talude, maior é a porcentagem de argila, pois o fluxo de água tende primeiramente a carrear os finos mais próximos à sua borda (IDE, 2009). O inverso ocorre com a porcentagem de areia, que é maior nas bordas do talude e diminui quanto mais se distancia da borda. A localização das sondagens SPT está na Figura 19, e o perfil longitudinal está na Figura 20.

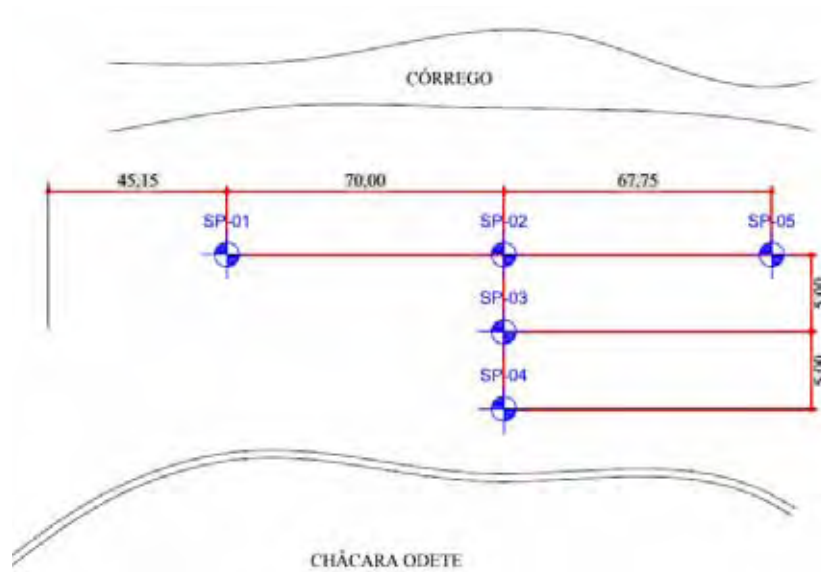


Figura 19 – Localização dos ensaios SPT (IDE, 2009)

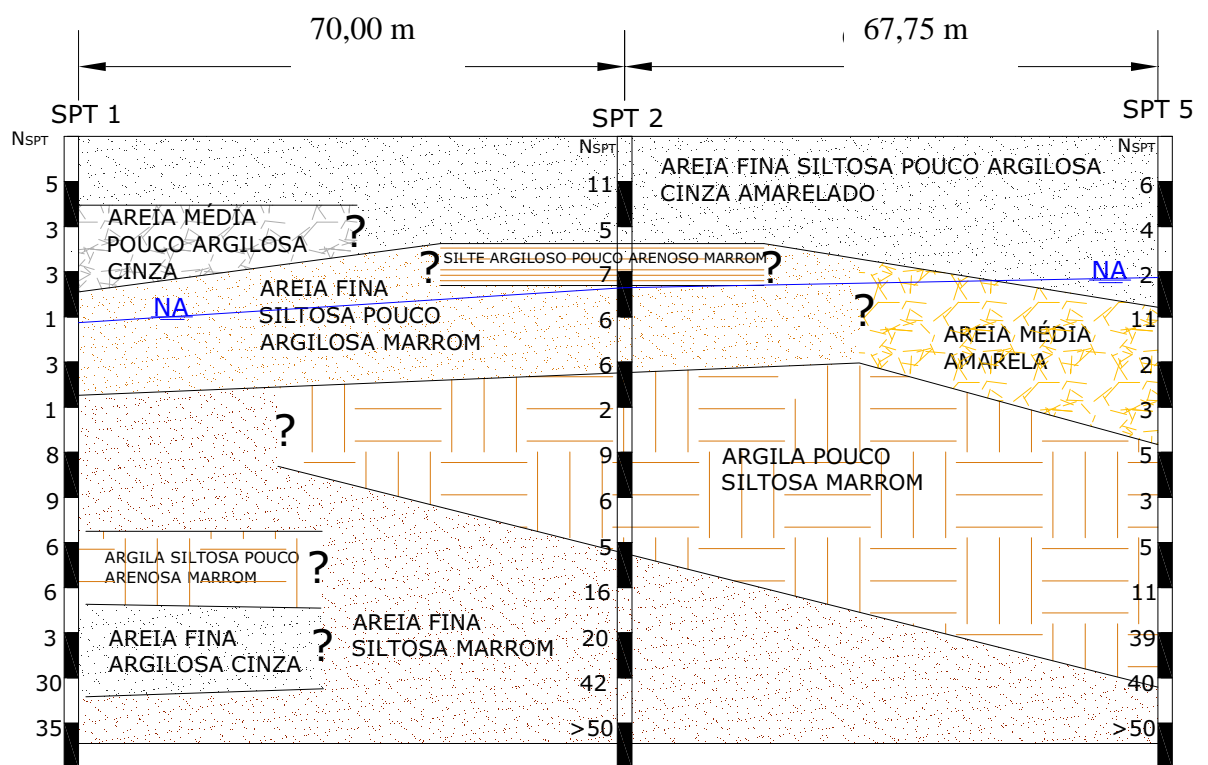


Figura 20 – Perfil geotécnico longitudinal da erosão (IDE, 2009)

3.12.2 Ensaio de Penetração do Piezocone (CPTU)

Por meio dos resultados dos ensaios de piezocone descritos no item 3.10, IDE (2009) pôde determinar a estratigrafia de perfis do solo.

Por meio da relação entre a resistência de ponta q_t e do atrito lateral, f_s , calcula-se a razão de atrito (Equação 3), parâmetro esse utilizado para a identificação e classificação de solos a partir do emprego de cartas de classificação.

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \quad (3)$$

IDE (2009) diz que a experiência tem demonstrado que a resistência de ponta (q_t) é tipicamente alta em areias e baixa em argilas, enquanto o atrito lateral (f_s) é baixo em areias e alto em argilas.

A interpretação dos ensaios de CPT, CPTU ou RCPTU são, em geral, realizadas empregando o ábaco de classificação de Robertson et al. (1986) (IDE, 2009; DE MIO, 2005). Ide (2009) realizou sete ensaios CPTU na área e estão posicionados de acordo com a Figura 21. Na Figura 22, pode-se observar os ensaios de campo sendo realizados



Figura 21 – Localização das sondagens SPTs e dos ensaios CPTUs (IDE, 2009)

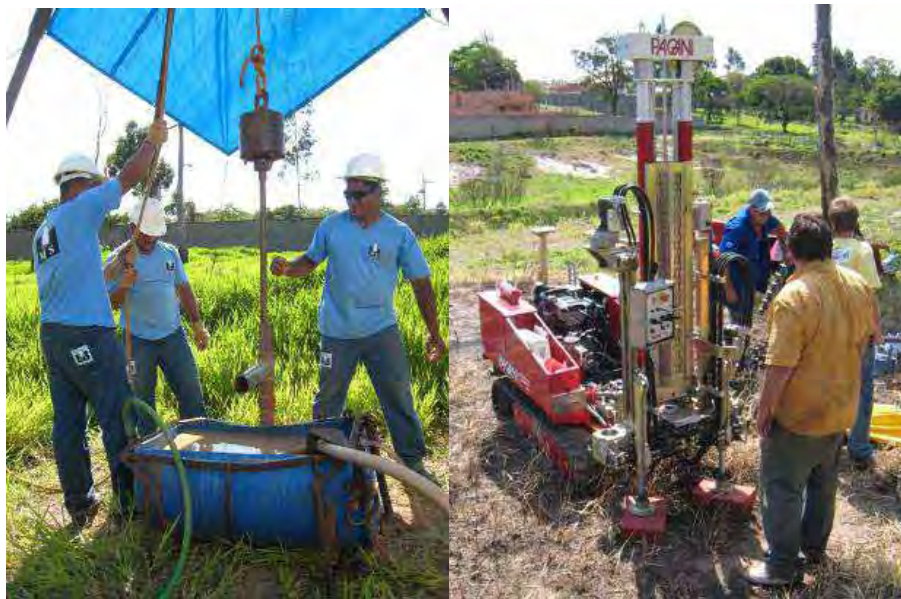


Figura 22 – Ensaio de campo: SPT (esq) e CPTU (dir) (IDE, 2009)

3.12.3 *Piezocone de Resistividade (RCPTU)*

FAGUNDES et al (2011) executou quatro ensaios de penetração de piezocone de resistividade próximo ao processo erosivo visando identificar com mais detalhes o perfil do subsolo e avaliar se existem alterações do perfil de resistividade ao longo da profundidade. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 23, contendo: razão de atrito R_f (%), resistência de ponta corrigida q_t (MPa), poro pressão u (kPa), resistividade R (ohm.m), condutividade C ($\mu\text{S}/\text{cm}$), N_{sbt} (tipo de comportamento de solo) e representação do perfil estratigráfico identificado segundo o ábaco de classificação de Robertson et al. (1986).

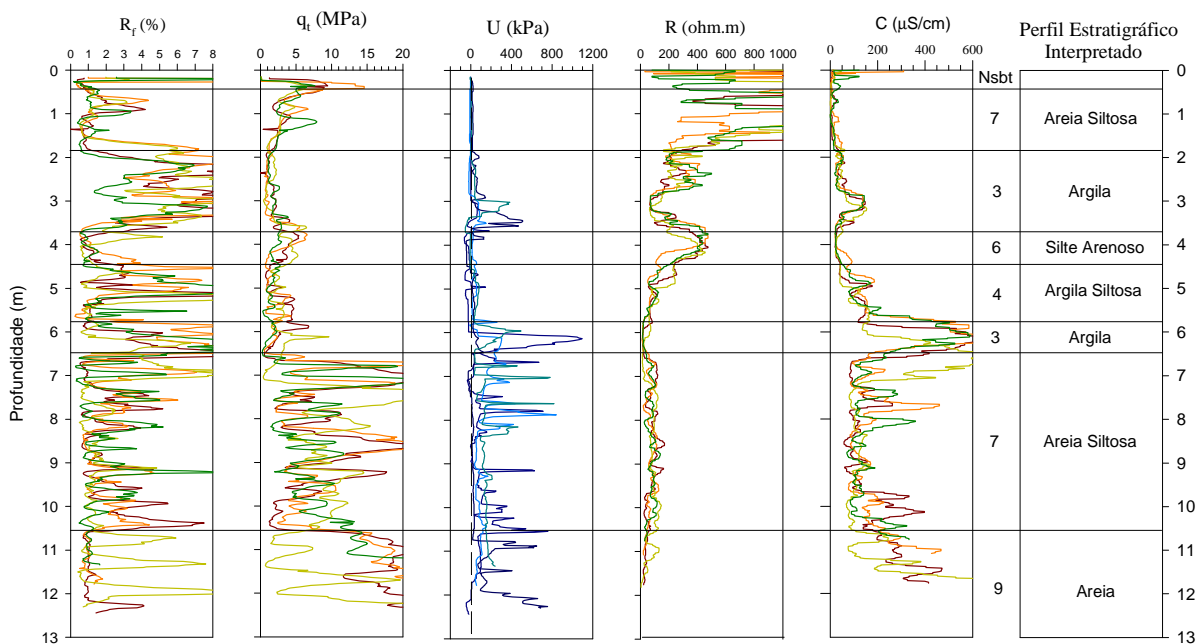


Figura 23: Resultados dos ensaios RCPTU e interpretação do perfil estratigráfico (Fagundes et al, 2011)

De acordo com os resultados obtidos por FAGUNDES et al (2011), os perfis interpretados de acordo com o ábaco de Robertson et al (1986) tem uma boa correlação com o perfil de condutividade elétrica. Picos altos de condutividade elétrica estão relacionados a solos mais argilosos, indicando que o módulo de resistividade, que mede a condutividade elétrica do solo, é efetivo nessa área, para auxiliar na interpretação do perfil estratigráfico e, conseqüentemente, elaborar um modelo conceitual adequado.

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Materiais

4.1.1 *Amostragem de Solo por Cravação Contínua (“Direct Push”)*

Essa metodologia consiste na cravação no solo, por meio de um equipamento de percussão, de uma ferramenta tubular de aço denominada “amostrador”, que mede cerca de 1,40 m de comprimento por 55 mm de diâmetro externo e 46 mm de diâmetro interno. Esse amostrador contém, em seu interior, um instrumento de material plástico (PEAD ou PVC) transparente denominado “*liner*” (sem tradução para o português). Esse *liner* é onde ficam recuperadas as amostras de solo após a cravação e retirada da composição. Os *liners* têm 1,20 m de comprimento e diâmetro externo de 44 mm.

Crava-se a composição com algum equipamento de percussão (no presente estudo, esse equipamento era um marteleto hidráulico marca Atlas Copco, modelo SB-50 acoplado à Sonda Hidráulica sobre Caminhão ECD-SMA-01), e essa composição é formada, além do amostrador, de hastes prolongadoras e adaptadores em diversos pontos (do marteleto para a haste, da haste para o amostrador). Após a cravação, a composição é retirada, o *liner* é retirado do amostrador, a ponta inferior do *liner* é identificada com uma tampa plástica de PEAD vermelha, e a composição é remontada e recolocada no furo, com uma haste a mais, para se efetuar a cravação a uma profundidade 1,0 m maior.

As partes que formam a composição podem ser visualizadas nas Figuras 24, 25 e 26.

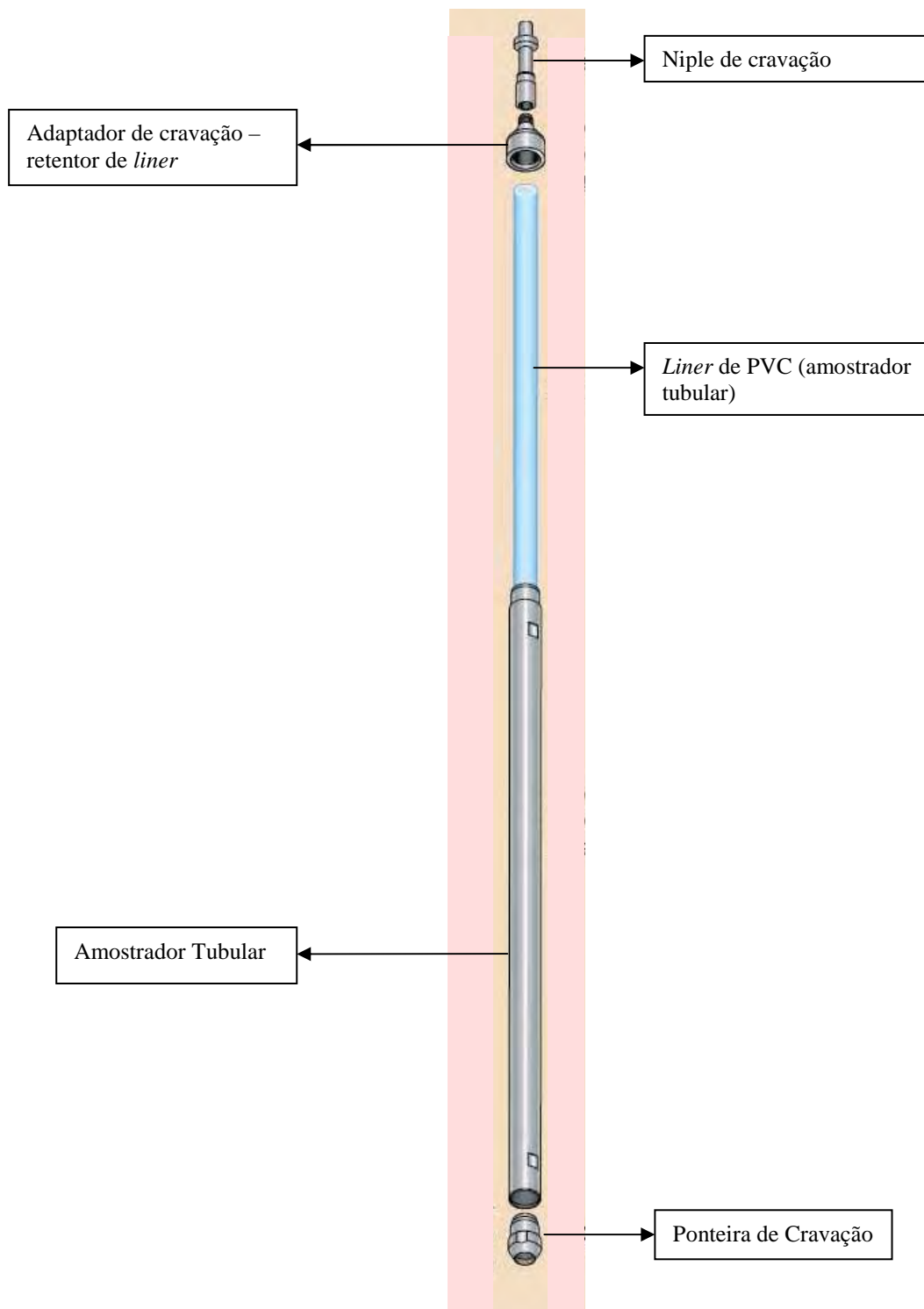


Figura 24 – Componentes do equipamento de amostragem Direct Push da AMS-Samplers (adaptado de AMS, 2012)



Figura 25 – Cravação da composição com equipamento mecanizado, acoplado à sonda hidráulica ECD-SMA-01



Figura 26 – Retirada do *liner* de dentro do amostrador e identificação

4.1.2 **Sondagem com Sonda Hidráulica Sobre Caminhão**

Nos casos em que o furo de sondagem desmorona (colapsa), se faz necessário revestir o furo. Nesses casos, efetua-se a amostragem de solo concomitante com a sondagem com Trado Oco Helicoidal (*Hollow Stem Auger*), utilizando uma sonda hidráulica com torque suficiente para realizar essa metodologia de sondagem. No presente

trabalho, a sonda utilizada é a ECD-SMA-01, da ECD Sondagens Ambientais, com torque máximo de 5000 N.m montada sobre um caminhão VW modelo 9.150 (Figura 27).

A mesma sonda foi utilizada para realizar sondagens revestidas para instalação adequada de poços de monitoramento



Figura 27 – Sonda ECD-SMA-01 montada sobre caminhão

4.1.3 **Sonda Hidráulica Sobre Trator**

As sondagens rotativas com Trado Oco Helicoidal podem também ser realizadas com sonda hidráulica montada sobre um Trator (Figura 28). Essa sonda realiza, além desse, outros tipos de atividades ligadas à aquisição de dados para investigação ambiental de áreas contaminadas, como a sondagem com Trado Sólido.

Esse equipamento possui torque máximo de 3000 N.m, 120 KN de força de cravação e 160 KN de força de retirada de hastes.

A ferramenta Trado Sólido (Figura 29), devido à sua geometria, possui menor momento de inércia que os Trados Ocos, portanto, com um mesmo torque máximo, as hastes são mais facilmente rotacionadas, conferindo maior produtividade à sondagem. Em resumo, em relação aos trados ocos, a sondagem com trado sólido é mais rápida, eficiente, e permite atingir profundidades maiores, mesmo em solos mais compactos, porém, ela não permite que o furo de sondagem seja revestido, portanto, não é indicado para solos muito arenosos e/ou muito saturados. Os trados sólidos utilizados no presente trabalho têm 150 mm de diâmetro.



Figura 28 – Sonda Hidráulica montada sobre Trator com Trados Sólidos



Figura 29 –Trados Sólidos utilizados na sondagem

A mesma sonda realizou a cravação das hastas e sensores para os ensaios RCPTu, conforme pode ser observado na Figura 30



Figura 30 –Preparação da Sonda sobre trator para ensaios RCPTu

4.1.4 ***Materiais para Instalação e Desenvolvimento de Poços de Monitoramento***

Os poços de monitoramento foram instalados de acordo com a NBR 15.495-1 e desenvolvidos de acordo com a NBR 15.495-2. Os materiais utilizados foram:

- Tubo-filtro e Tubo-revestimento com 50 mm de diâmetro nominal e acoplamentos tipo “rosca quadrada” padrão ASTM F480 (ASTM, 2012) – marca EP
- Aberturas das ranhuras da seção filtrante do Tubo-Filtro de 0,2 mm
- Pré-Filtro lavado tipo Jacareí, marca Trionic, granulometria comercial 0,6-1,5 mm, mínimo 80% de quartzo.
- Bentonita em pellets marca Compactolit
- Bentonita em pó marca Trionic
- Tampão roscável de fundo compatível com os tubos – marca EP
- Tampão Superior (Cap de pressão) marca Trionic (Figura 31)



Figura 31 – Tampão superior (Cap de Pressão)

- Cimento Votoran
- Areia de Construção granulometria média
- Tampa de Calçada em alumínio amarelo de 170 mm de diâmetro, personalizada, marca Hidrosuprimentos
- Mangueira de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) de 12 mm de diâmetro
- Pistão de desenvolvimento preliminar modelo ECD (Figura 32)
- Bomba elétrica submersível de quatro estágios marca Proactive, modelo Tornado para poços de 2 polegadas (Figura 33)



Figura 32 – Pistão para desenvolvimento preliminar



Figura 33 – Utilização da bomba elétrica submersível para desenvolvimento dos poços

4.1.5 *Materiais para Ensaios RCPTu*

O cone utilizado nos ensaios RCPTu é de fabricação Geotech AB (Suécia), modelo NOVA Acustic – sem fio – o qual possuía no seu extremo inferior uma ponteira com formato cônico (ângulo de vértice de 60°) e área de 10 cm^2 (Figura 34).



Figura 34 – Cone com ponteira Geotech

A localização do elemento poroso para a medida de poro-pressão desse cone é a posição u2, base do cone, de acordo com a prática internacional. O equipamento tem uma relação de áreas desiguais (AN/AT) igual a 0,84.

O equipamento utilizado, de propriedade da ECD Sondagens Ambientais Ltda., possui um sensor de resistividade/condutividade elétrica, também fabricado pela Geotech. Esse sensor, através de arranjos dipolo, fornece, durante o ensaio, os dados de condutividade elétrica, também pelo sistema NOVA Acustic sem fio. O sensor de Condutividade Elétrica pode ser visto na Figura 35



Figura 35 – Cone montado, com sensor de Condutividade elétrica à esquerda

A ancoragem da sonda foi feita utilizando-se helicoides duplos de 180 mm de diâmetro, conforme pode ser visto na Figura 36, e hastes prolongadoras com acoplamento quadrado.



Figura 36 – Ferramenta de Ancoragem

A aquisição de dados sem fio foi feita com o auxílio do Microfone, que faz parte do sistema NOVA Acoustic da Geotech (Figura 37).



Figura 37 – Microfone para aquisição de dados

4.1.6 *Materiais para Ensaios Hidrogeológicos (Bail Test)*

Nos ensaios hidrogeológicos tipo *Bail Test*, foram utilizados:

- Bomba elétrica 12 V submersível Proactive Tornado (Figura 33) para retirar água dos poços de monitoramento
- Medidor de nível de água de 30 metros marca Hidrosuprimentos
- Transdutor de pressão marca Solinst, modelo Levellogger Junior

4.2 Método

4.2.1 *Amostragem de Solo por Cravação Contínua*

4.2.1.1 *Com Tubo Único (Furo Aberto)*

O diagrama esquemático dessa metodologia de amostragem de solo pode ser vista na Figura 38.

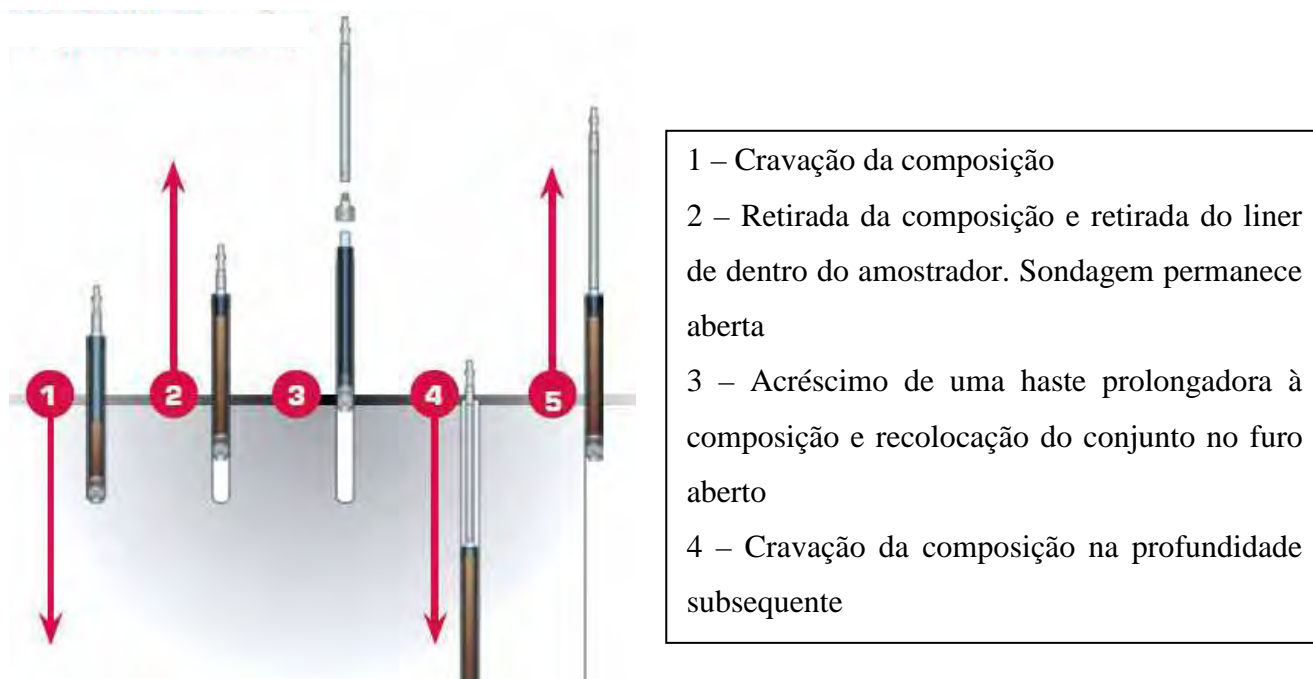


Figura 38 – Amostragem de solo por cravação contínua com furo aberto – diagrama esquemático do funcionamento (traduzido de AMS, 2012)

Optou-se por essa metodologia de amostragem de solo por cravação contínua (tubo único) ao invés de outra, como o amostrador de tubo duplo ou o amostrador fechado por pistão, por ser a metodologia mais rápida e a mais largamente utilizada no Brasil. As outras duas modalidades citadas são usadas, no Brasil, somente em casos especiais. A Figura 39 mostra a composição sendo cravada com equipamento mecanizado, e a Figura 40 mostra a retirada dessa composição, após a cravação.



Figura 39 – Composição sendo cravada com equipamento mecanizado



Figura 40 – Retirada da composição com equipamento mecanizado

4.2.1.2 Com Revestimento dos Trados Ocos Helicoidais

Nos casos em que o furo de sondagem desmorona (colapsa), a metodologia de tubo único não funciona adequadamente, então, se faz necessário revestir o furo. Nesses casos, efetua-se a amostragem de solo concomitante com a sondagem com Trado Oco Helicoidal (*Hollow Stem Auger*), utilizando uma sonda hidráulica com torque suficiente para realizar essa metodologia de sondagem.

Inicialmente, crava-se a composição com o amostrador. A seguir, retira-se a composição (Figura 41), desmonta-se e retira-se o *liner* de dentro do amostrador (Figuras 42 e 43) para descrição tátil-visual. Então, efetua-se a sondagem rotativa a seco com os trados ocos até a profundidade já amostrada. Quando essa profundidade é atingida, retira-se a ferramenta interna que “entope” os trados ocos e coloca-se novamente a composição de amostragem de solo por cravação contínua também por dentro dos trados ocos. Crava-se mais um metro da composição, e repete-se o procedimento.

A falta desse revestimento possibilita o colapso da parede do furo, e consequente coleta de amostras não representativas. Por isso, em solos com pouca coesão (em particular os solos arenosos e/ou saturados), a amostragem por cravação contínua deve ser realizada concomitante com a sondagem mecanizada com trados ocos ou utilizando amostrador de tubo duplo.



Figura 41 – Composição sendo retirada de dentro dos Trados Ocos



Figura 42 – Ferramentas auxiliares para desmontagem da composição, detalhe do amostrador (à esquerda) e do *liner* identificado (à direita)



Figura 43 – Detalhe dos *liners* preparados para descrição

4.2.2 Instalação de Poços de Monitoramento por Dentro dos Trados Ocos

A instalação dos poços de monitoramento por dentro dos trados ocos é considerada o “estado-da-arte” para essa tarefa, e é a modalidade que atende todos os requisitos da norma brasileira NBR 15.495-1 (RIYIS e RIYIS, 2011).

Consiste em avançar a sondagem utilizando uma sonda hidráulica rotativa, sem a utilização de fluidos de perfuração, até a profundidade adequada. Ao se atingir essa profundidade, rompe-se o tampão de fundo dos trados ocos, e insere-se os tubos e tubos-filtro por dentro dos trados ocos (Figura 44). Ressalta-se a importância do transporte e manuseio correto desses tubos, para evitar contaminação cruzada. A recomendação da Norma Brasileira (ABNT, 2007) é utilizar somente tubos previamente embalados e, durante o manuseio dos mesmos, os operadores devem usar luvas de borracha nitrílica ou vinil (Figura 45).



Figura 44 – Tubo-Revestimento e Tubo-Filtro sendo rosqueados e colocados por dentro dos trados ocos



Figura 45 – Tubos adequadamente embalados sendo colocados por dentro dos trados ocios

A seguir, coloca-se, no espaço anular (entre a tubulação e a parede do furo), o pré-filtro, com granulometria adequada à ranhura do tubo-filtro, que, por sua vez, tem essa abertura adequada à granulometria da formação em que será instalado (Figura 46).



Figura 46 – Colocação do pré-filtro no espaço anelar

Após o pré-filtro estar posicionado corretamente, realiza-se o desenvolvimento preliminar (pistoneamento), para que o pré-filtro se assente no espaço anelar e para que o

mesmo estabeleça uma conexão hidráulica adequada com a formação hidrogeológica onde está posicionado (Figura 47).



Figura 47 – Desenvolvimento preliminar

A seguir, coloca-se, no espaço anelar acima do pré-filtro, o selo sanitário, em geral feito de bentonita em pellet, com uma camada de cerca de 30-50 cm. Acima desse selo, o espaço anelar é preenchido com uma calda de cimento e bentonita (Figura 48). Esse procedimento é exigido pela NBR 15.495-1 e recomendado por NIELSEN (2006). Por fim, efetua-se o acabamento do poço (Figura 49).



Figura 48 – Aplicação da Calda de cimento e bentonita



Figura 49 – Vista do poço de monitoramento acabado (à esquerda) e em acabamento (à direita)

Após o acabamento, inicia-se a etapa de desenvolvimento do poço de monitoramento. Essa tarefa é descrita pela norma brasileira NBR 15.495-2 (ABNT, 2008) e consiste, basicamente, em remover os materiais sólidos de dentro do poço, forçar a entrada dos materiais sólidos que estão presos no pré-filtro para dentro do poço e retirá-los também, de modo que o poço fique, tanto quanto possível, isento de partículas sólidas, isento de turbidez, e com condutividade hidráulica igual ou maior que a formação em que está instalado (NIELSEN, 2006). Para isso, em geral, utiliza-se uma válvula de retenção acoplada a uma mangueira descartável de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) para a retirada de partículas maiores e uma bomba elétrica submersível (Figura 50) para a retirada das partículas menores e estabelecimento da conexão hidráulica pré-filtro/formação.



Figura 50 – Utilização da bomba elétrica submersível para desenvolvimento dos poços.

4.2.3 Instalação de Poços de Monitoramento com "Furo Aberto" e Trados Sólidos

A Sondagem com Trado Sólido, descrita no item 4.1.3, realiza a sondagem e deixa o furo de sondagem aberto (Figura 51). A composição das ferramentas, então, deve ser retirada e a instalação do poço de monitoramento é realizada com o furo aberto, ao contrário da instalação com os trados ocios, que é feita por dentro desses trados que revestem o furo. Se o furo exige revestimento, o poço não pode ser instalado naquele local com trados sólidos.

As demais operações seguem o que foi descrito no item 4.2.2.



Figura 51 – Poço instalado após sondagem com Trado Sólido

4.2.4 Ensaios RCPTu

No presente estudo, os ensaios de RCPT e RCPTu foram realizados pela empresa ECD Sondagens Ambientais Ltda. A empresa utilizou uma Sonda Hidráulica acoplada a um Trator para realizar a cravação do cone (Itens 4.1.3 e 4.1.5).

Os ensaios foram realizados obedecendo as normas ABNT-MB 3406 / 1990 (Solo - Ensaio de Penetração de Cone In Situ) e ASTM D3441 / 1998 (*Standard Test Method for Deep, quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soil*).

A Sonda Hidráulica foi primeiramente posicionada, nivelada e ancorada. Com o sistema de aquisição de dados inicializado, o ensaio de penetração do piezocone de resistividade foi feito a uma velocidade constante de 2 cm/s, interrompida apenas para conexão de novas hastes, monitorando-se sempre a inclinação do cone, evitando a aquisição de dados não representativos e mantendo a integridade do equipamento (Figura 52).



Figura 52 – Monitoramento dos parâmetros durante o ensaio

Um cuidado especial foi tomado com relação à saturação prévia do elemento poroso através do uso de glicerina líquida, a qual passou por um processo de deaeração através de bomba de vácuo, permitindo a completa saturação da pedra porosa (Figura 53).



Figura 53 – Saturação da pedra porosa com glicerina deaerada e manipulada em recipiente adequado

Alternativamente, o piezoelemento era saturado com graxa, ao invés de utilizar-se a pedra porosa deaerada (Figura 54). Esse recurso de filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva, se mostrou um recurso interessante para manter a saturação até atingir o nível d'água, conforme demonstrado por GIACHETI et al (2004) e IDE (2009).



Figura 54 – Filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva

As medidas foram registradas em intervalos regulares de 2 cm, sendo apresentadas em tempo real por um computador ligado a um sistema de transmissão sônica de dados (Figura 55), sendo assim, os parâmetros analisados foram:

- Resistência à penetração da ponta (q_c);
- Resistência por atrito lateral (f_s);
- Poro-pressão (u);
- Condutividade Elétrica (EC)

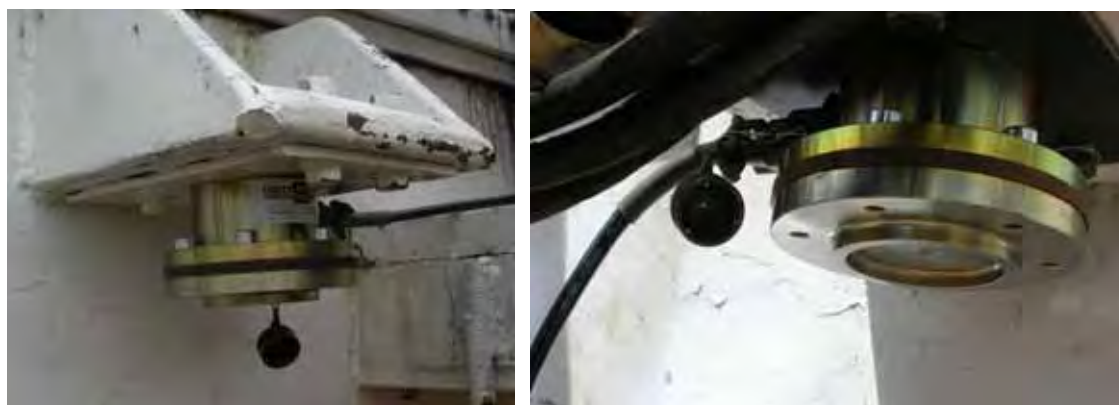
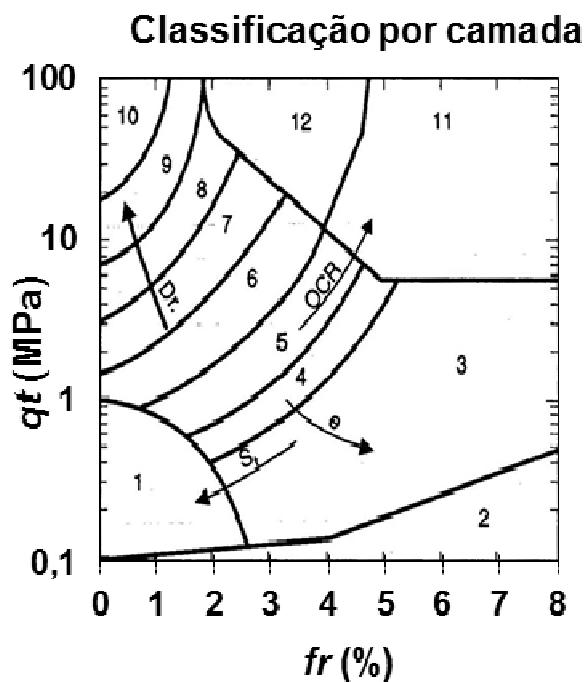


Figura 55 – Microfone para aquisição de dados

Os dados coletados foram posteriormente tratados e interpretados através de planilhas eletrônicas, sendo mostrados de forma gráfica para permitir uma visualização geral do perfil estratigráfico da área estudada.

Na interpretação dos resultados, utilizou-se, como uma das formas de se realizar essa interpretação, o ábaco de Robertson et al (1986), que está colocado na Figura 56 e que leva em conta a resistência total (q_t) e a razão de atrito (R_f).



	Comportamento do solo
1	Solo fino sensível
2	Matéria orgânica
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 com pedregulho a areia
11	Solo fino muito rijo
12	Areia a areia argilosa

Figura 56 – Ábaco de classificação de solos (Robertson et al, 1986)

Ressalta-se que nos pontos onde foram realizados os ensaios de piezocone de resistividade, foi feita a execução de pré-furos, a fim de se ultrapassar a camada superficial de aterro e, em alguns pontos, chegar próximo ao nível d'água.

Na Figura 57, observa-se o detalhe da cravação do sensor, em particular o sensor de resistividade, prestes a atingir o solo.



Figura 57 – Sensores sendo cravados. No detalhe, o sensor de resistividade

4.2.5 ***Ensaios Hidrogeológicos ("Bail Test")***

O ensaio conhecido como teste de slug é um ensaio de permeabilidade, realizado em nível variável (zona saturada), em que é aplicada uma carga ou descarga através da introdução ou remoção súbita de um volume (sólido cilíndrico de volume conhecido) dentro do poço, de forma que o nível d'água (NA) seja elevado ou rebaixado instantaneamente. A estabilização desse nível pode ser tão rápida que muitas vezes só é possível acompanhá-lo através de transdutores de pressão.

Quando o volume é removido, o teste é conhecido como "bail test" e, quando adicionado, "slug test" (Figura 58). Este volume deslocado é igual à adição ou à remoção de água do aquífero.

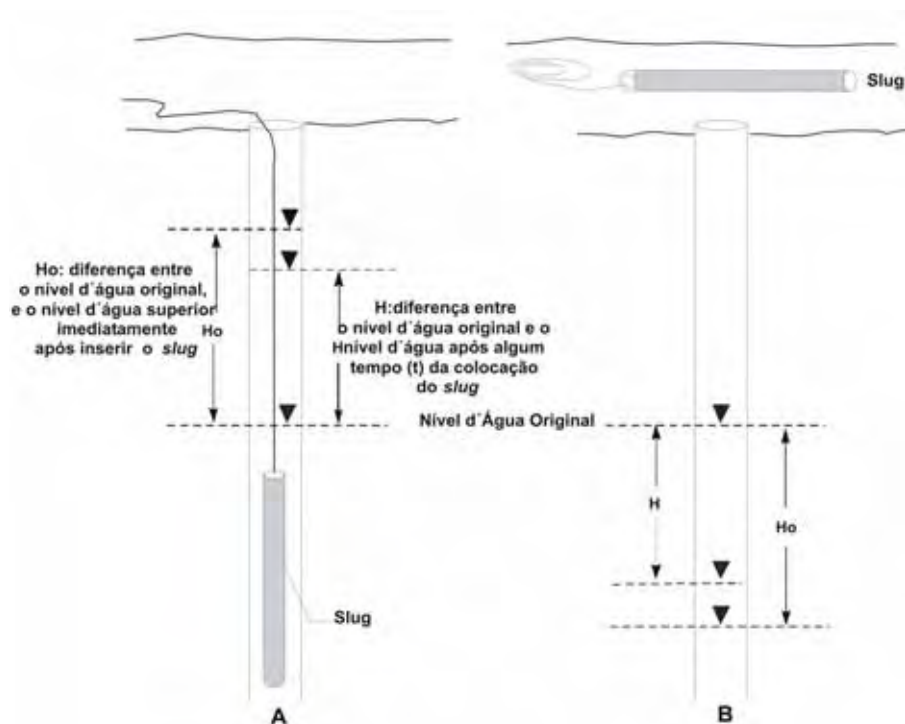


Figura 58 – Slug Test (A) e Bail Test (B) – OLIVA et al (2005)

O resultado do monitoramento da posição do nível da água (NA) é uma curva de rebaixamento ou recuperação do NA, com o tempo. Desta curva são extraídos os parâmetros que, juntamente com as características geométricas do poço, fornecem o valor de condutividade hidráulica (OLIVA et al, 2005).

A interpretação do nível da água x tempo para o bail test e o slug test pode ser obtida pelos métodos de Hvorslev (1951) e Bouwer-Rice (1976) (citados por OLIVA et al, 2005 e NIELSEN, 2006).

A determinação da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev é obtida através da seguinte fórmula:

$$k = (r^2 \cdot \ln(L_e/R)) / (2 \cdot L_e \cdot T_0)$$

K - condutividade hidráulica (cm/s);

r - raio do revestimento (cm);

R - raio do poço (cm);

L_e - comprimento do filtro (cm);

T₀ - tempo que leva para o nível da água cair a 37% da posição inicial (s).

No presente estudo, os Bail Tests foram realizados rebaixando-se o NA com o uso da bomba elétrica submersa modelo “Proactive Tornado” e as variações de nível no sentido da recuperação do NA original foram medidas através do transdutor de pressão “Solist Levellogger Junior”. Os dados foram plotados e a condutividade hidráulica calculada através do Software “Aquifer Test” pelo método Hvorslev.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Introdução

Com a finalidade de avaliar uma Investigação Geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando ferramentas de alta definição para estabelecer um modelo conceitual sólido para a área de estudo, foi feita uma campanha de coleta de dados em campo durante os dias 11 e 14 de junho de 2012.

Para isso, foram utilizadas ferramentas tradicionais de investigação de áreas contaminadas em conjunto com uma ferramenta inovadora para esse fim: os ensaios RCPTu. Posteriormente, em novembro/2012, realizou-se ensaios hidrogeológicos e um ensaio de dissipação de poro pressão, para corroborar os resultados da campanha de junho/2012.

A sequência de ações, com tomada de decisão em campo, foi a seguinte:

- 1) Avaliação do material anterior, considerado como de investigação preliminar. Observação do posicionamento dos ensaios e dos resultados dos mesmos. Elaboração de um Modelo Conceitual preliminar que direcionou espacialmente a nova coleta de dados.
- 2) Realização de coleta de amostras de solo pelo método da cravação contínua, em uma linha paralela ao córrego, com um ponto de coleta a cada 20 metros até o final da área ou até onde a sonda montada sobre caminhão conseguisse chegar. Coleta de amostras pelo mesmo método em uma linha perpendicular à primeira, com um ponto a cada 5 metros.
- 3) Realização de ensaios RCPTu em pontos coincidentes com as amostragens de solo por cravação contínua, com um ensaio a cada dois pontos de coleta de amostras de solo. Avaliação desses ensaios para seleção da posição da seção filtrante dos poços multiníveis a serem instalados

- 4) Instalação de 2 pares de poços de monitoramento multiníveis para refinar o modelo conceitual hidrogeológico da área. A posição da seção filtrante seguiu a indicação dada pelo ensaio RCPTu correspondente à posição do par multinível
- 5) Instalação de 3 poços no aquífero raso (livre) no “fundo” da área, onde não haviam sido coletadas amostras de solo por falta de acesso à sonda acoplada ao caminhão. Esses poços foram instalados com a sonda acoplada ao Trator e servem para identificar qualitativamente a potenciometria do aquífero raso naquela área
- 6) Realização de ensaios RCPTu próximos a esses poços do fundo da área
- 7) Realização de ensaios hidrogeológicos em um par multinível e nos três poços do aquífero raso, para se obter a condutividade hidráulica do aquífero raso e do aquífero confinado

5.2 Informações Preliminares

A área de estudo está localizada no município de Bauru-SP. O mapa de localização está na Figura 59

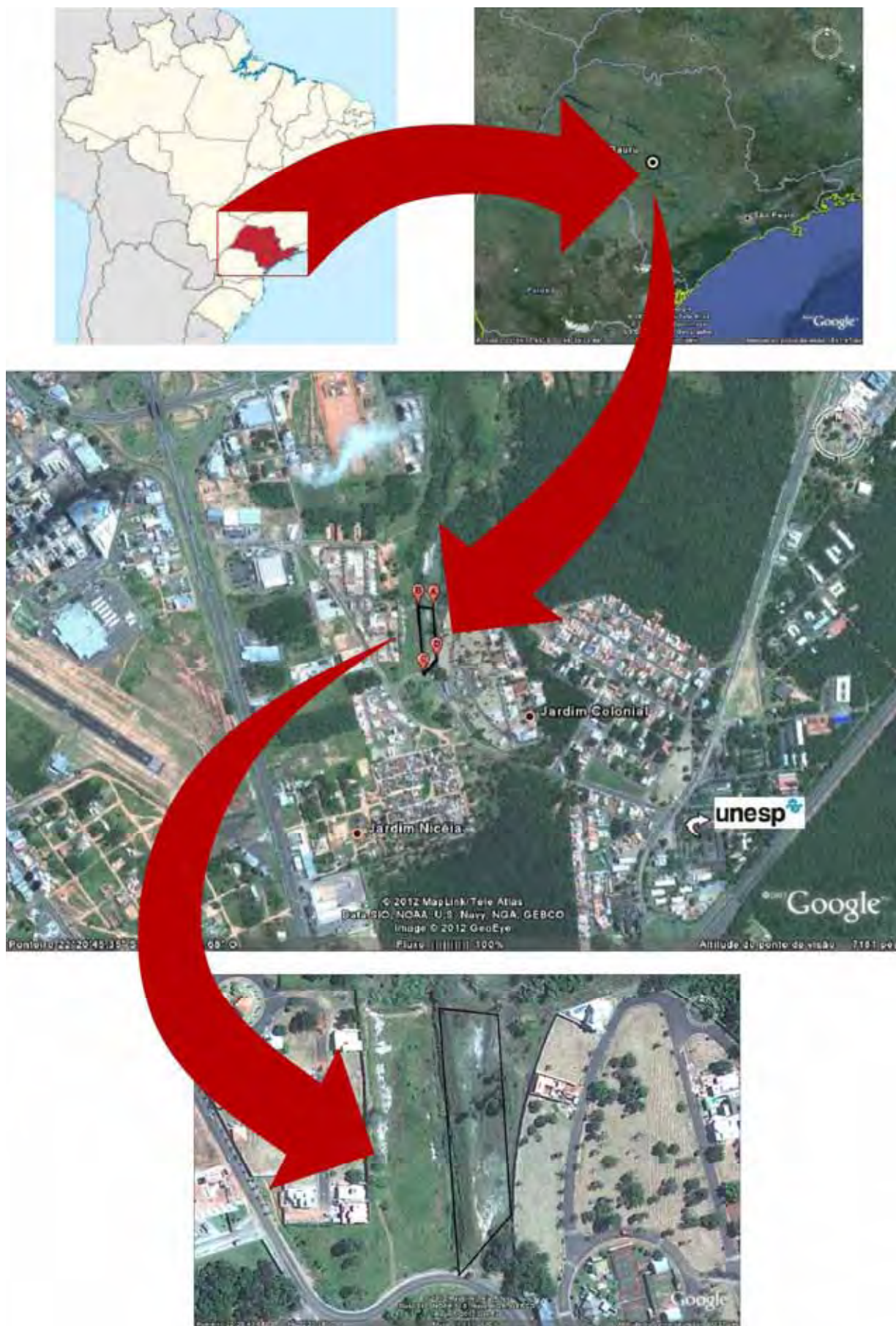


Figura 59 – Mapa de Localização da Área Estudada

Anteriormente, na mesma área, foram realizados diversos estudos com diferentes objetivos, mas que geraram uma quantidade razoável de dados, suficiente para elaborar um modelo conceitual prévio da área. Esses estudos foram: processos erosivos (IDE, 2009), comparação entre os perfis gerados nos ensaios CPTu com a granulometria do solo (DE JESUS, 2011), comparação entre os resultados de campo de ensaios RCPTu com resultados de condutividade elétrica do solo em laboratório (PEIXOTO, et al, 2010), entre outros. Além dos ensaios CPT, CPTu e RCPTu já citados, alguns ensaios SPT foram realizados (IDE, 2009) e uma sondagem com amostragem de solo por cravação contínua também foi realizada em 2011 (DE JESUS, 2011). Tanto os resultados das sondagens SPT de IDE (2009) quanto alguns dados de ensaios CPT estavam disponíveis antes do início dos trabalhos, possibilitando a elaboração de um modelo conceitual prévio.

A Figura 60 mostra a localização dos ensaios SPT realizados por IDE (2009), e as Figuras 61 e 62 são interpretações do perfil elaboradas com base nos dados coletados por IDE (2009).



Figura 60 – Localização das Sondagens SPT

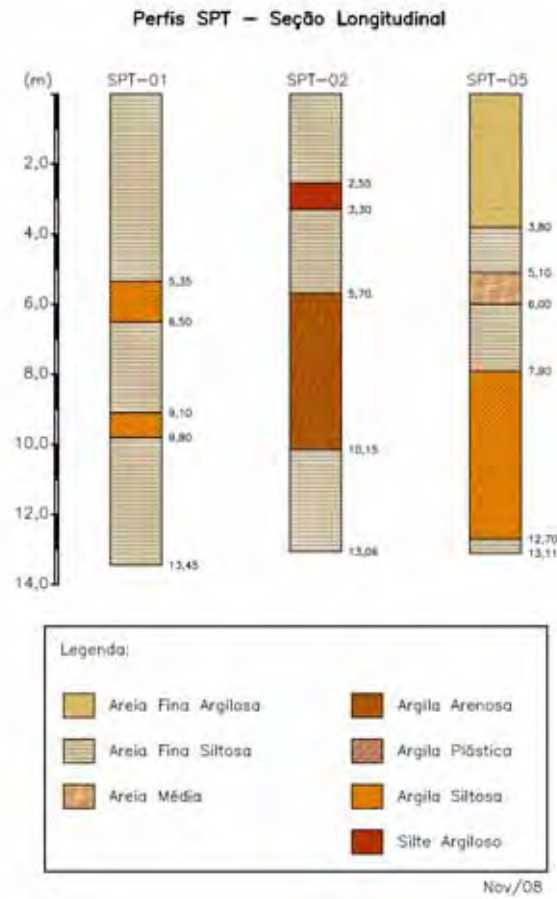


Figura 61 – Perfis de SPT – Seção Longitudinal – Reinterpretados de IDE, 2009

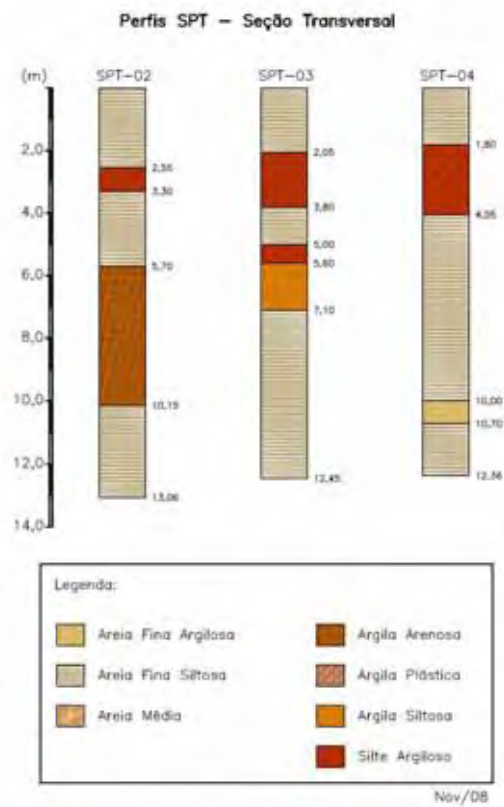


Figura 62 – Perfis de SPT – Seção Transversal – Reinterpretados de IDE (2009)

O modelo conceitual prévio elaborado na interpretação dos dados coletados da campanha de ensaios SPT realizada por IDE (2009) pode ser visto na Figura 63.

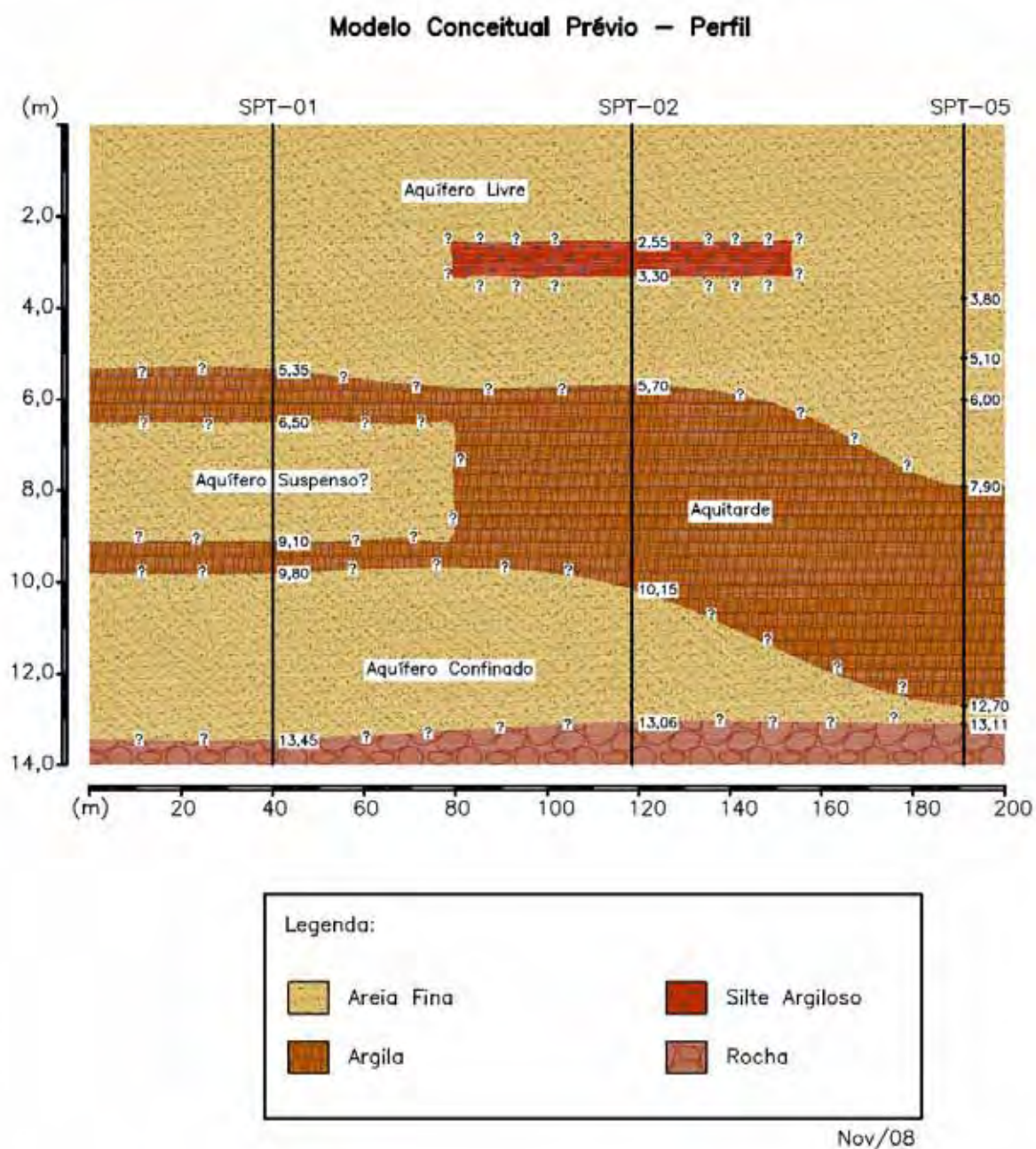


Figura 63 – Modelo Conceitual Prévio

Esperava-se encontrar um solo predominantemente arenoso, heterogêneo, com lentes de argila ou outro material mais fino, descontínuas e de espessuras diferentes em

cada ponto. O nível de água é raso (entre 3 e 5 m), indicando que há várias camadas litológicas com condutividades hidráulicas diferentes por todo o perfil.

De acordo com esse modelo conceitual prévio, o aquífero livre estaria predominantemente associado a uma formação arenosa, de alta condutividade hidráulica, e seria uma zona preferencial de fluxo de um eventual contaminante. Outro aquífero importante na área estaria próximo ao topo rochoso (estimado em aproximadamente 12-15 m), confinado por uma ou mais camadas de um aquitarde de espessuras desconhecidas. Esse aquífero confinado teria também uma alta condutividade hidráulica. Esperava-se observar algum fluxo vertical, evidenciando que são aquíferos diferentes. Existiam várias incertezas associadas a esse modelo conceitual prévio, pois a distância entre os pontos de sondagem SPT era muito elevada (cerca de 75 m entre elas) para a escala em que se pretende para estabelecer um MCS adequado.

5.3 Amostragem de Solo pelo Método da Cravação Contínua

Os trabalhos de investigação se iniciaram pelas sondagens para amostragem de solo pelo método da cravação contínua, recomendado pela USEPA e pela CETESB e reconhecido como a melhor metodologia para amostragem de solo para investigação de áreas contaminadas. Dentro desse método, optou-se pela estratégia inicial de amostragem com tubo único, descrita no item 4.2.1. Estabeleceu-se uma seção paralela ao córrego e perpendicular ao sentido da erosão estudada por IDE (2009) para se verificar o perfil stratigráfico da área. Nessa seção, estabeleceu-se uma distância de 20 metros entre um ponto e outro como padrão inicial para a coleta de dados. Realizou-se, então, 07 sondagens, que foram denominadas DP-01 a DP-07 nessa linha, como pode ser visto na Figura 64. Nessas sondagens, eram coletadas amostras no amostrador *liner* a cada metro. As amostras foram descritas em campo pelo método tátil-visual.



Figura 64 – Localização das Sondagens DP e das antigas sondagens SPT

Durante a realização das sondagens, observou-se alguns fatores que demonstram a limitação desse método para estabelecer o modelo conceitual de maneira precisa, e com a resolução necessária para um estudo de áreas contaminadas. São eles: colapso da parede da sondagem; pressão hidráulica carreando materiais por dentro dos revestimentos; dificuldade na recuperação de amostras de solos arenosos saturados. Essas limitações serão discutidas a seguir:

5.3.1 Colapso da parede do furo de sondagem

Na 1ª sondagem (DP-01) já se pôde verificar esse tipo de dificuldade. Após coletar-se a 5ª amostra (4,0-5,0 metros), quando a composição foi recolocada no furo, percebeu-se que o fundo da sondagem estava com cerca de 4,70 m de profundidade, ao invés de 5,00 m, conforme o esperado. Isso significa que pelo menos 30 cm de material caiu no fundo do furo de sondagem e a próxima amostra, que seria de 5,0-6,0 m estaria “contaminada” com material não pertencente a essa camada. Coletou-se, então, as 2 amostras seguintes (5,0-6,0 e 6,0-7,0 m) dessa mesma maneira, e optou-se por descartar a parte inferior no *liner* na descrição do material para diminuir o efeito da mistura de camadas.

Nas sondagens DP-02, DP-03, e DP-04, a sondagem foi paralisada quando o desmoronamento atingiu 30 cm (nos três pontos, a última amostra coletada foi de 5,0-6,0m).

Na sondagem DP-05, optou-se pelo mesmo procedimento, porém, devido à necessidade de se obter mais informações nesse ponto, a sondagem foi revestida, ou seja, após coletar-se a amostra de 5-6 m, retirou-se a composição e a sondagem foi refeita, a 1 metro de distância da anterior, utilizando a metodologia rotativa com Trado Oco Helicoidal (descrita no item 4.2.1.2) até 5 m e então, realizando a amostragem de solo por dentro desses trados ocos dos 5,0 aos 6,0 m. Depois dessa amostragem, avançou-se a sondagem HSA até os 6,0 m, amostrou-se por dentro dos trados ocos dos 6,0 m aos 7,0 m e assim por diante. Quando a amostra dos 5,0-6,0 m foi coletada novamente, percebeu-se que havia uma camada de cerca de 30 cm de uma argila plástica cinza com grãos de areia, que não havia sido detectada na amostragem anterior, sem revestimento, certamente devido à contaminação da amostra por material de camadas superiores. Repetiu-se o procedimento até o 8º metro, mas as amostras a partir do 6º metro eram pouco representativas, devido a outro fator: a pressão hidráulica que carrega material para dentro dos trados ocos. Esse fator será discutido na seção seguinte.

A sondagem DP-06 foi realizada da mesma forma que a DP-05, porém, avançou-se até o topo rochoso, que foi encontrado com 12 metros. O problema do desmoronamento da sondagem foi reduzido com o uso dos trados ocos, porém, a questão da pressão hidráulica ainda persistiu.

A sondagem DP-07 foi realizada da mesma forma que as DPs 02, 03 e 04, ou seja, foi interrompida com 6,0 m de profundidade, ponto em que o desmoronamento atinge 30 cm da sondagem.

5.3.2 *Pressão hidráulica carregando material para dentro do revestimento:*

Conforme descrito na seção anterior, nas sondagens DP-06 e DP-07, ocorreu a coleta de amostras não representativas devido ao fato da entrada de material por baixo do revestimento realizado pelos trados ocos. Essa entrada de material ocorre por causa da pressão hidráulica associada a um solo friável e pouco consolidado (característico de areia fina). Se a pressão hidrostática é grande o suficiente (estimada em 3 m.c.a.), o solo tende a entrar nos trados ocos e impedir a coleta de amostras de solo representativas. Existem ferramentas importadas (Amostrador por Pistão ou *Piston Sampler*, fabricado pela AMS Inc) que minimizam esse problema, no entanto, não estão disponíveis em larga escala no Brasil e tornam o trabalho de sondagem muito mais lento.

Da mesma forma, o artifício empregado em ensaios tipo SPT para investigação geotécnica, de jogar água por dentro dos revestimentos não pode ser utilizado em investigações geoambientais por interferir no aquífero a ser avaliado.

5.3.3 *Solo saturado não permite uma boa recuperação da amostra no liner:*

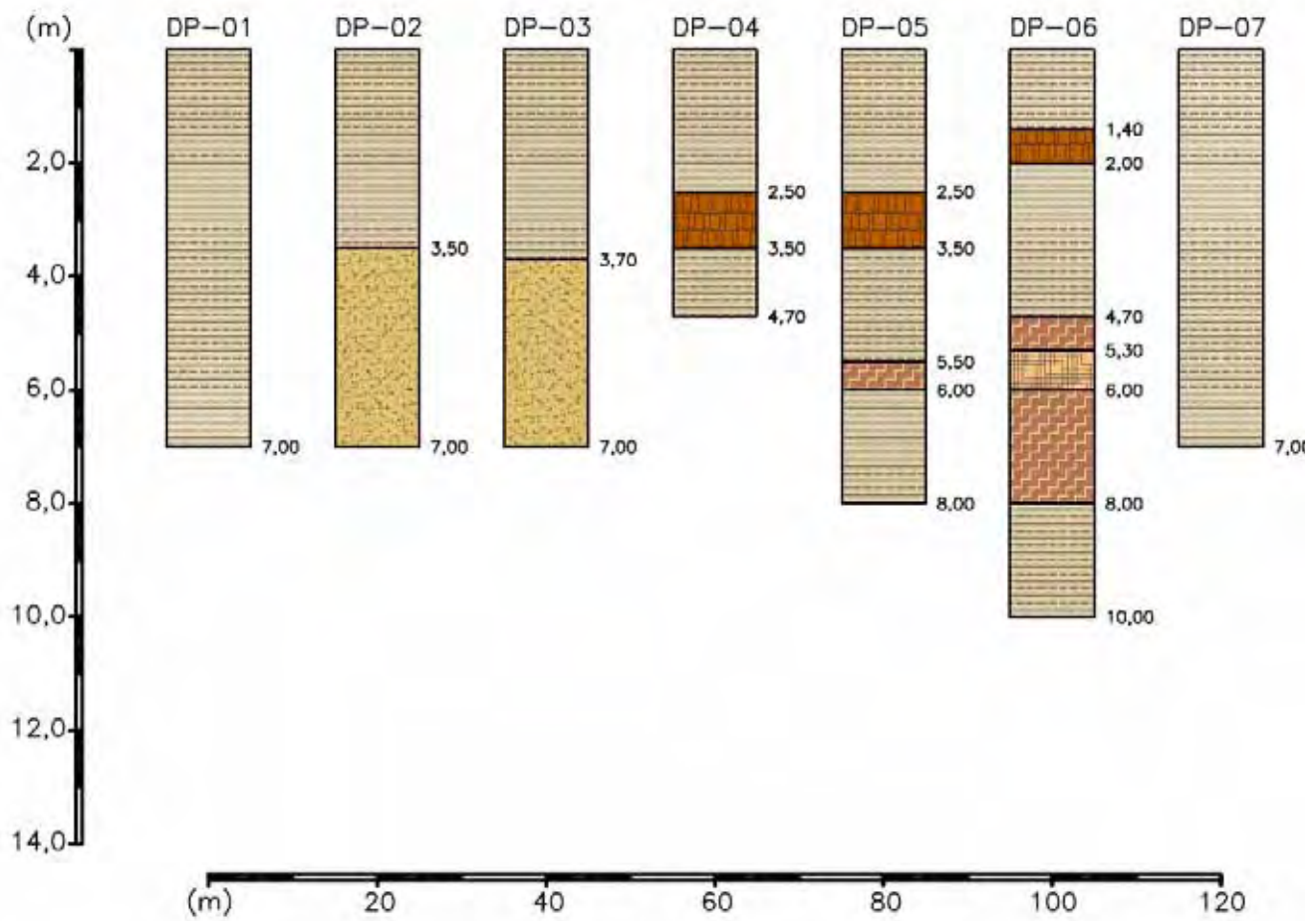
Na sondagem DP-06, ocorreu um 3º problema: o excesso de saturação do solo fez com que as amostras ficassem também com muita água, conseqüentemente, o amostrador penetrava no solo com a cravação, mas, quando o mesmo era retirado da sondagem, vinha praticamente sem amostra recuperada, pois a mesma, devido à grande quantidade de água, saía do amostrador quando retirado. Existe uma ferramenta importada (*core catcher*, da Geoprobe) que minimiza esse efeito, porém, não está disponível comercialmente no Brasil.

Esses três fatores impediram que o modelo conceitual inicial fosse refinado no sentido vertical. Ao contrário, as poucas sondagens SPT forneceram mais informações em

profundidades maiores que 6 metros que as sondagens por cravação contínua. Porém, nas profundidades mais rasas, onde se esperava encontrar o aquífero livre, pôde-se obter mais detalhes sobre o perfil estratigráfico, e a maior quantidade de sondagens possibilitou uma adequada elaboração de um modelo conceitual no sentido horizontal.

Os perfis longitudinal e transversal elaborado com base nos resultados das sondagens por cravação contínua estão nas Figuras 65 e 66.

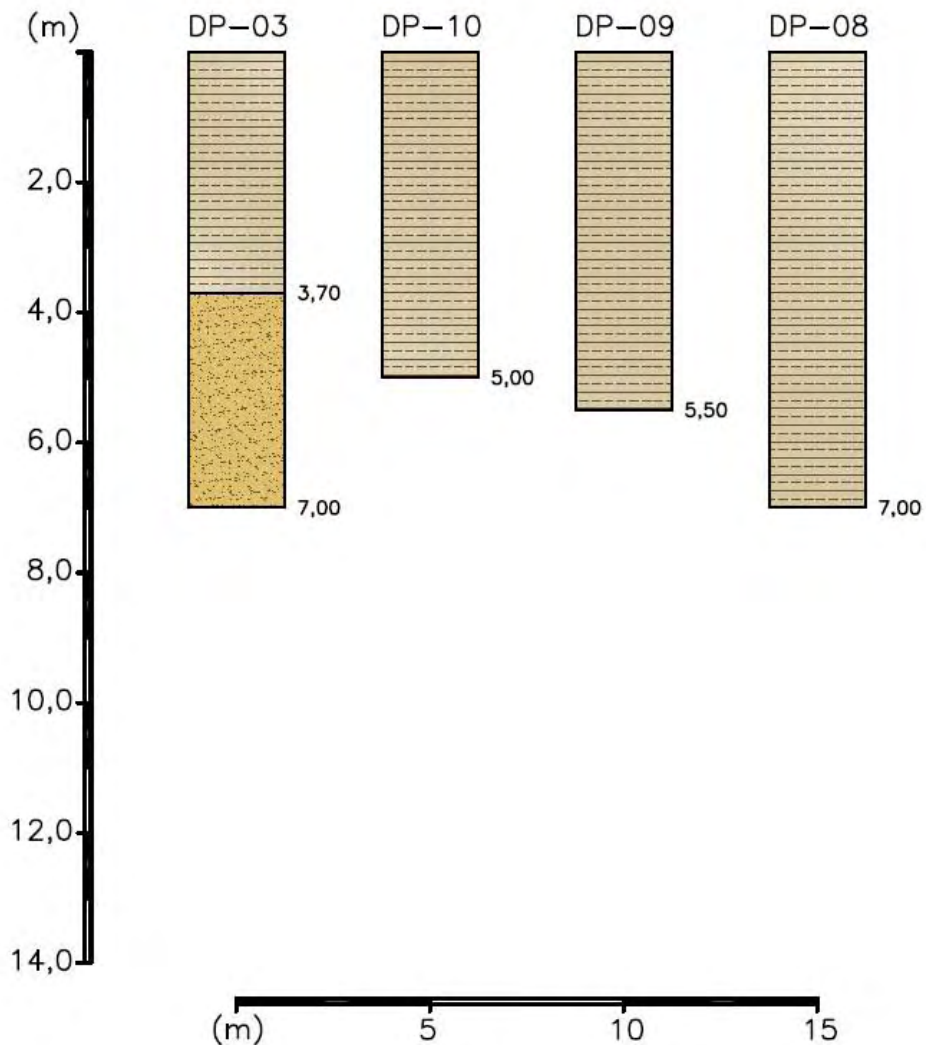
Perfis Sondagens Por Cravação Contínua – Seção Longitudinal



Jun/12

Figura 65 – Perfis Longitudinal elaborado com base nas sondagens por cravação contínua

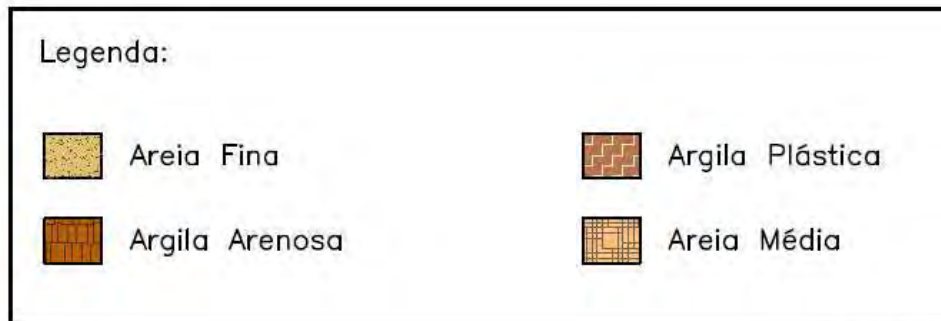
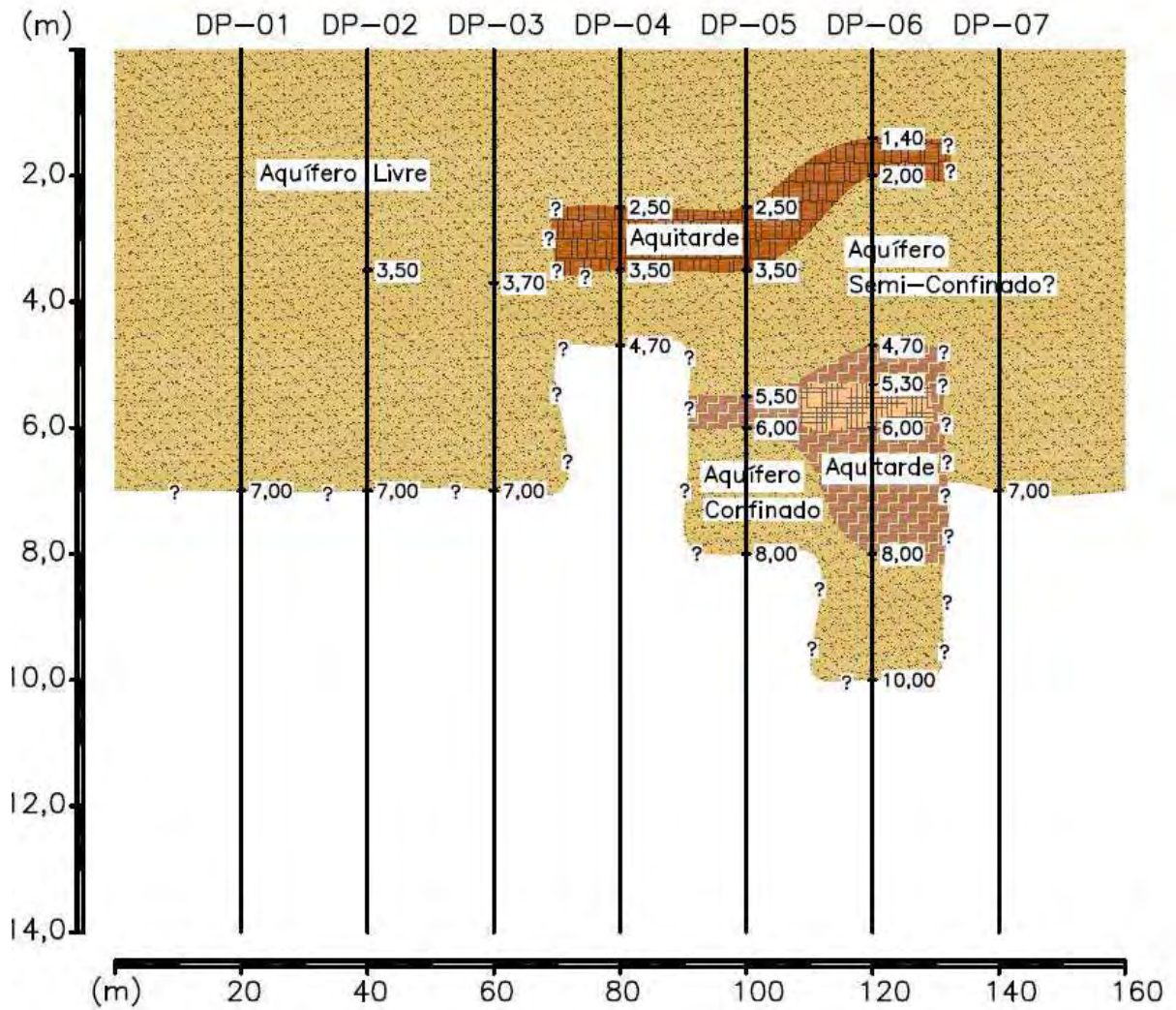
Perfis Sondagens Por Cravação Contínua – Seção Transversal



Jun/12

Figura 66 – Perfis Transversal elaborado com base nas sondagens por cravação contínua

O modelo conceitual revisado para o perfil longitudinal está na Figura 67



Jun/12

Figura 67 – Modelo Conceitual revisado (após amostragem de solo por cravação contínua)

Percebe-se que esse Modelo Conceitual possui muitas incertezas decorrentes principalmente da limitação da metodologia da coleta de dados, mas também das limitações da forma de interpretar esses dados, pois a descrição tátil-visual das amostras coletadas varia muito de acordo com o profissional que está realizando – variações de 2 ordens de grandeza são comuns (AHLERS, 2012) – e a escala com que se consegue descrever as amostras é inadequada para as variações de condutividade hidráulica que é necessário identificar, conforme pode ser visto na Figura 68

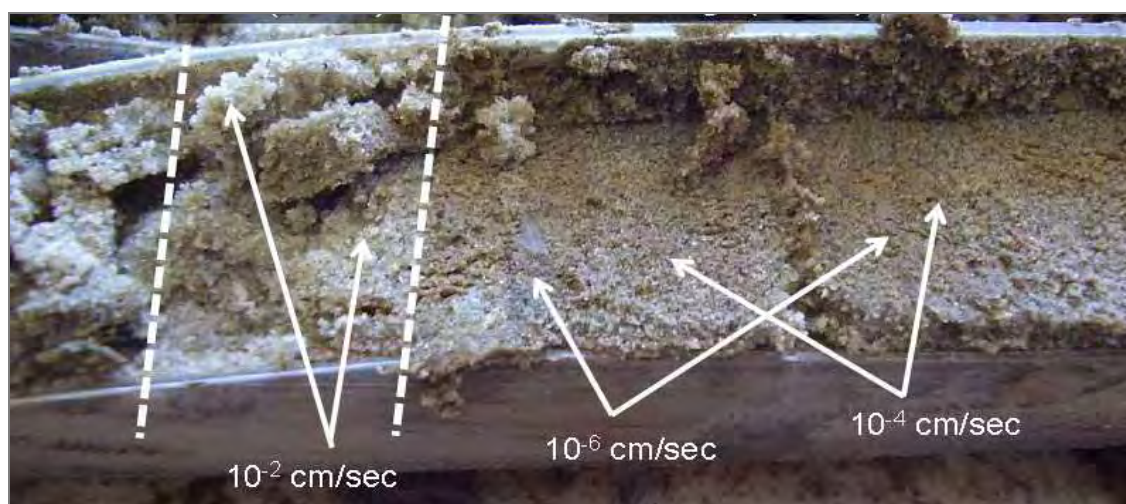


Figura 68 – 10 cm de um amostrador *liner* e as heterogeneidades da amostra de um aquífero inicialmente classificado de “homogêneo” (KILLIMBECK, 2012)

5.4 Ensaios de Piezocone de Resistividade (RCPTu)

O passo seguinte do estudo foi realizar ensaios RCPTu. Os objetivos do uso dessa ferramenta foram: detalhar melhor os perfis nos pontos-chave, refinar o modelo conceitual da área, verificar a acurácia e as limitações dessa ferramenta quando comparada com as outras utilizadas para a investigação (SPT e Cravação Contínua) e verificar em detalhe a posição de eventuais lentes de material argiloso que possa funcionar como um aquitarde e confinar um aquífero mais profundo.

Na mesma seção onde foram realizadas as amostragens de solo por cravação contínua, foram realizados seis ensaios RCPTu (RCPT-01, RCPT-02, RCPT-03, RCPT-04, RCPT-05 e RCPT-06).

Dentre todos os ensaios realizados, o RCPT-04 foi descartado, pois foi interrompido no meio por falha de comunicação entre a ponteira e o sistema de aquisição de dados, provavelmente devido à falta de carga nas pilhas. Os Ensaios RCPT-04, 05 e 06 foram

feitos praticamente na mesma posição somente movendo-se o equipamento 1 m em direção ao “fundo” da área a cada mudança, e representam o mesmo ponto. O ensaio RCPT-05 apresentou dados de poro-pressão incompatíveis, possivelmente devido à falha no processo de preparação do filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva por isso, essas medidas de poro-pressão nesse ensaio foram descartadas. Toma-se, então, como ensaio mais representativo desse ponto o RCPT-06, descartando-se os outros dois.

O Ensaio RCPT-01 foi realizado no mesmo ponto da sondagem DP-01. O RCPT-02 foi realizado no mesmo ponto da SD-05. O RCPT-03 foi realizado no mesmo ponto da DP-03, e os RCPT-04, 05 e 06 foram realizados no mesmo ponto da DP-07. Esse posicionamento pode ser visto na Figura 69, os resultados obtidos estão no Anexo I e sua interpretação para definição do perfil estratigráfico longitudinal da área estão representados na Figura 70

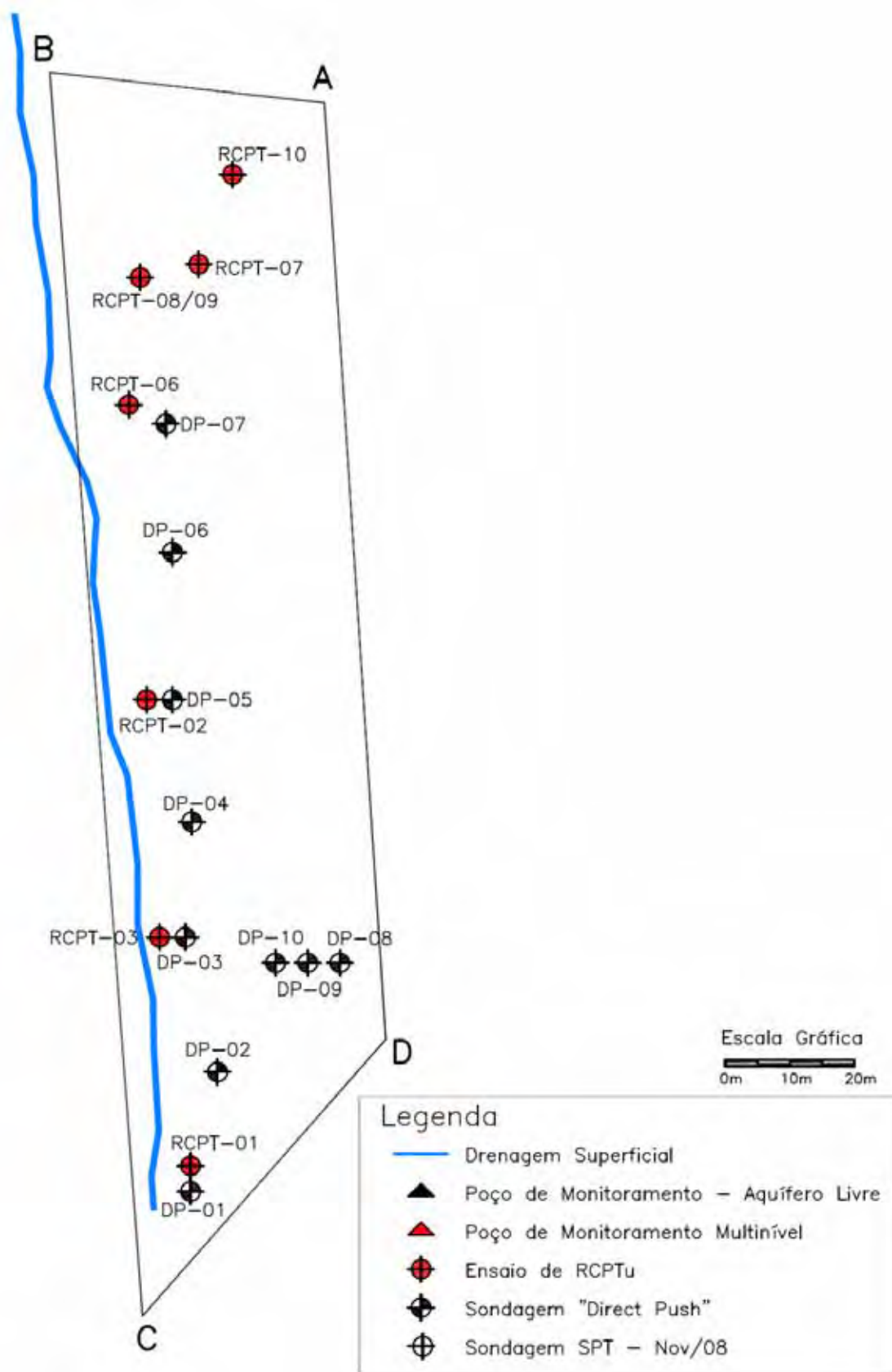


Figura 69 – Localização dos ensaios RCPTu e amostragens de solo por cravação direta

As interpretações dos resultados dos ensaios RCPTu mostraram, com maior riqueza de detalhes, as variações do perfil estratigráfico no sentido vertical, e, comparado com o que foi possível interpretar nas amostragens de solo por cravação contínua, apresentaram muito menos limitações, pois os pontos avaliados tinham a resolução adequada, a precisão adequada e a representatividade adequada. Com esses ensaios pôde-se notar, claramente, que há camadas de argila de espessura variável em todos os pontos, e que certamente há um aquífero confinado na porção inferior do perfil. Os resultados obtidos nos ensaios estão no Anexo 1.

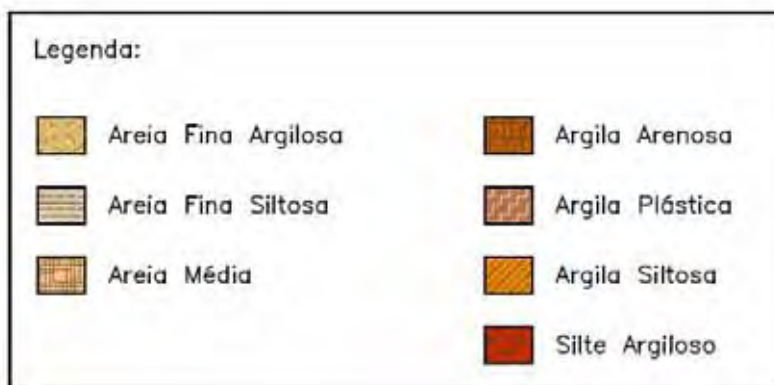
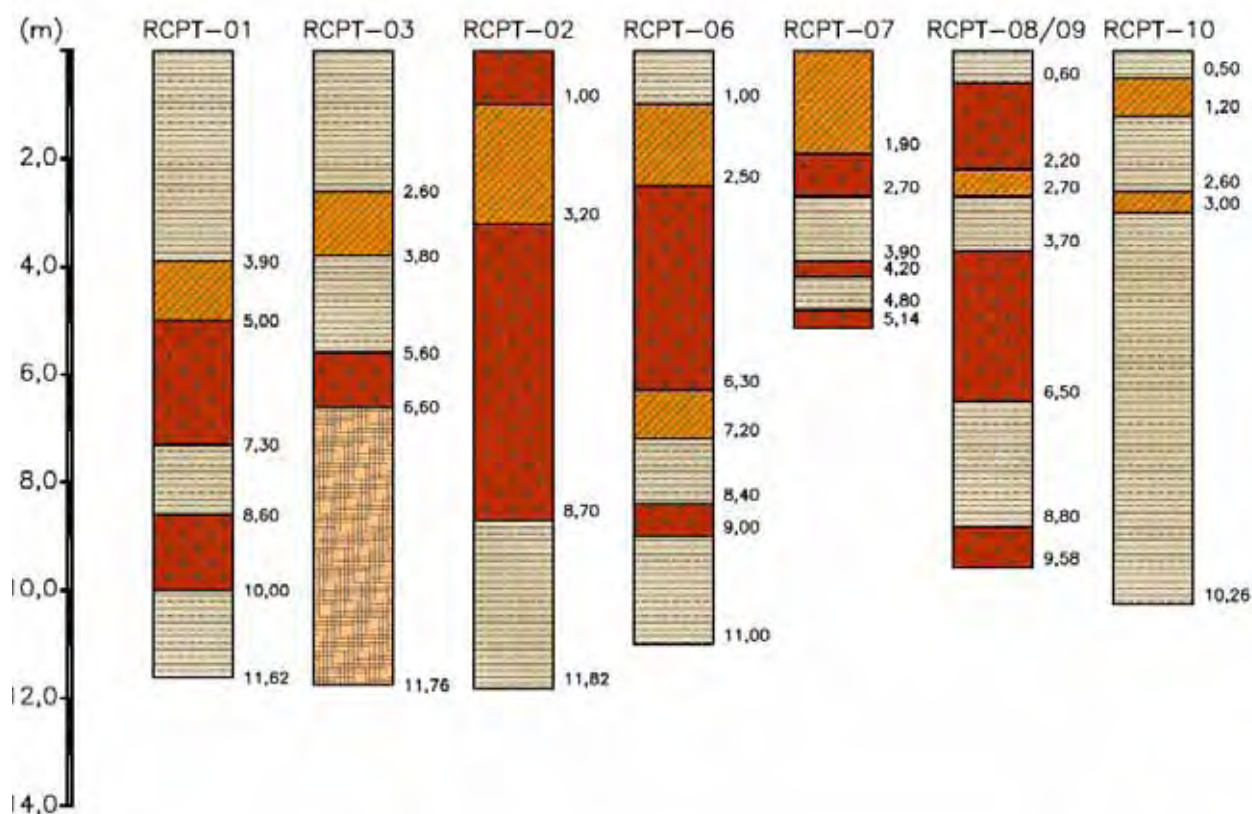
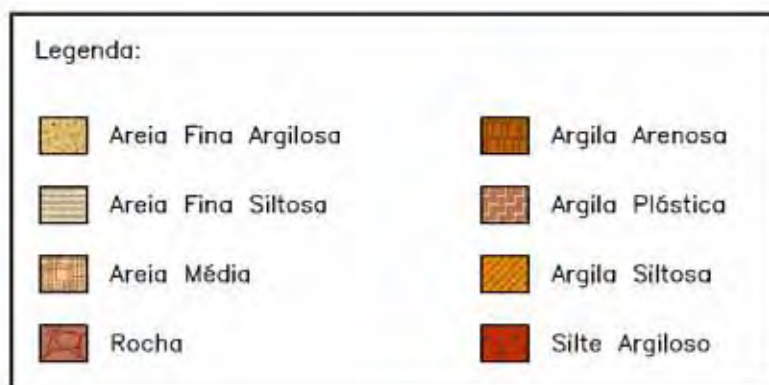
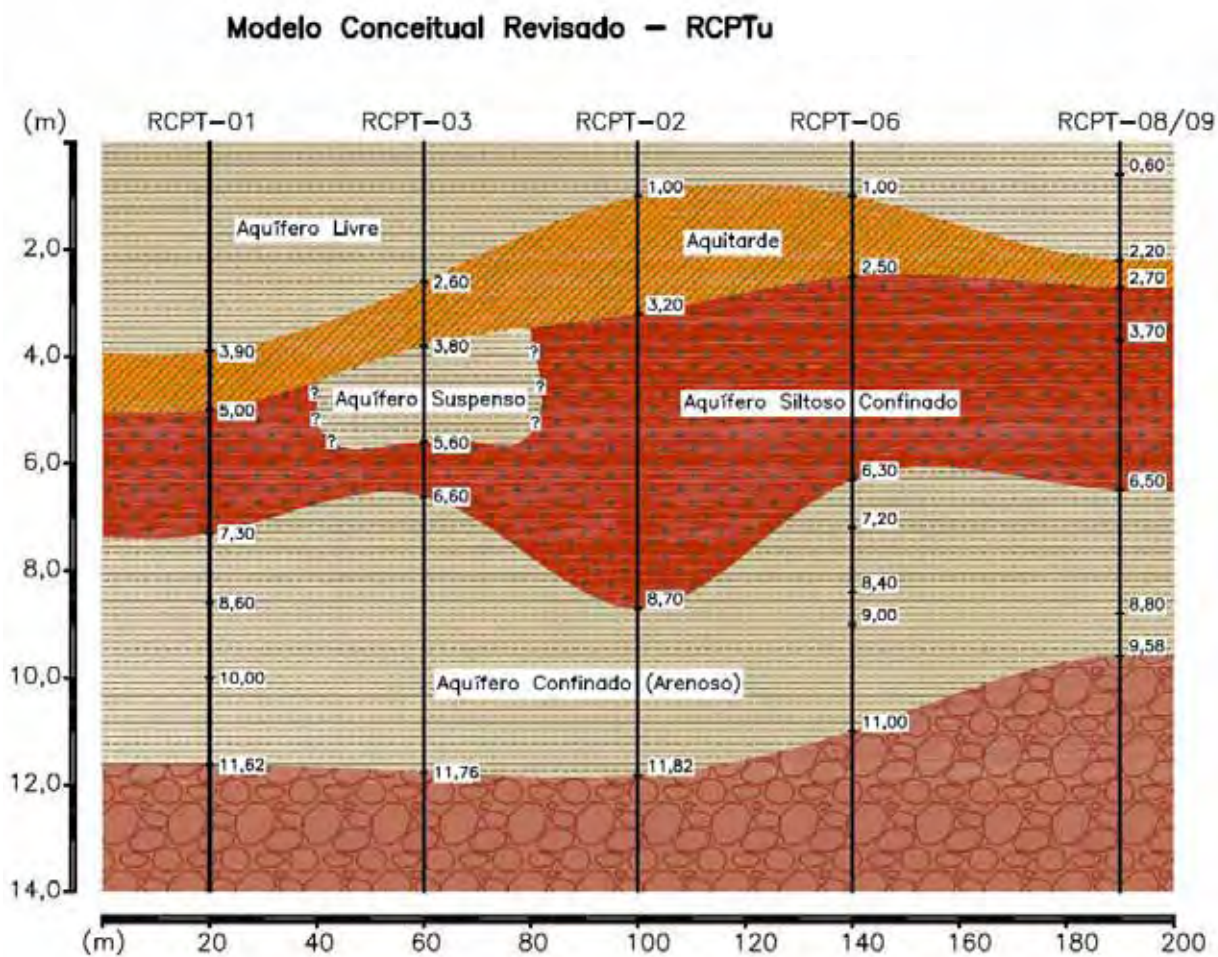


Figura 70 – Perfis estratigráficos de seção longitudinal interpretados a partir dos ensaios RCPTu utilizando classificação de Robertson et al (1986)

De posse desses dados, ainda em campo, pôde-se refinar o modelo conceitual considerando os perfis interpretados a partir dos dados obtidos nos ensaios RCPTu e empregando-se o ábaco de Robertson et al (1986). Esse modelo conceitual está representado na Figura 71



Jun/12

Figura 71 – Modelo Conceitual elaborado após os ensaios RCPTu de acordo com o ábaco de Robertson et al (1986)

De todos os ensaios RCPTu realizados, optou-se por descrever o perfil obtido em um nível de detalhe dos ensaios RCPT-01, RCPT-02 e RCPT-3. Nas Figuras 72, 73 e 74 estão as interpretações detalhadas do ensaio RCPT-01.

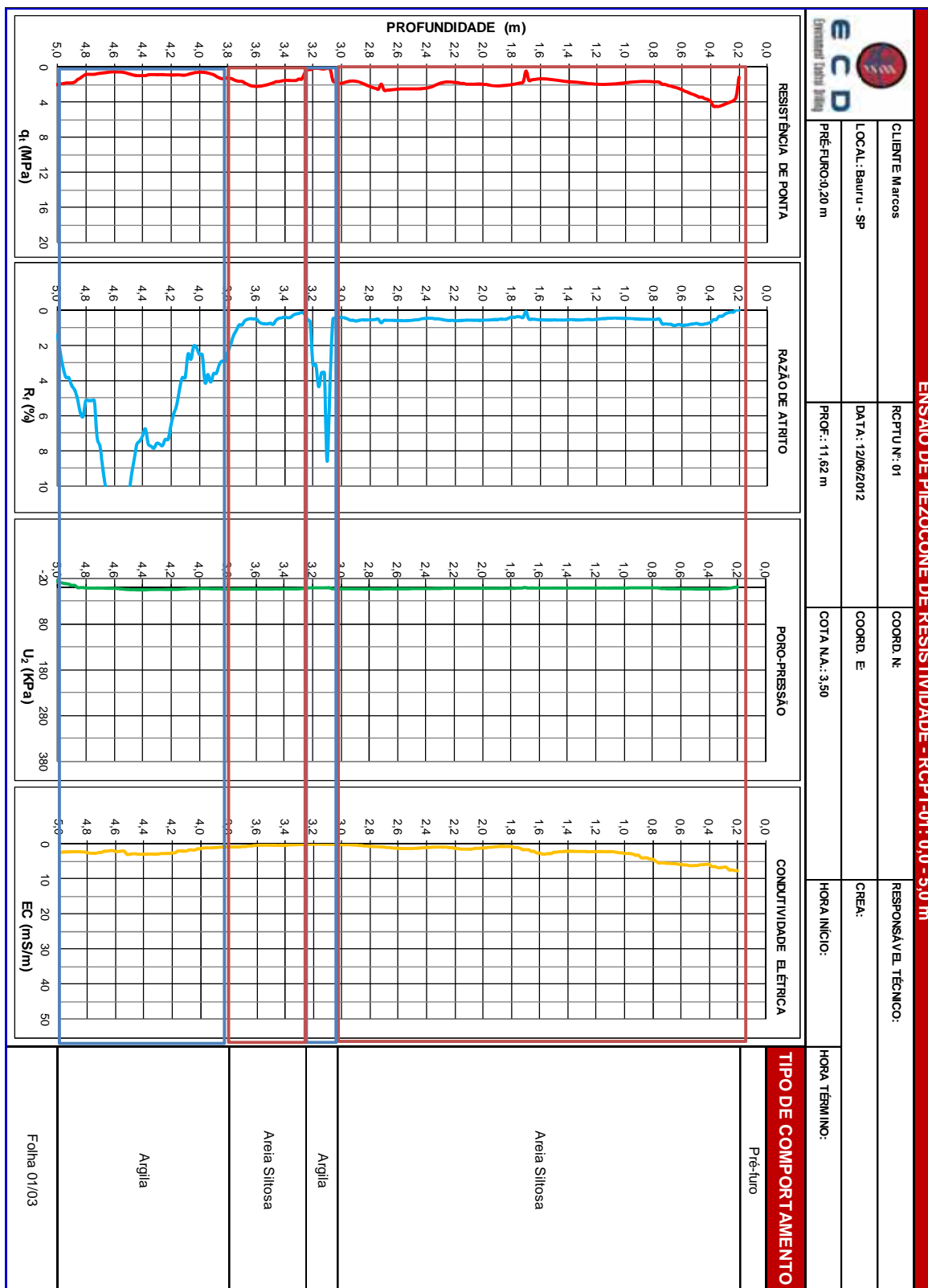


Figura 72 – Ensaio RCPT-01: 0,0m a 5,0 m

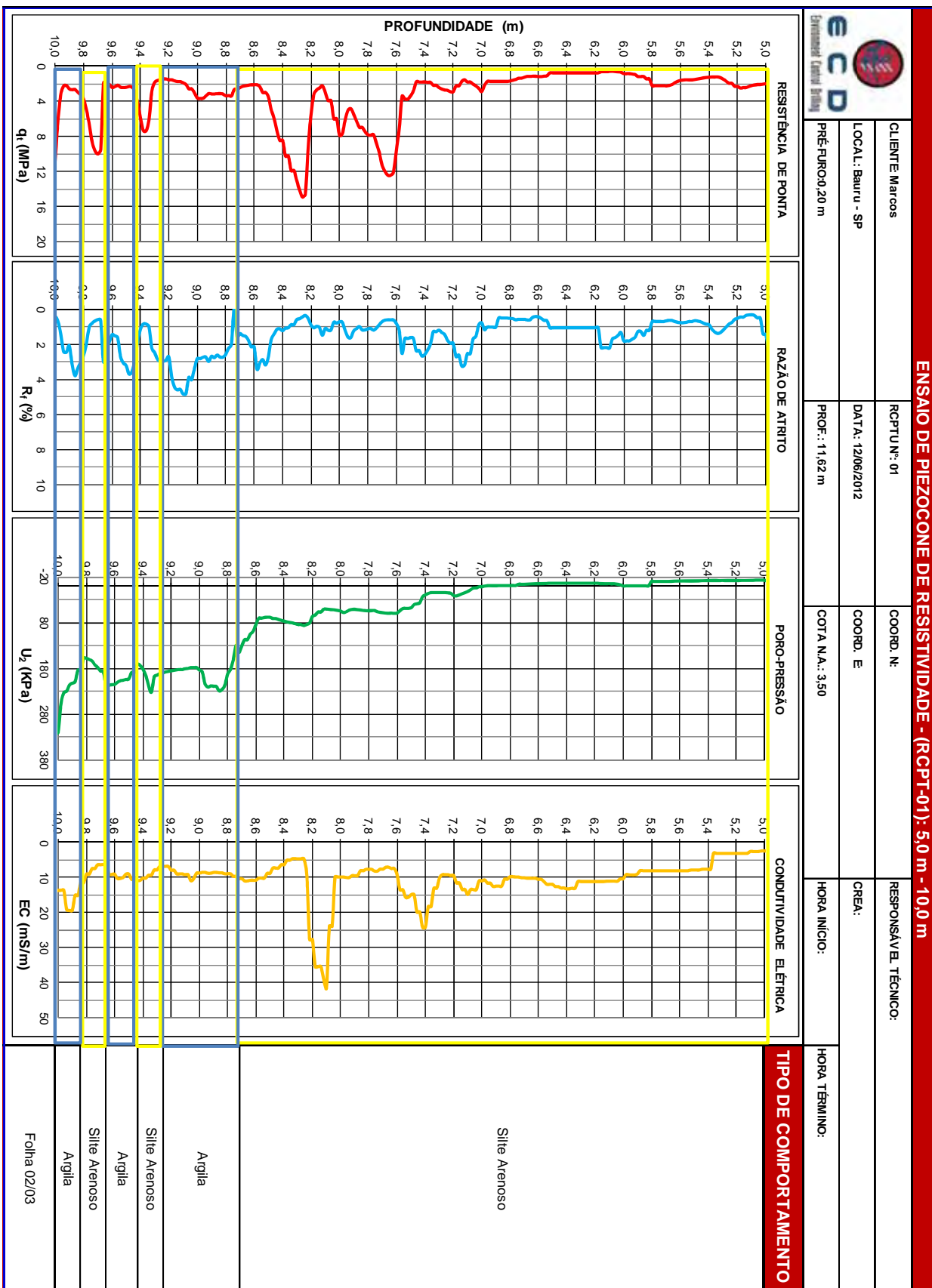


Figura 73 – Ensaio RCPT-01: 5,0m a 10,0 m

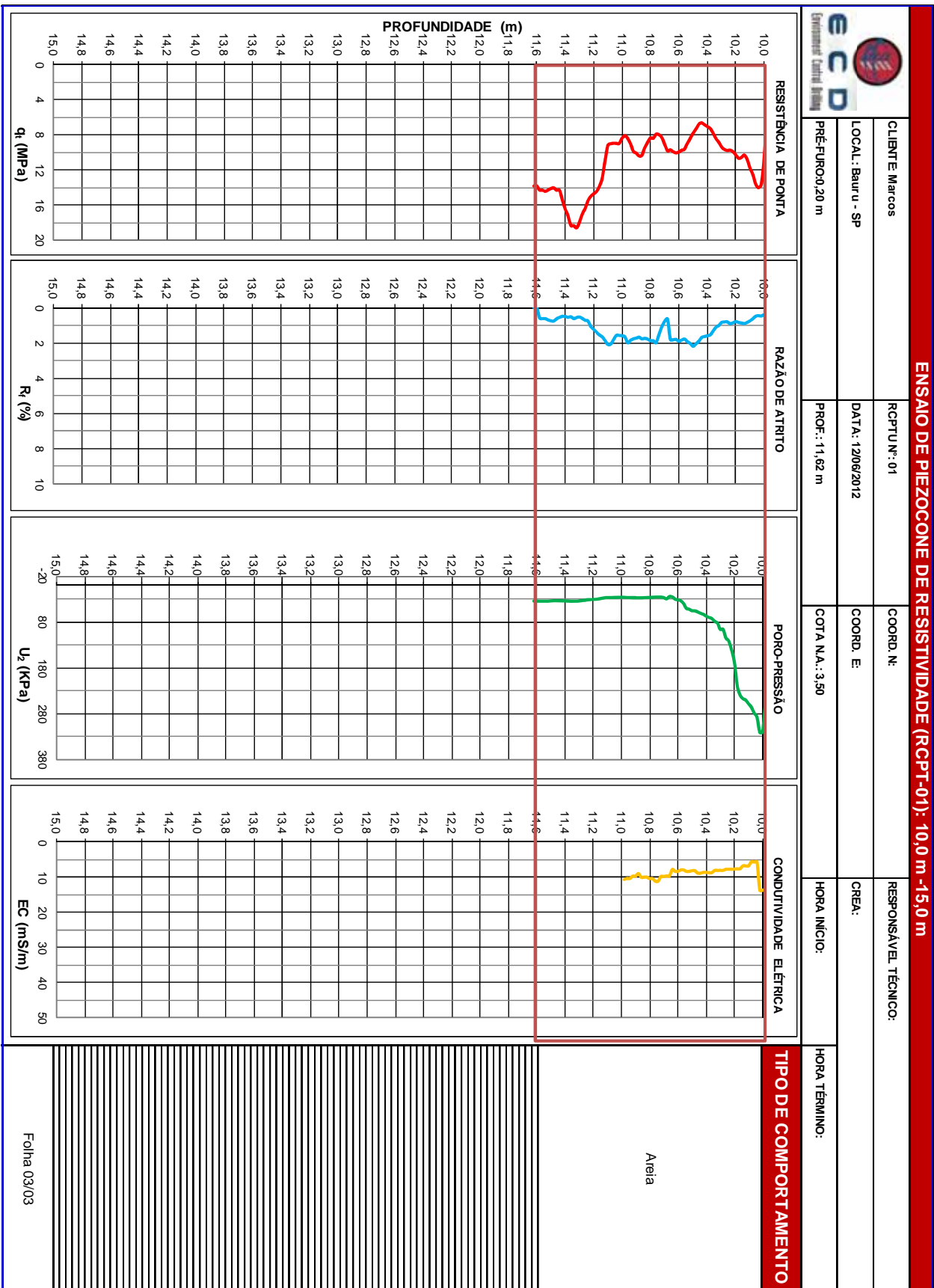


Figura 74 – Ensaio RCPT-01: 10,0m a 15,0 m

Observa-se que o sensor de resistividade apontou um aumento na condutividade elétrica aos 7,40 m e entre 8,00 m e 8,20 m. Esse aumento indica a presença de argilo-minerais em proporção maior que no restante do perfil, porém, a razão de atrito não aumentou, tampouco a poro pressão, por isso não foi interpretado como argila, uma vez que a interpretação detalhada se baseou no ábaco de Robertson et al (1986). Ao se observar a resistência de ponta, percebe-se que, nesses pontos indicados pela condutividade elétrica, houve um decréscimo significativo desse valor, corroborando o resultado do sensor de resistividade.

Outro detalhe a se observar é o aumento do valor da condutividade elétrica a partir da profundidade de 5,30, sem ocorrer alteração no valor de poro pressão (nem dos outros sensores). Esse é um indicador que nessa profundidade inicia-se a zona saturada, embora nas amostragens de solo por cravação contínua, os amostradores liners tenham mostrado água a partir de 4,00 m. Desta forma, o sensor de resistividade, nesse ponto, não identificou corretamente o nível d'água. Uma possível explicação para isso é que, entre 4,00 m e 5,30 m está a franja capilar (BERTOLO, 2007; NIELSEN, 2006), onde nem todos os poros estão preenchidos por água, por isso não foi adequadamente detectado pelo sensor de resistividade.

A interpretação detalhada do ensaio RCPT-02 está nas Figuras 75, 76 e 77.

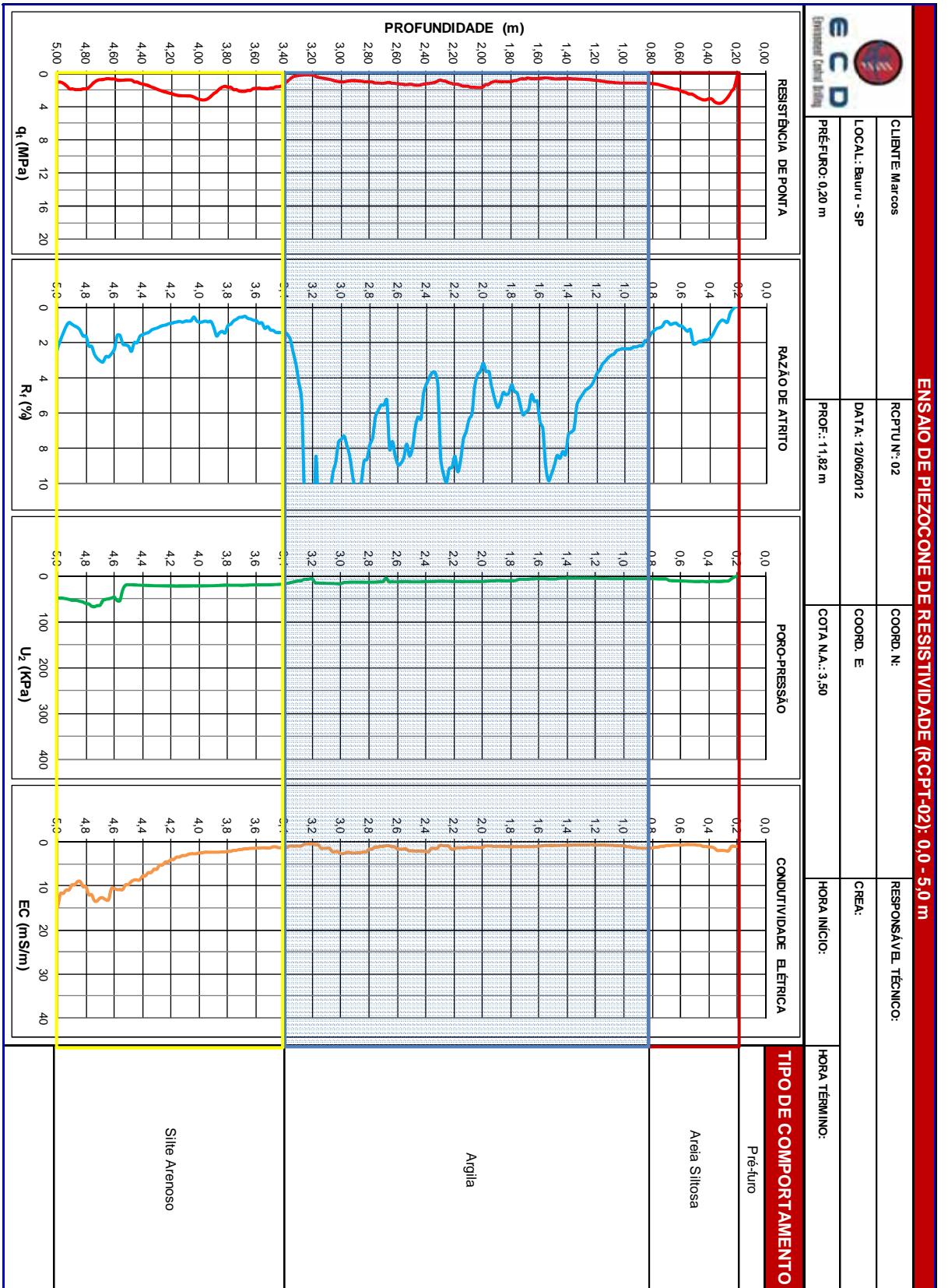


Figura 75 – Ensaio RCPT-02: 0,0m a 5,0 m

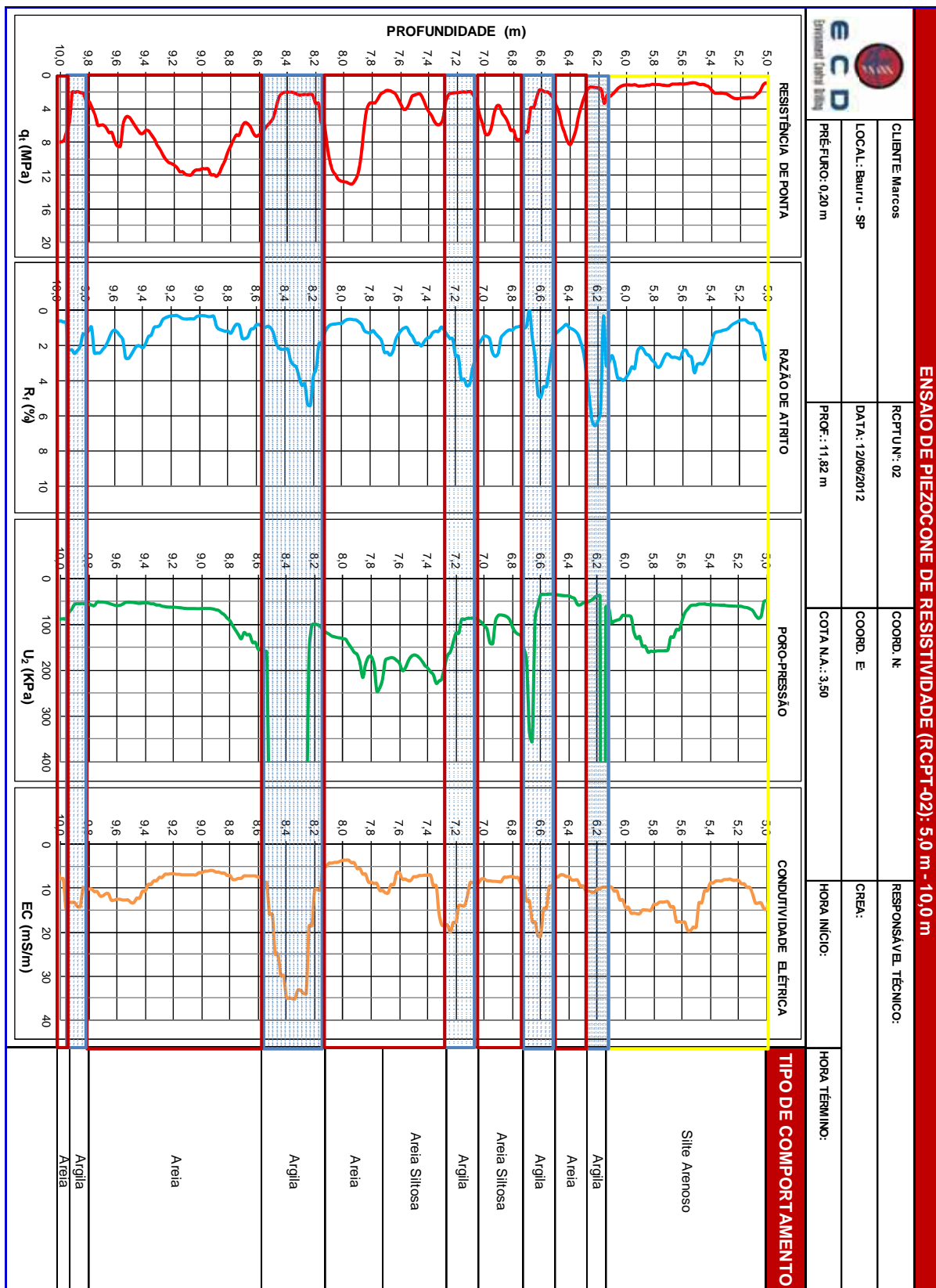


Figura 76 – Ensaio RCPT-02: 5,0m a 10,0 m

Nesse ensaio, pode-se observar que a condutividade elétrica inicia o seu aumento de valor a partir da profundidade de 4,0 m, aparentemente a posição do lençol freático. A profundidade no nível d'água no poço de monitoramento instalado nesse local (3,56 m) provavelmente indica a carga piezométrica média de toda a seção filtrante, o que inclui a franja capilar.

Um pequeno pico de condutividade elétrica pode ser observado entre 4,60 m e 4,80 m, coincidente com um aumento do valor da poro pressão e da razão de atrito, indicando uma lente de material mais argiloso, de condutividade hidráulica menor que nas imediações desse ponto (zona de armazenamento).

Os significativos aumentos dos valores de condutividade elétrica nas profundidades de 6,60 m, 7,20 m e (o mais expressivo), de 8,20-8,50 m são coerentes com significativos aumentos dos valores de poro pressão e razão de atrito, e significativa redução na resistência de ponta. A grande probabilidade é que sejam lentes de material argiloso, de baixa condutividade hidráulica e zonas de armazenamento, intermediadas por material arenoso, de alta condutividade hidráulica (zonas preferenciais de fluxo). O sensor de resistividade também detectou (coerente com o sensor de poro pressão), uma lente de material argiloso em 6,20 m, não considerado pela interpretação a partir de Robertson et al (1986), indicando que o referido sensor incrementa a identificação das heterogeneidades em escala de centímetros.

O sensor de resistividade também mostrou resultados coerentes com os demais sensores nas lentes de material argiloso em 10,30-10,50 m e entre 10,80-11,20 m.

A interpretação detalhada do ensaio RCPT-03 está nas Figuras 78, 79 e 80.

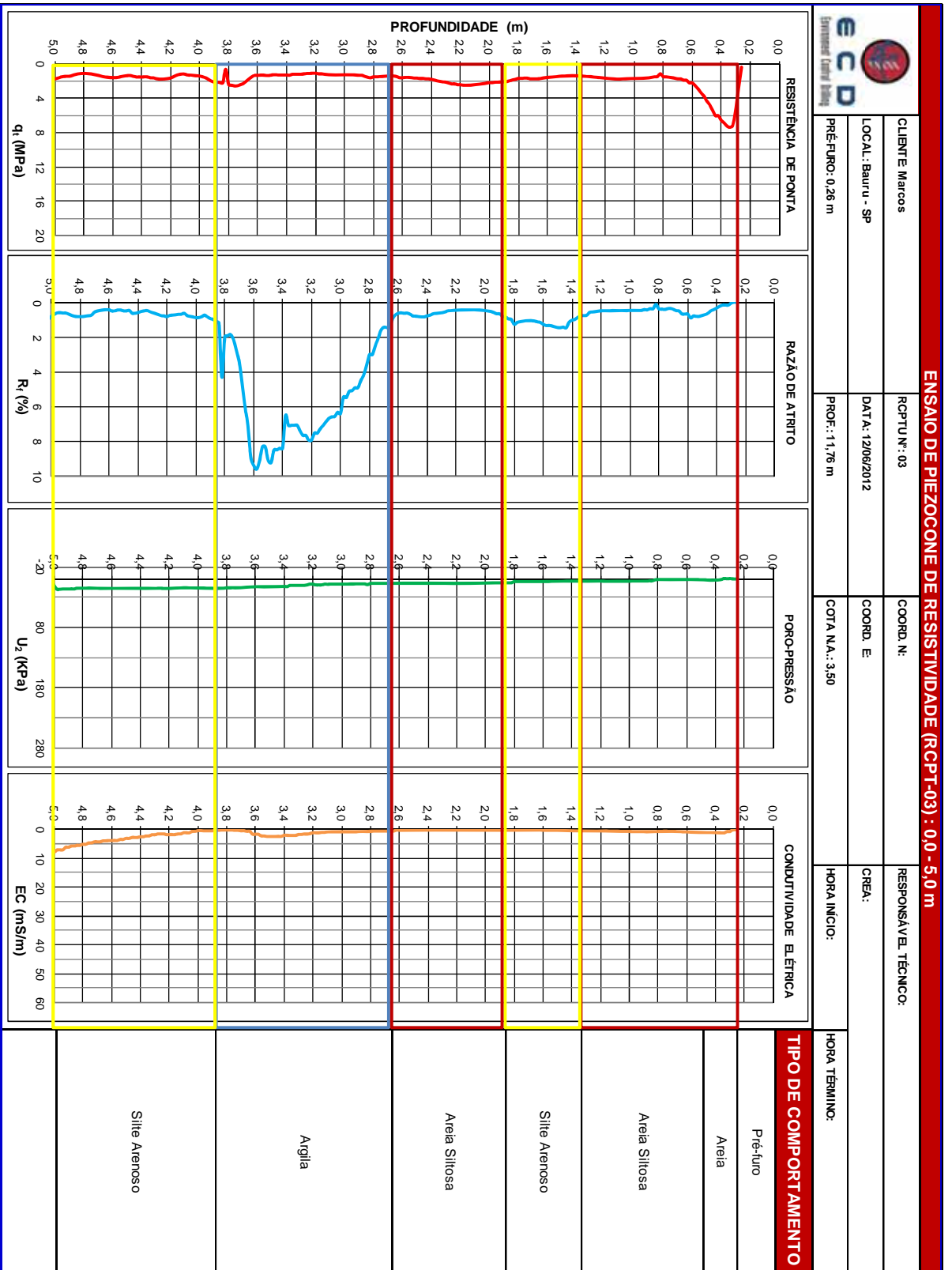


Figura 78 – Ensaio RCPT-03: 0,0m a 5,0 m

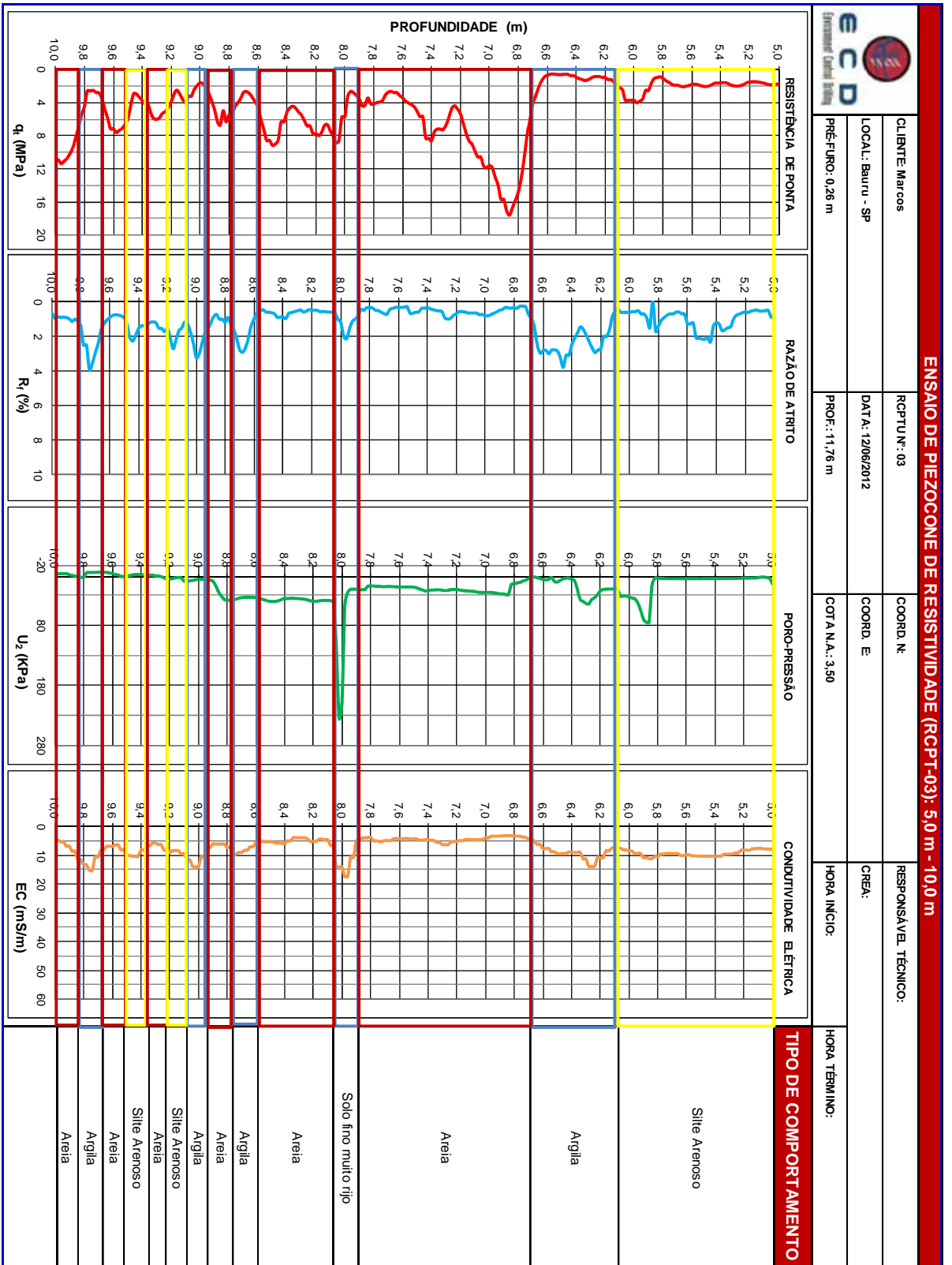


Figura 79 – Ensaio RCPT-03: 5,0m a 10,0 m

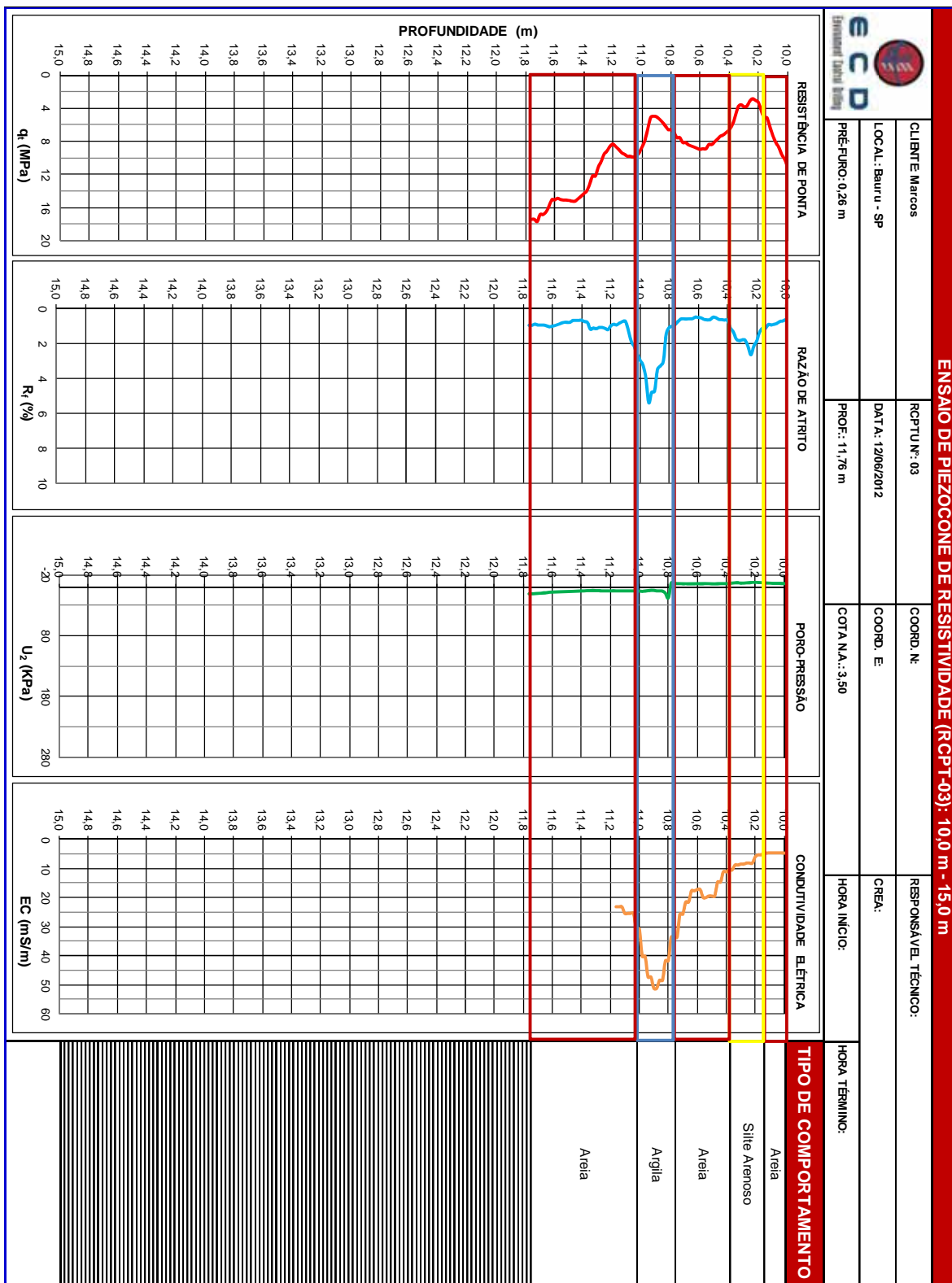


Figura 80 – Ensaio RCPT-03: 10,0m a 15,0 m

No ensaio RCPT-03, o sensor de resistividade mostrou um pequeno aumento nos valores de condutividade elétrica a partir de 4,80 m, indicando que essa é a posição do lençol freático, informação compatível (ver Tabela 2) com aquela encontrada no poço raso do par multinível instalado nesse ponto (PMN-03).

O sensor de resistividade indicou, de forma compatível com os demais sensores, as lentes de material argiloso nas profundidades de: 6,30 m, 8,00 m, 8,70 m, 9,00 m, 9,70 m e 10,80 m.

5.5 Poços de Monitoramento Multiníveis

Os resultados dos ensaios de RCPTu obtidos em campo permitiram elaborar o projeto da rede de monitoramento multinível, estabelecendo-se a posição mais apropriada para seção filtrante desses poços.

Na Figura 81, observa-se as lentes de argila identificadas no ensaio RCPT-02 (local correspondente à sondagem por cravação contínua DP-05).

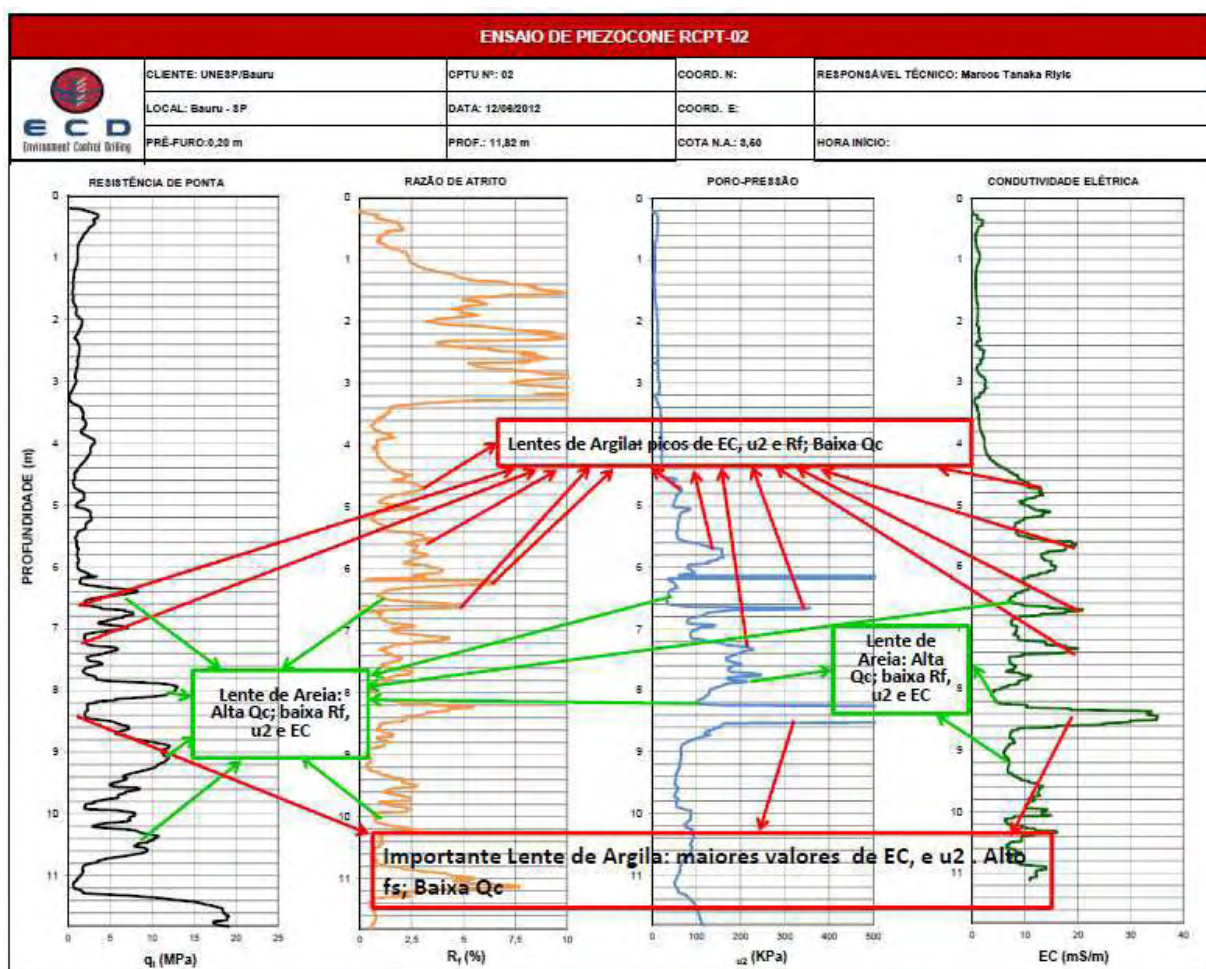


Figura 81 – Ensaio RCPT-02 com a interpretação

Pode-se verificar que essas lentes estão posicionadas nas profundidades de: 4,80 m, 5,80 m; 6,60 m e 8,50 m. A lente de argila que se encontra a 5,80 m de profundidade, de acordo com o resultado observado na Figura 81, é coerente com a amostra coletada no amostrador *liner* na sondagem DP-05, comprovando a eficácia do RCPTu como ferramenta para elaboração do perfil estratigráfico de alta resolução. As demais lentes, localizadas a 6,60m e a 8,50 m (essa é a mais relevante), não foram detectadas na amostragem por cravação contínua correspondente. Abaixo dessa última lente está claramente identificado um solo arenoso, com poro pressão hidrostática, baixa condutividade elétrica e alta expressiva na resistência de ponta. Nesse local, optou-se por instalar um par de poços multinível (PMN-01 e PMN-02) com o objetivo de comprovar a existência de fluxo vertical, o que, por sua vez, comprovaria a existência de um aquífero confinado e, conseqüentemente, das camadas confinantes de aquitarde. A seção filtrante rasa foi instalada no aquífero raso, entre 4,0 e 5,0 metros de profundidade e a seção filtrante profunda foi instalada abaixo das lentes de argila, que estariam confinando um aquífero mais profundo. Essa seção filtrante foi instalada entre 8,80 e 9,80 metros.

Nas figuras 82 e 83 pode-se observar a localização dos poços multiníveis e os ensaios de RCPTu correspondentes.

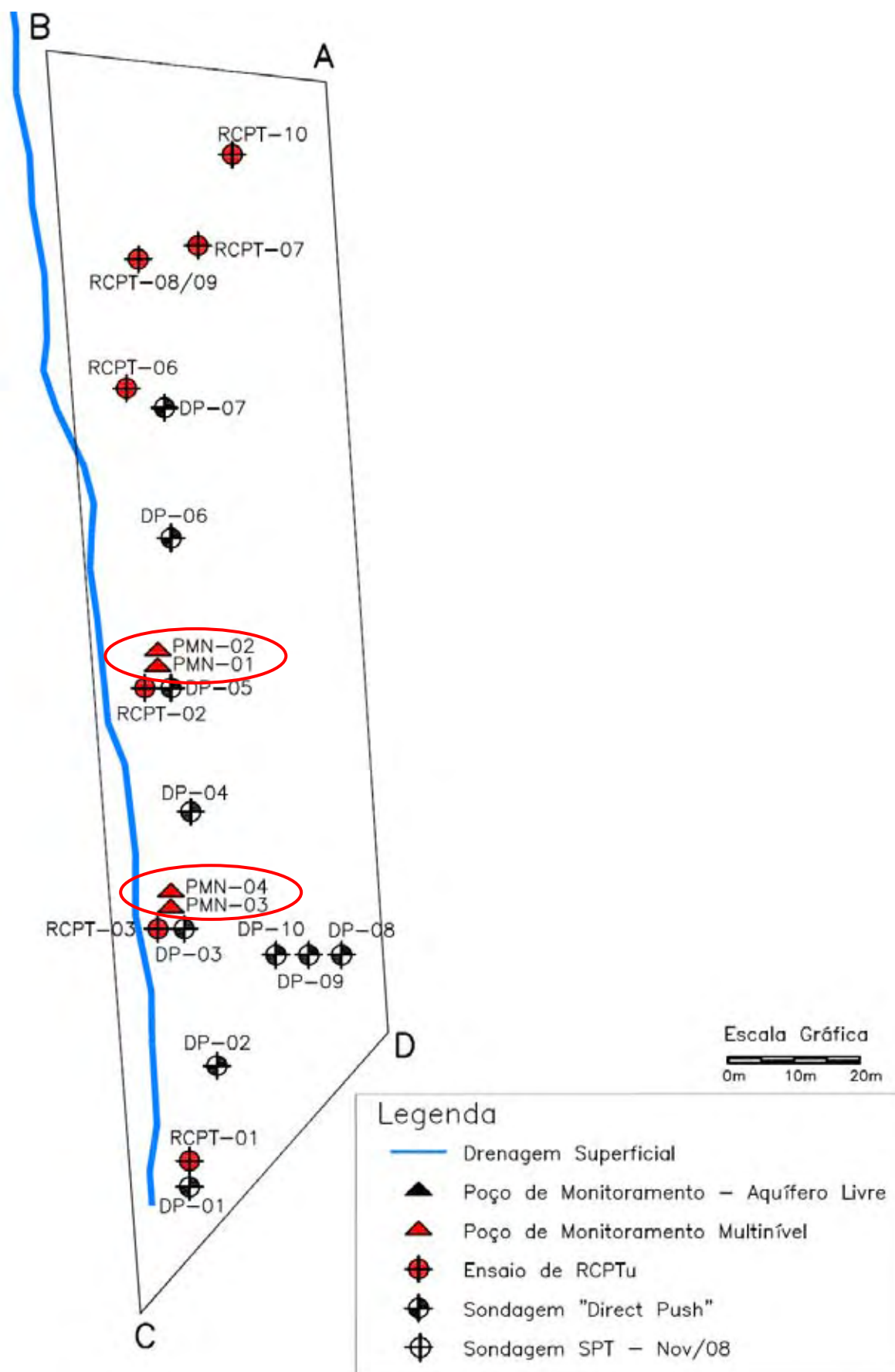


Figura 82 – Posicionamento dos poços multiníveis – visão geral

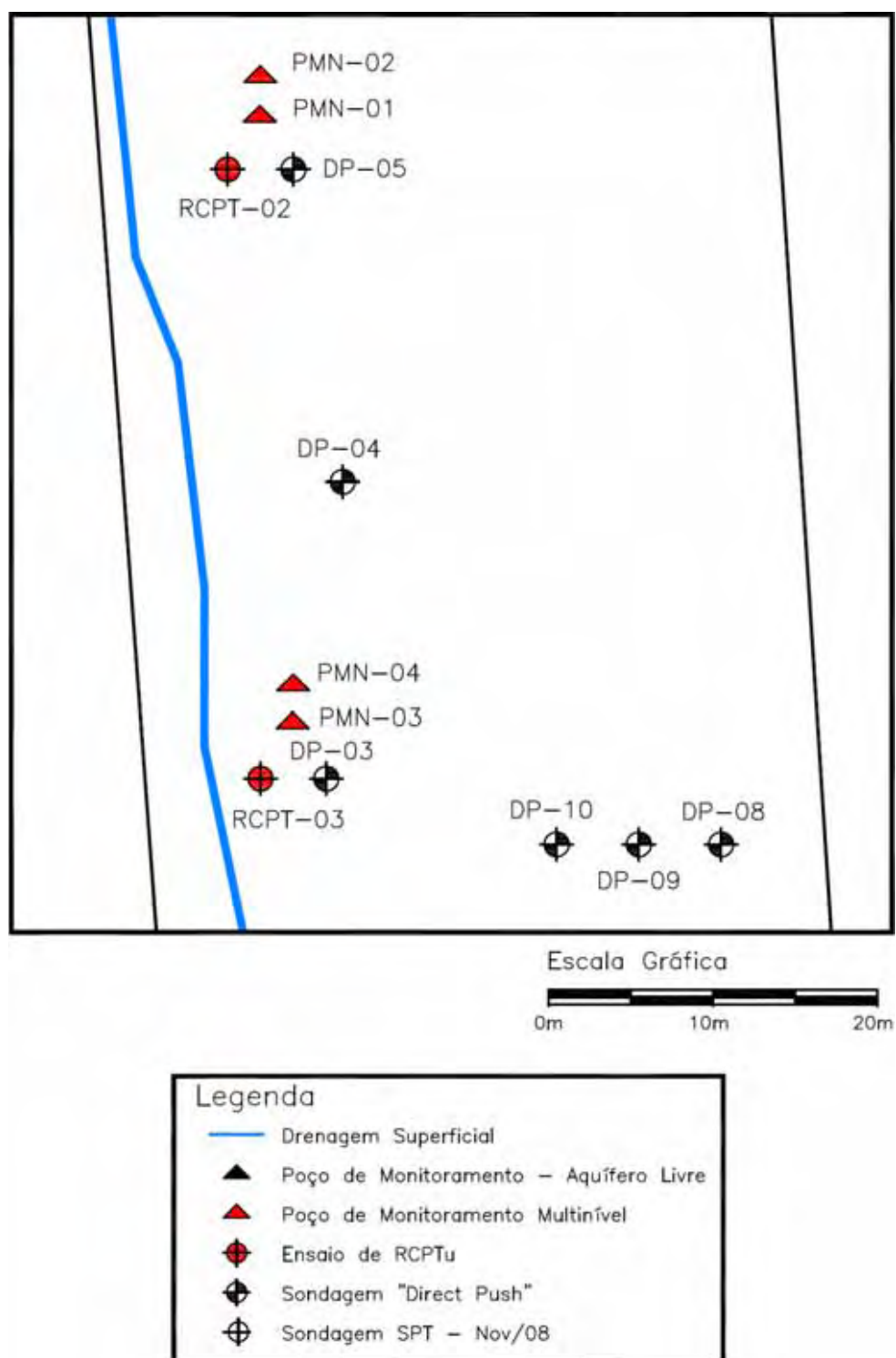


Figura 83 – Posicionamento dos poços multiníveis

Após 24 horas do desenvolvimento dos poços, mediu-se o nível de água em cada poço instalado e a diferença de cota entre cada poço para calcular a carga hidráulica dos poços e, conseqüentemente, se havia fluxo vertical. Os dados estão na Tabela 1

Tabela 1 - Par Multinível PMN-01 x PMN-02

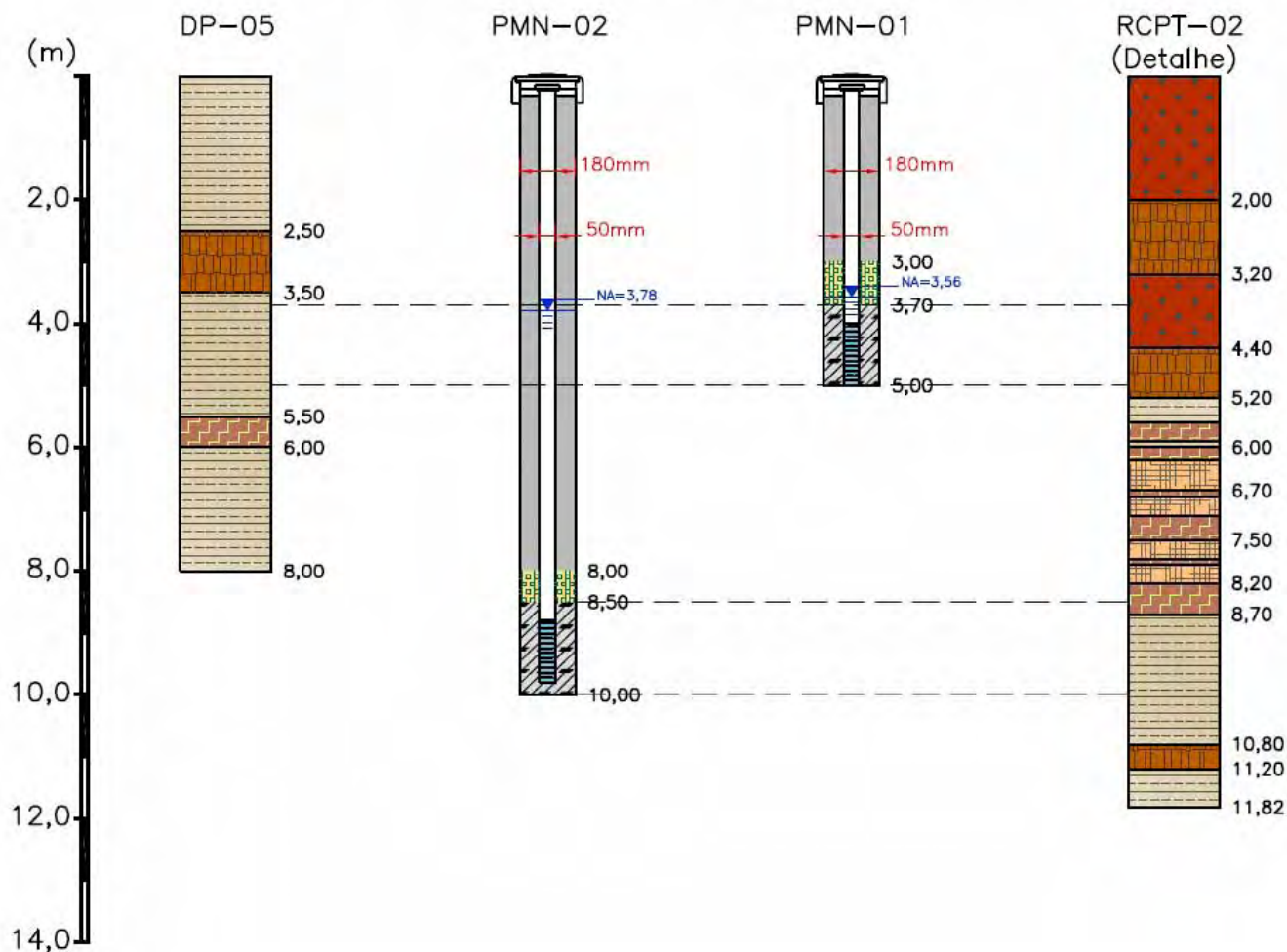
Poço	Profundidade	Cota Relativa (m)	Nível de Água (m)	Carga Hidráulica (m)
PMN-01	5,00	100,00	3,56	96,44
PMN-02	10,00	99,80	3,78	96,02

Pode-se observar que esse a Carga Hidráulica no PMN-01 é significativamente maior que no PMN-02 (0,42 m.c.a.), indicando que há fluxo no sentido do PMN-01 para o PMN-02, ou seja, do aquífero livre (superior) para o confinado (inferior).

Ao considerar uma distância de 5,00 m entre o ponto médio das seções filtrantes do poço raso (PMN-01: 4,50 m) e do poço profundo (PMN-02: 9,50 m), tem-se um gradiente hidráulico de 0,084 m/m. Trata-se de um gradiente expressivo, mas de significado menor que a diferença de carga hidráulica (BERTOLO, 2007), mas corrobora a premissa que existem dois aquíferos diferentes e que há um fluxo descendente

Esse fluxo é descendente e a existência dele comprova que há um aquífero confinado, conseqüentemente as camadas de argila funcionam como um aquitarde, comprovando a hipótese elaborada previamente. Os perfis construtivos dos dois poços multiníveis, comparados com o perfil litológico nesse ponto obtido pela sondagem por cravação contínua e pelo ensaio do RCPTu interpretado em detalhe (sem o uso do ábaco) estão na Figura 84. Observa-se que a seção filtrante do PMN-01 está posicionada acima das camadas de argila plástica, e a do PMN-02 está na areia, abaixo das camadas de argila plástica.

Modelo Conceitual Hidrogeológico: Par Multinível 1-2



Legenda:

	Areia Fina Argilosa		Argila Arenosa		Pré-Filtro 0,6-1,5mm
	Areia Fina Siltosa		Argila Plástica		Selo Bentonita em Pellets
	Areia Média		Argila Siltosa		Calda de Cimento e Bentonita
			Silte Argiloso		Seção Filtrante do Poço

Jun/12

Figura 84 – Perfis construtivos dos poços multiníveis PMN-01 e PMN-02 e comparação com o perfil obtido a partir da sondagem por cravação contínua (à esquerda) e do ensaio RCPTu (à direita)

Outro local em que foram instalados poços multiníveis foi próximo ao ponto em que foi realizado o ensaio RCPT-03, mesmo local da sondagem por cravação contínua DP-03.

A Figura 85 mostra os resultados do ensaio RCPTu cuja interpretação do perfil obtido indicou o posicionamento das seções filtrantes dos poços.

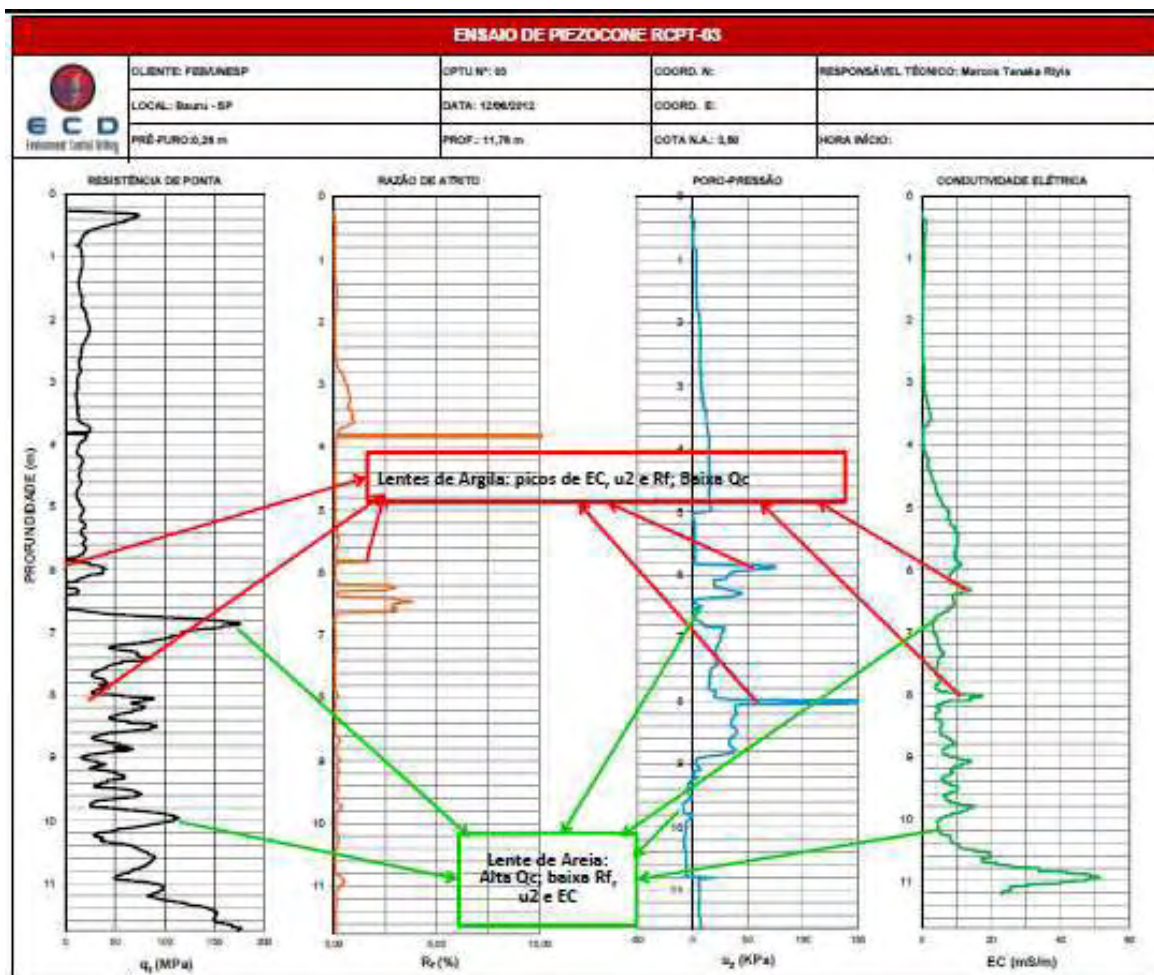


Figura 85 – Ensaio RCPT-03 com interpretação

Nesse ponto, observa-se uma camada com lentes de argila entre 5,80 e 6,60 m, e uma lente expressiva, mas pontual, em cerca de 8,0 m de profundidade. Esse ensaio não mostra essas lentes de modo tão pronunciado quanto o anterior (RCPT-02), porém, indica a presença de lentes de argila que não foram encontradas na sondagem DP-07, realizada no mesmo ponto.

As seções filtrantes dos dois poços que compõem o par multinível nesse ponto (PMN-03 e PMN-04) foram colocadas: De 3,80 m a 4,80 m (poço raso – PMN-03) e 7,80 m a 8,80 m (poço profundo – PMN-04). A tentativa inicial era instalar esse poço com seção filtrante entre 8,50 m e 9,50 m, porém, a equipe não conseguiu posicionar

exatamente na profundidade desejada por problemas decorrentes do processo de sondagem: excesso de pressão hidráulica ascendente na camada de areia mais condutiva localizada abaixo dos 9,00 metros. Essa pressão hidráulica ascendente carregava material para dentro dos trados ocios no momento do rompimento do tampão inferior, de modo que o tubo não conseguia ficar na posição desejada. A profundidade que ele foi instalado é suficiente para testar a hipótese, uma vez que a maior parte da sua seção filtrante está colocada na camada de interesse. A hipótese testada era que essas duas seções filtrantes estão colocadas em dois aquíferos diferentes, sendo que o inferior estaria confinado. Pelo resultado do ensaio RCPTu, havia duas camadas confinantes entre os dois aquíferos.

Após 24 horas do desenvolvimento dos poços, mediu-se o nível de água em cada poço instalado e a diferença de cota entre cada poço para calcular a carga hidráulica nos poços e, conseqüentemente, se havia fluxo vertical. Os dados estão na Tabela 2:

Tabela 2 - Par Multinível PMN-03 x PMN-04

Poço	Profundidade	Cota Relativa (m)	Nível de Água (m)	Carga Hidráulica (m)
PMN-03	5,00	100,00	4,72	95,28
PMN-04	9,03	99,80	4,86	94,94

Pode-se observar que esse a Carga Hidráulica no PMN-03 é maior que no PMN-04 (diferença de 0,34 m.c.a.), indicando que há fluxo no sentido do PMN-03 para o PMN-04, ou seja, do aquífero livre (superior) para o confinado (inferior), da mesma forma que no par PMN-01/02.

Da mesma forma que no outro par multinível, observa-se que esse fluxo é descendente, e a existência dele comprova que há um aquífero confinado, conseqüentemente, as camadas de argila também funcionam como um aquitarde, comprovando a hipótese elaborada previamente.

Ao considerar uma distância de 4,00 m entre o ponto médio das seções filtrantes do poço raso (PMN-03: 4,30 m) e do poço profundo (PMN-04: 8,30 m), tem-se um gradiente hidráulico de 0,085 m/m. Trata-se também de um gradiente expressivo, mas, da mesma forma que o par multinível PMN-01/02, de significado menor que a diferença de carga hidráulica (BERTOLO, 2007), mas corrobora a premissa que existem dois aquíferos diferentes e que há um fluxo descendente

Os perfis construtivos dos dois poços multiníveis, comparados com o perfil estratigráfico nesse ponto obtido pela sondagem por cravação contínua e pelo ensaio do RCPTu interpretado em detalhe (sem o uso do ábaco) estão na Figura 86.

Em novembro/2012, realizou-se ensaios hidrogeológicos tipo *bail tests* nesse par multinível. Os ensaios não foram realizados no par multinível PMN-01/02 pelo fato desses poços terem sido destruídos no período entre junho (instalação) e novembro (ensaio hidrogeológicos).

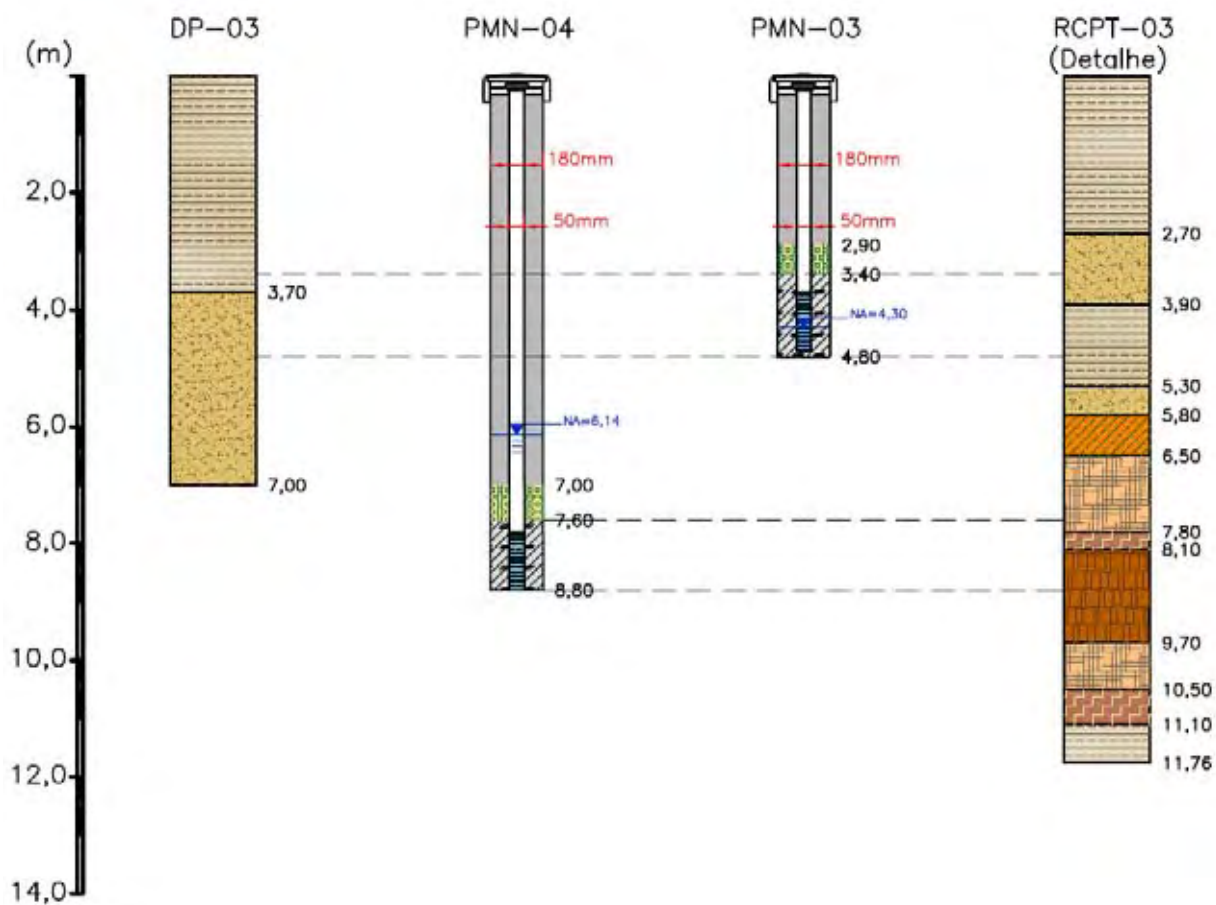
Os resultados interpretados pelo software Aquifer Test utilizando o método Hvorslev previamente descritos estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Condutividade Hidráulica após Ensaio Hidrogeológicos

Poço	Condutividade Hidráulica (m/s)
PMN-03	$3,07 \times 10^{-6}$
PMN-04	$2,91 \times 10^{-7}$

Observa-se que o poço mais raso do par (PMN-03) possui condutividade hidráulica 1 ordem de grandeza maior que o poço mais profundo (PMN-04) indicando que são 2 aquíferos diferentes não interconectados.

Modelo Conceitual Hidrogeológico: Par Multinível 3-4



Jun/12

Figura 86 – Perfis construtivos dos poços multiníveis PMN-03 e PMN-04 e comparação com o perfil obtido a partir da sondagem por cravação contínua (esq) e do ensaio RCPTu (dir)

O modelo conceitual ao final dessa etapa, que está representado na Figura 87, ficou com menos incertezas. Assim, pode-se afirmar o seguinte sobre a área estudada:

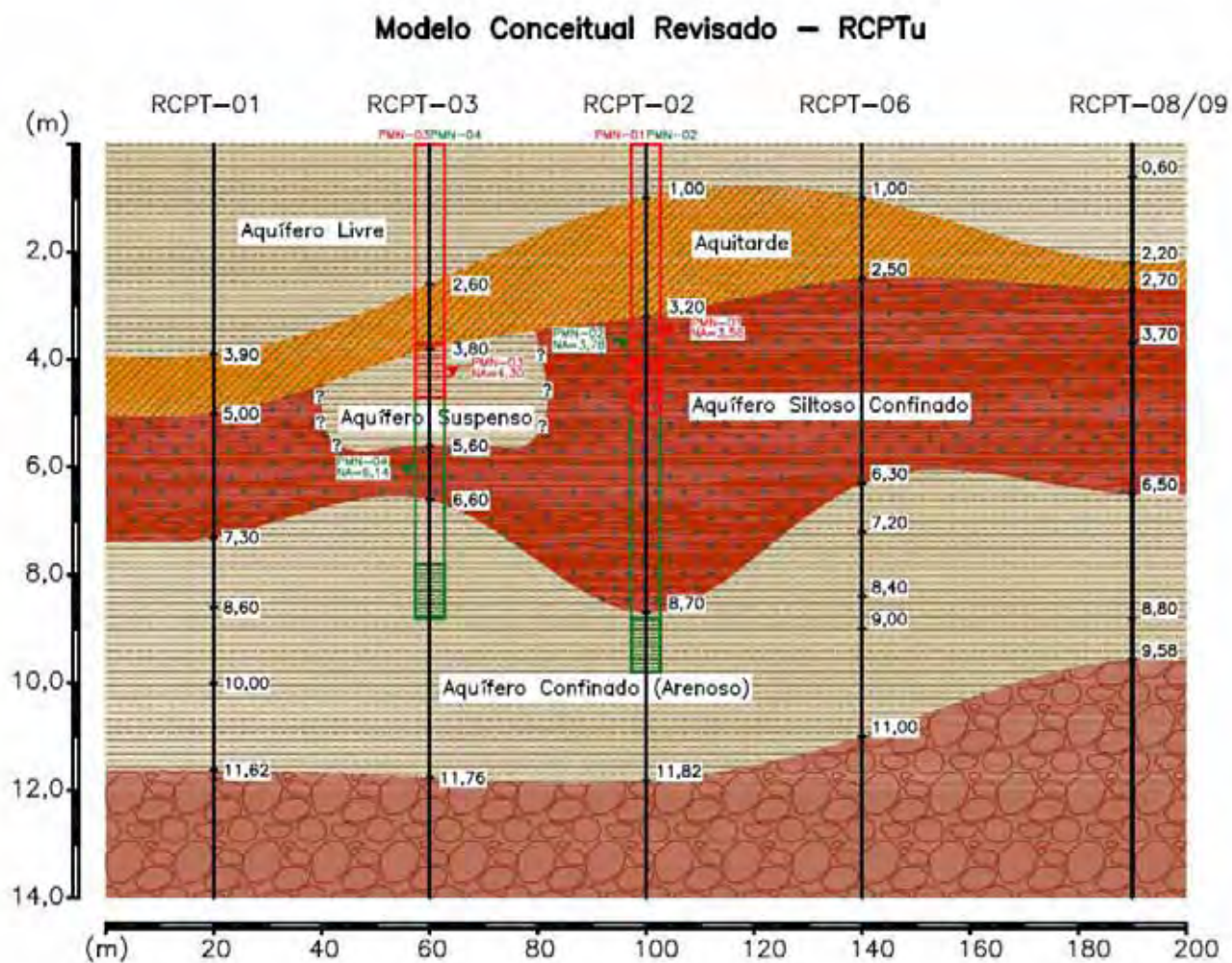


Figura 87 – Novo Modelo Conceitual revisado após a instalação dos poços multiníveis

- A área possui solo predominantemente arenoso.
- Na camada superficial, existe um solo de baixa resistência, composto principalmente por areia fina, normalmente siltosa, com baixa resistência de ponta e alta permeabilidade.

- O nível d'água do aquífero livre está em torno de 4,0 metros e a formação predominante nesse aquífero livre é areia siltosa.
- O solo é bastante heterogêneo, com muitas camadas de diferentes condutividades hidráulicas, mas pode-se observar pelo menos uma camada contínua de solo argiloso, que confina um aquífero profundo (entre 9-12 metros) com granulometria grossa, aparentemente uma alteração de rocha.
- Em diversos pontos ao longo do perfil, é possível observar lentes de material argiloso, possivelmente confinando aquíferos suspensos, mas esses precisam ainda ser comprovados com outros estudos e um novo refinamento do modelo conceitual.
- O topo rochoso aparece entre 10 e 12 metros, de acordo com a sondagem pelo método dos Tradados Ocos Helicoidais e confirmado nos ensaios RCPTu.
- Existe um fluxo vertical descendente com diferença de carga variada ao longo do perfil, mas é uma diferença expressiva, indicando que há um fluxo preferencial descendente da água subterrânea nessa área.
- No caso de ocorrer a presença de contaminação, essa deverá ser investigada em todos os estratos do perfil, especialmente no aquífero inferior.

5.6 Poços de Monitoramento Aquífero Livre

Com o objetivo de monitorar-se o aquífero livre e verificar qual a direção preferencial de fluxo horizontal nesse aquífero livre, instalou-se 03 poços de monitoramento na região distal da área de estudo, conforme pode ser observado nas Figuras 88 e 89.

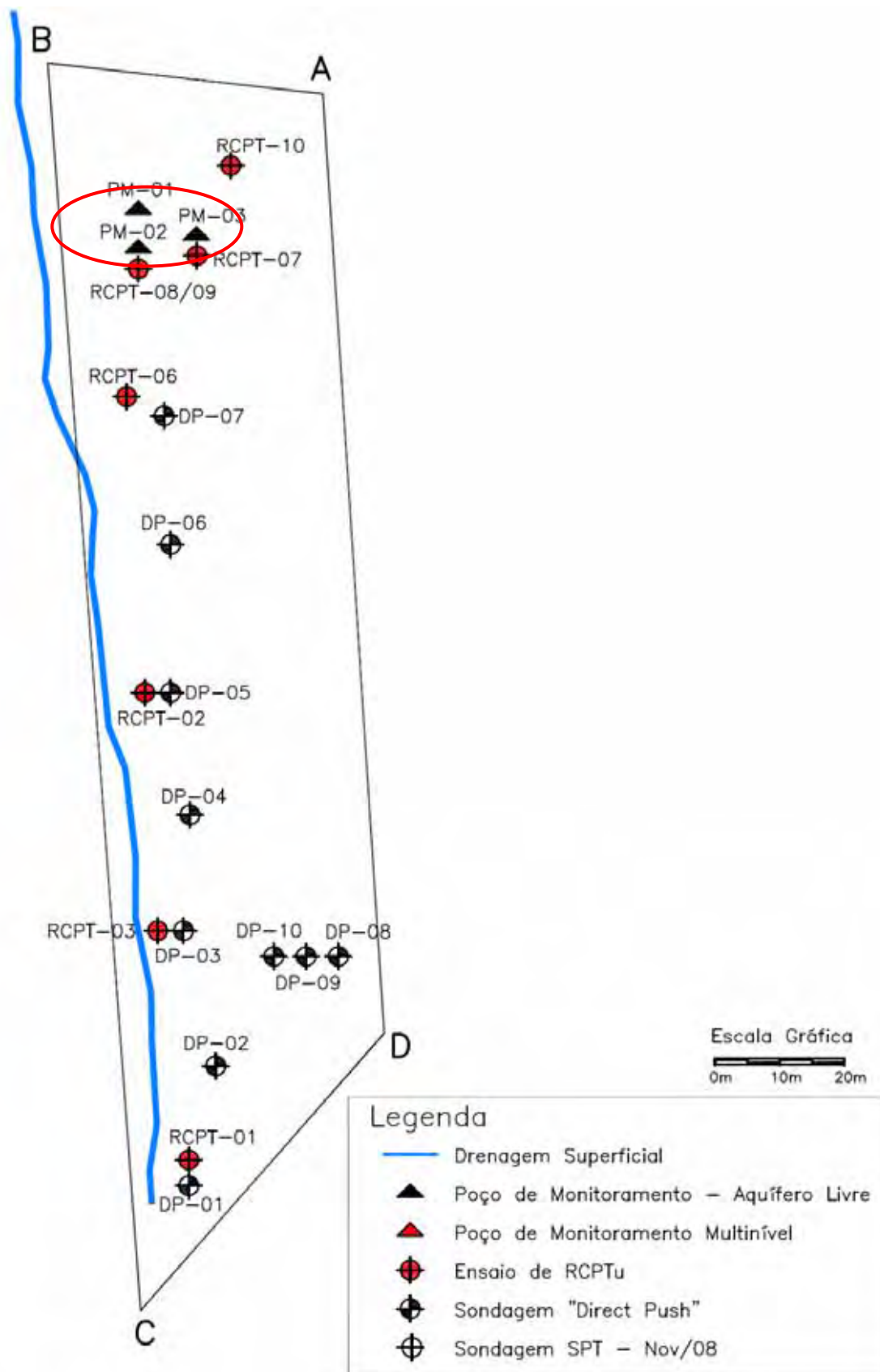


Figura 88 – Posicionamento dos poços de monitoramento do aquífero livre – Visão geral

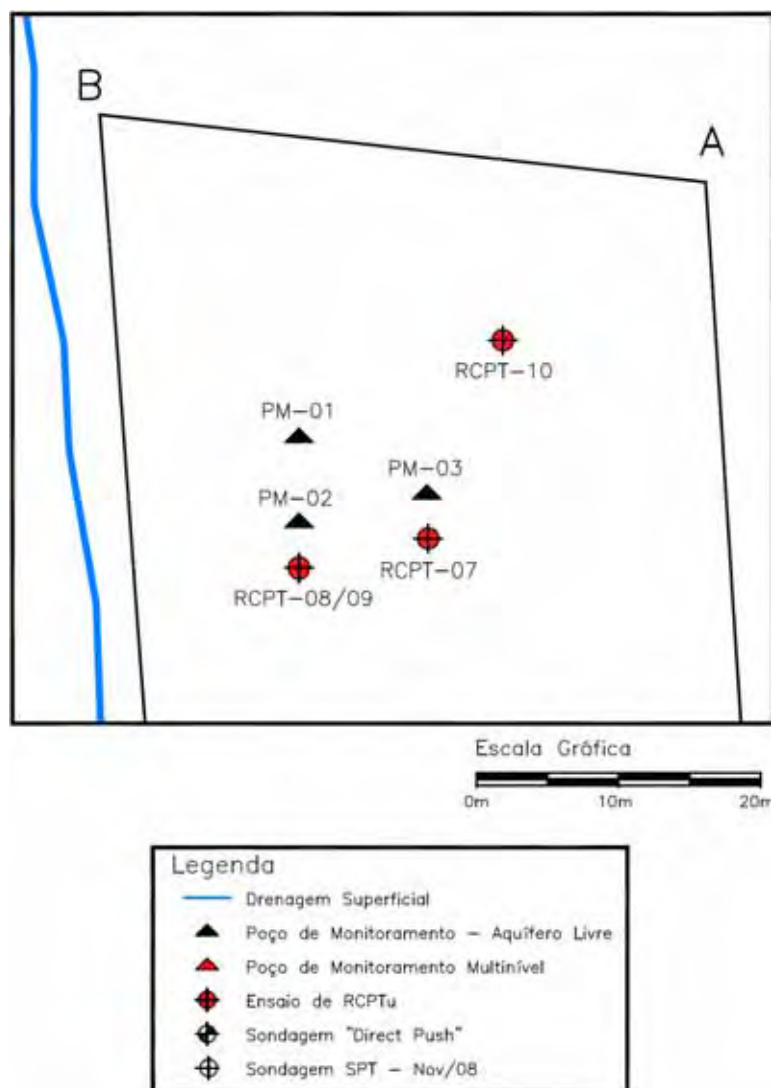


Figura 89 – Posicionamento dos poços de monitoramento do aquífero livre – Visão detalhada

Esses poços foram instalados com a Sonda Hidráulica acoplada ao Trator e com os trados sólidos helicoidais. Para que fosse possível instalação, a composição tinha que ser totalmente retirada e o poço, então, instalado com o furo aberto.

Os poços foram instalados de acordo com a Norma NBR 15.495-1 e Desenvolvidos de acordo com a norma NBR 15.495-2. Foram utilizados tubos-filtro com abertura de ranhuras da seção filtrante de 0,50 mm e pré-filtro com granulometria de 1,5-3,0 mm. Esse conjunto filtro/pré-filtro é indicado para formações arenosas (ABNT, 2007), e o modelo conceitual da área apontava para essa formação.

Posteriormente, percebeu-se que os três poços foram realmente instalados no aquífero livre, e que a carga hidráulica medida neles confirma o que era esperado: um fluxo na direção do condomínio para a drenagem e da rua para o fundo da área. A carga

hidráulica foi medida descontando-se o nível d'água estabilizado (medido 24 horas após o desenvolvimento dos poços) da cota relativa desses poços. Os resultados estão na Tabela 3

Tabela 4 – Cargas Hidráulicas dos poços do aquífero livre

Poço	Profundidade	Cota Relativa (m)	Nível de Água (m)	Carga Hidráulica (m)
PM-01	4,52	99,74	3,05	96,69
PM-02	4,59	99,90	2,97	96,93
PM-03	4,41	100,00	3,08	96,92

Em novembro/2012, foram realizados ensaios hidrogeológicos tipo “*Bail Test*” (OLIVA, 2005; BERTOLO, 2007) nos três poços, e após cálculo da condutividade hidráulica pelo método Hroslev através do software “Aquifer Test”, previamente descritos no item 4.2.5, e foram obtidas as seguintes condutividades hidráulicas (Tabela 4):

Tabela 5 – Condutividade Hidráulica dos poços do aquífero raso

Poço	k (m/s)
PM-01	$1,58 \times 10^{-5}$
PM-02	$5,33 \times 10^{-6}$
PM-03	$5,82 \times 10^{-6}$

Observa-se que os valores são semelhantes (o PM-02 e PM-03 têm praticamente a mesma condutividade hidráulica e o PM-01 é mais condutivo em menos de 1 ordem de grandeza), indicando que os três poços estão instalados no mesmo pacote hidrogeológico, como era de se esperar.

5.7 Ensaios RCPTu Adicionais

Foram realizados mais quatro ensaios RCPTu na área, para refinar ainda mais o modelo conceitual.

O Ensaio RCPT-07 foi realizado ao lado do PM-03, para que se obtivesse um perfil estratigráfico adequado desse poço, uma vez que foi somente perfurado e instalado, sem que tivesse sido realizada uma amostragem de solo concomitante. Nesse ensaio, efetuou-se um ensaio de dissipação de poro-pressão quando essa apontou excesso (em torno de 5,0

m.c.a). Esse ensaio foi interrompido com 5,14 m de profundidade porque a ponteira aparentemente encontrou algum material inesperado, que a levou a uma inclinação súbita e concomitante excesso de resistência de ponta, acima do limite do sensor de resistência de ponta.

O Ensaio RCPT-08 foi realizado ao lado do PM-02, com o mesmo objetivo do ensaio anterior. Esse ensaio foi interrompido com 4,72 m devido a uma queda de energia da bateria alimentadora do sistema de aquisição de dados. Quando o problema foi sanado, optou-se por continuar cravando a ponteira no mesmo local, efetuando um novo ensaio (RCPT-09) e considerar o ensaio RCPT-08 como pré-furo. Tem-se, então, o ensaio RCPT-08/09 que foi até 9,58 m de profundidade.

O último ensaio de RCPTu foi realizado um pouco mais à montante dos demais, na direção do condomínio e foi denominado RCPT-10. Esse ensaio parou em 10,28 m de profundidade, quando parou devido ao encontro da ponteira com algum material impenetrável, provavelmente o topo rochoso.

Esse ensaio RCPT-10 pode ser visto na Figura 90. Observa-se que, entre 6,60 m e 7,20 m, o sensor de resistividade detectou dois picos de alta condutividade elétrica, nas mesmas profundidades em que o sensor de poro pressão obteve um pico e o sensor de resistência de ponta mostrou valores bem inferiores aos das imediações. Esse conjunto indica que são duas pequenas lentes de material argiloso, de condutividade hidráulica significativamente menor e, conseqüentemente, zonas preferenciais de armazenamento, intercaladas por uma fina lente de material arenoso, uma zona preferencial de fluxo. Essa heterogeneidade local não teria sido identificada pelos métodos tradicionais de investigação, devido à pequena escala em que se apresentam, mas seriam de importância vital para a elaboração do Modelo Conceitual Hidrogeológico da área.

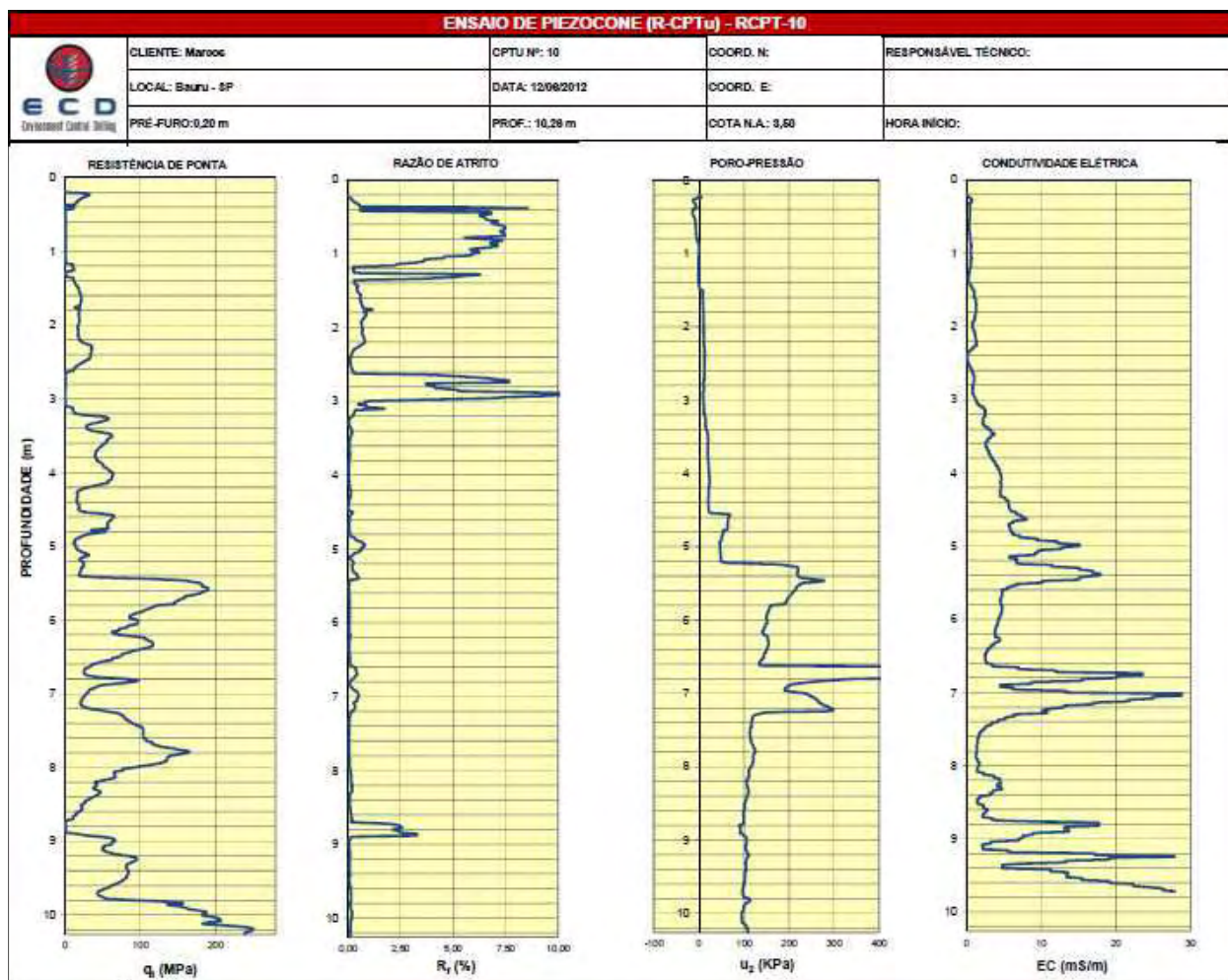


Figura 90 – Ensaio RCPT-10 interpretado

Ao final dessas duas últimas etapas, pôde-se refinar ainda mais o modelo conceitual da área, ao se confirmar a presença do aquífero livre, com granulometria média, alta capacidade de recarga nos poços indicando condutividade hidráulica média/alta, compatível com o solo da formação, direção preferencial do fluxo horizontal compatível com a drenagem superficial que atravessa a área de estudo. Ao se observar a área da rua para o fundo, percebe-se que o solo vai se tornando cada vez mais estratificado e heterogêneo, o solo superficial passa de areia siltosa para silte, e as lentes de material argiloso vão aparecendo em maior número em subsuperfície, porém, o aquífero livre parece totalmente interconectado, com condutividade hidráulica semelhante em toda a extensão da área. O modelo conceitual hidrogeológico da área fundo está representado na Figura 91.

Modelo Conceitual Hidrogeológico: Aquífero Raso – Área Fundo

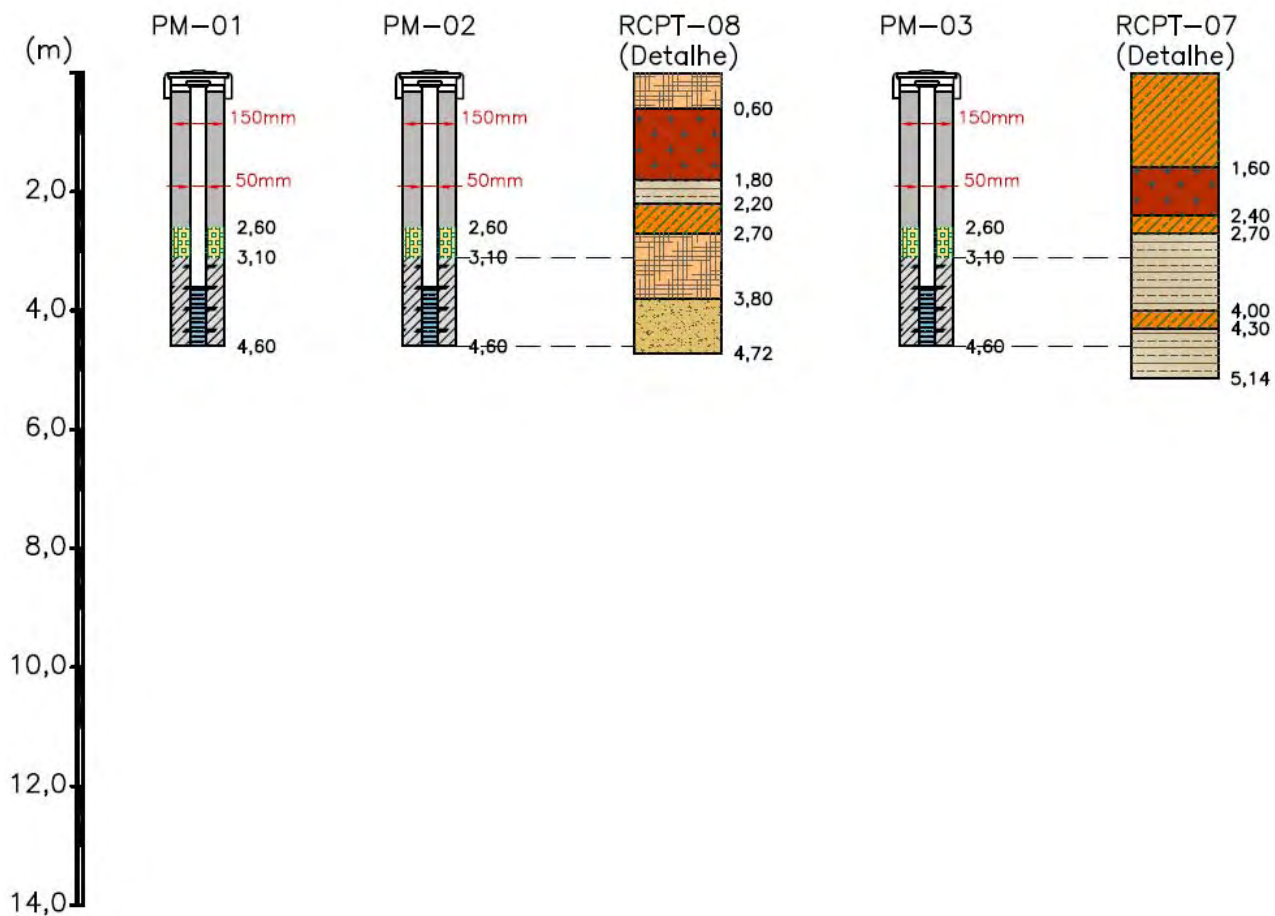


Figura 91 – Modelo conceitual hidrogeológico – aquífero livre

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Aspectos Gerais

O presente trabalho procurou dar uma contribuição ao estudo das áreas contaminadas no Brasil, especialmente na sua etapa fundamental, que é a investigação para elaboração do Modelo Conceitual Hidrogeológico, momento em que é feito o diagnóstico geoambiental da área.

Comparando-se o estudo das áreas contaminadas com o que é feito na prática da medicina, a investigação confirmatória seria a etapa onde o médico, após os exames iniciais (avaliação dos sintomas, exame tátil-visual, exames laboratoriais iniciais) conclui se o paciente está ou não com alguma anomalia ou alguma patologia. A investigação detalhada da área contaminada é a etapa onde se deve elaborar o Modelo Conceitual Hidrogeológico sólido, tridimensional, em escala adequada, e com baixo nível de incerteza. Essa etapa é análoga aos exames complementares que o médico solicita, em geral, exames de imagem e/ou laboratoriais de alta precisão e definição, para que ele possa “fechar” o diagnóstico do paciente. A etapa final é a remediação, ou reabilitação da área, que corresponde ao tratamento do paciente na medicina. Da mesma forma que os médicos não dão o mesmo tratamento para qualquer paciente, nem tampouco ministram medicamentos com base em tentativa e erro, a remediação de uma área contaminada não deve sempre utilizar o mesmo método para todas as áreas, nem deve ser projetada com base em dados pouco (ou nada) confiáveis, simplesmente na tentativa e erro. Os médicos não seguem um fluxograma único com entrada de dados dos sintomas para prescrever o tratamento, mas sim, examinam de modo mais detalhado possível o paciente e tomam contato com ele.

A avaliação de áreas contaminadas não pode ser feita à distância, apenas seguindo passo a passo os procedimentos publicados pelo órgão regulador, mas sim, o profissional deve ir a campo efetuar a coleta de dados, para que o seu diagnóstico seja feito com base

em informações confiáveis, com as incertezas conhecidas e gerenciadas e para que ele possa tomar as decisões certas e “prescrever” uma medida adequada de reabilitação da área.

Nessa comparação, os ensaios RCPTu funcionam como um aparelho de diagnóstico de imagem de alta resolução, que permite ao médico ter uma grande quantidade de informação de um ponto específico do paciente. É uma ferramenta extremamente poderosa, que auxilia o profissional a formar um quadro global, porém, não pode ser utilizada isoladamente, descontextualizada ou por um profissional que não tenha a capacitação necessária.

Os profissionais brasileiros que trabalham com investigação geotécnica já estão mais habituados com o uso dessa nova ferramenta em seu trabalho, porém, os profissionais que atuam no estudo das áreas contaminadas supostamente ainda não conhecem o ensaio RCPTu o suficiente para torná-lo prática de rotina nos seus diagnósticos e elaboração do Modelo Conceitual Hidrogeológico, embora seja uma ferramenta sobejamente conhecida e utilizada para esse fim no exterior, especialmente nos EUA, com excelentes resultados.

Por fim, pode-se dizer que esse trabalho pode contribuir com as investigações de áreas contaminadas no Brasil, ao indicar uma ferramenta que, se usada corretamente e combinada com outras, irá, certamente, melhorar a qualidade dos diagnósticos geoambientais realizados em nosso país.

6.2 Resultados

Dentro do objetivo traçado no início do estudo, os resultados obtidos nesse trabalho, em linhas gerais, foram os seguintes:

- A interpretação dos resultados obtidos nos ensaios RCPTu são compatíveis com os resultados obtidos pelos métodos tradicionais de investigação geoambiental (nesse estudo: amostragem de solo por cravação direta, sondagem com Trado Oco Helicoidal e sondagens SPT), indicando que o objeto desse estudo poderia ser utilizado da mesma forma que as tradicionais, pois deve obter resultados, no mínimo, equivalentes.

- Os resultados obtidos nos ensaios RCPTu têm maior nível de detalhamento que os métodos tradicionais de investigação do solo para elaboração do modelo conceitual. As heterogeneidades são detectadas com precisão de centímetros, o que não ocorre com as amostragens Direct Push

- O sensor de resistividade complementa muito bem os resultados de resistência de ponta, de atrito lateral e de poro pressão, que formam a base de interpretação do ensaio utilizando um ábaco de classificação como o de Robertson et al (1986). Os perfis, observados nos detalhes que o sensor de resistividade fornece, são mais adequados à escala que a investigação de áreas contaminadas necessita que qualquer ábaco de interpretação. Desta forma, pode-se dizer que o ensaio RCPTu fornece maior densidade de dados que o ensaio CPTu, que por sua vez, fornece mais dados que o ensaio CPT, que fornece densidade de dados muito maior que qualquer instrumento tradicional de coleta de dados hidroestratigráficos.

- Na área estudada, os ensaios RCPTu apresentaram menor limitação que os métodos tradicionais, principalmente as amostragens de solo por cravação contínua. Avançou até profundidades maiores, não teve problemas de amostra não confiável nem de não recuperação de amostra em um determinado ponto. O objeto de estudo se mostrou uma ferramenta mais sólida e eficiente para obter dados que fundamentem um bom diagnóstico da área.

- A investigação tem um resultado melhor quando a tomada de decisão ocorre em tempo real, no campo, com os dados obtidos em alta resolução.

- A instalação de poços de monitoramento, embora seja considerada, no Brasil, a melhor metodologia para se realizar um estudo hidrogeológico, deve ser precedida de uma elaboração de um modelo conceitual da área com a maior resolução e maior detalhamento possível. Caso esse modelo prévio não exista, e a única informação do meio seja a própria sondagem para a instalação do poço, as incertezas associadas ao processo de instalação e à região onde esse poço está efetivamente monitorando, são tão grandes que podem inviabilizar qualquer tomada de decisão adequada.

- Os ensaios RCPTu são uma ferramenta muito útil para elaboração de um adequado Modelo Conceitual Hidrogeológico, especialmente em uma abordagem que se priorize a coleta de alta densidade de dados, em alta resolução para tomada de decisão em tempo real. Mesmo em uma abordagem tradicional, o RCPTu se mostra uma alternativa mais eficaz e mais rápida para se obter informações hidroestratigráficas, comparando-se com os métodos tradicionais de coleta de dados.

6.3 Conclusões

Das Hipóteses testadas nesse trabalho:

1) A tomada de decisão em campo por equipe de profissionais Sênior proporciona a elaboração de um modelo conceitual adequado, com as incertezas conhecidas e gerenciáveis.

Comprovada. A decisão tomada em campo permitiu a coleta das amostras na posição correta e a execução dos ensaios e instalação dos poços nos pontos adequados

2) O ensaio RCPTu é uma ferramenta adequada para se identificar as heterogeneidades hidrogeológicas e as zonas preferenciais de fluxo e armazenamento, por ter menos limitações que os métodos tradicionais e fornecer dados em alta resolução

Comprovada. O conjunto de sensores de resistência de ponta, atrito lateral, poro pressão e condutividade elétrica permitiram a identificação das heterogeneidades onde o método tradicional (amostragem de solo por cravação contínua) não teve sucesso. A interpretação dos resultados dos ensaios RCPTu permitiu a identificação das zonas potenciais de fluxo e transporte, que foram posteriormente confirmadas com a instalação de poços de monitoramento.

3) O sensor de resistividade melhora a interpretação dos resultados do ensaio CPTu

Comprovada parcialmente. Em particular nos ensaios onde posteriormente instalou-se os pares de poços multiníveis, os resultados de condutividade elétrica ajudaram nessa interpretação. Porém, o reduzido número de ensaios não permite uma afirmação conclusiva, mas essa hipótese é corroborada pela literatura.

4) Elaborar um modelo conceitual hidrogeológico adequado para a área

Comprovada. Através do conjunto de ferramentas e tecnologias utilizado, através de uma abordagem próxima da Avaliação Expedida da Área, pôde-se elaborar um modelo conceitual hidrogeológico sólido.

6.4 Limitações e Recomendações

Como limitações do presente estudo e sugestões para trabalhos futuros, relaciona-se:

- Para refinar o modelo conceitual do site e reduzir as incertezas, é preciso realizar mais ensaios de RCPTu, nos intervalos dos pontos onde foram realizados os ensaios do presente estudo e em perfis transversais

- Para efetuar uma comparação que permita tirar conclusões sobre a eficiência dos ensaios RCPTu para um diagnóstico adequado, é preciso realizar vários ensaios e compará-los com algum outro instrumento (por exemplo, SPT, ou amostragens por cravação contínua)

- Recomenda-se realizar mais ensaios e mais estudos semelhantes em outras áreas, com litologias diferentes, para se verificar o desempenho desse equipamento, em comparação com a metodologia tradicional, em diferentes condições.

- Sugere-se detalhar os estudos de condutividade hidráulica nos dois principais aquíferos e no aquífero encontrados na área, comparando resultados de poro pressão dos ensaios RCPTu ou CPTu com ensaios de dissipação de poro pressão e com ensaios hidrogeológicos pontuais, com ou sem a instalação de poços de monitoramento.

- Sugere-se realizar uma campanha de amostragem de água subterrânea e encaminhamento das amostras para análise química de alguns parâmetros de interesse, a fim de verificar se a deposição de resíduos sólidos na região distal da área estudada causou contaminação da área.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLERS, Rick. **NAPL Theory**. In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Março/2012

AMS SAMPLERS Inc. **Piston Sampling System**. Disponível em <http://www.ams-samplers.com/category.cfm?CNum=151>. Acessado em 01/02/2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM F480 - 12 Standard Specification for Thermoplastic Well Casing Pipe and Couplings Made in Standard Dimension Ratios (SDR), SCH 40 and SCH 80**. PA, 2012. DOI: 10.1520/F0480-12

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.495 - Poços de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Aquíferos Granulares – Parte 1: Projeto e Construção**: 2007. Versão Corrigida 2: 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.495 - Poços de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Aquíferos Granulares – Parte 2: Desenvolvimento**: 2008.

AQUINO NETO, Vicente. **Roteiro para Execução de Investigação Detalhada e Plano de Intervenção em Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis**. Apresentação no Curso de Capacitação para Técnicos das Agências Ambientais do Programa PIA promovido pela Câmara Ambiental do Comércio de Derivados de Petróleo. Disponível em

http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/camaras/eventos/20_out_2009/4.pdf . Publicado em novembro/2009. Acessado em 01/10/2011.

AQUINO NETO, Vicente. **Técnicas de Investigação Ambiental**. Apresentação da disciplina Técnicas de Investigação do Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento de Áreas Contaminadas do SENAC-SP. 2007.

BERTOLO, Reginaldo. **Mecanismos de Fluxo e Transporte de Contaminantes em Meio Subterrâneo**. Apostila de aulas do Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento de Áreas Contaminadas do SENAC-SP. 2007

BINDER, Jeffrey. **Use of Hydraulic Profiling Tool to Identify Preferential Pathways for Chloride Impacted Groundwater Migration**. In: 2007 Annual Meeting Abstracts; Los Angeles, California; 2007 Sept 24-29. Association of Engineering Geologists; 2007.

BOLINELLI JUNIOR, Hermes Luiz; MONDELLI, Guilliana; DE MIO, Guiliano; PEIXOTO, Anna Sílvia P.; GIACHETI, Heraldo Luiz. **Piezocone de Resistividade na Investigação do Subsolo: Execução, Interpretação e Exemplos de Aplicação**. 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental - ABGE. Nov/2005

BUJEWSKI, Grace; RUTHERFORD, Brian. **The Rapid Optical Screening Tool (ROST) Laser-Induced Fluorescence (LIF) System for Screening of Petroleum Hydrocarbons in Subsurface Soils**. Innovative Technology Verification Report. National Exposure Research Laboratory. Characterization Research Division. U.S. Environmental Protection Agency. Las Vegas, Nevada. 2007

CÂMARA AMBIENTAL DO COMÉRCIO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO. **Roteiro para Execução de Investigação Detalhada e Plano de Intervenção em Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis**. Documento anexo à Decisão de Diretoria 263/2009/P da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Publicado em 20 de outubro de 2009.

CLEARLY, Robert. **Por que a maioria dos sistemas de remediação falha?** Anais do I Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo (CIMAS). São Paulo-SP, setembro, 2009

CHRISTY, Colin D., CHRISTY, Thomas D.; WITTIG, Volker. **A Percussion Probe Tool for Direct Sensing of Soil Conductivity.** Technical Paper 94-100. Geoprobe System. 1994

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Manual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas.** Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-ACs/7-manual>. Publicado em 1999. Atualizado em out/2001. Acesso em 01/11/2007.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Procedimento para Identificação de Passivos Ambientais em Estabelecimentos com Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC).** Anexo IV da Decisão de Diretoria DD nº 10-2006-C. Publicado em 26 de janeiro de 2006. Atualizado em 02/02/2007

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Decisão de Diretoria 103/2007/C/E.** 22/06//2007

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **O que são áreas contaminadas?** Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/O-que-s%EF%BF%BDreas-Contaminadas/1-O-que-s%EF%BF%BDreas-Contaminadas>. Acesso em 01/07/2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Aterros Industriais Mantovani e Cetrin.** Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/rela%C3%A7%C3%B5es-de-%C3%A1reas-contaminadas/16-mantovani>. Acesso em 01/06/2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Condomínio Barão de Mauá.** Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas->

contaminadas/rela%C3%A7%C3%B5es-de-%C3%A1reas-contaminadas/18-condominio-residencial-barao-de-maua. Acesso em 01/07/2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Contaminação do Shopping Center Norte.** Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/rela%C3%A7%C3%B5es-de-%C3%A1reas-contaminadas/20-shopping-center-norte>. Acesso em 01/06/2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Áreas Contaminadas Críticas.** Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/rela%E7%F5es-de-%E1reas-contaminadas/6-acc> Acesso em 01/06/2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução 420/09, de 28 de dezembro 2009.** Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Data da legislação: 28/12/2009 - Publicação DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84. Legislação Federal.

CORGHI, F. N.; GIACHETI, H.L. **Processos erosivos causados por loteamentos em Bauru/SP: os casos dos residenciais jardim colonial e chácara odete.** IV Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas (COBRAE). Salvador/ Bahia, p.373 - 385, 2005.

CRUMBLING, Deana M. **Summary of Triad Approach.** U.S. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation: Superfund Triad Support Team. 2004. Disponível em <http://www.triadcentral.org/ref/doc/triadsummary.pdf>

DANIEL, Chris R.; GIACHETI, Heraldo Luiz; HOWIE, John .A.; CAMPANELLA, Richard G. **Resistivity Piezocone (RCPTU) Data Interpretation and Potential Applications** Panamerican Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, V.1: p. 361-368. Foz do Iguaçu-PR. Agosto/1999

DE MIO, Giuliano. Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental. 2005. Tese

(Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-27042006-170324/>>. Acesso em: 2012-02-09.

EINARSON, M. D.; SCHRIMER M.; PEZESHKPOUR P.; MACKAY D.M.; WILSON, R.D. **Comparison of eight innovative site characterization tools used to investigate an MTBE plume at Site 60, Vandenberg Air Force Base, California.** 1999 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Remediation Seminar. NGWA/API. Houston, Texas. Novembro, 1999

FAGUNDES, Lucas Savio, GIACHETI, Heraldo Luiz, JESUS, Lucas Scarpanti de. **Piezocone de Resistividade para Investigação Geotécnica de um Processo Erosivo.** XIII Congresso de Iniciação Científica da UNESP. Set/2011

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP. **Análise de Mercado.** Disponível em <http://www2.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=1532> . 2010. Acesso em 01/06/2012.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ – FIOCRUZ. **Exposição Humana a Organoclorados na Cidade dos Meninos.** Disponível em <http://www.geoprocessamento.icict.fiocruz.br/svs/dsast/cidadedosmeninos/> . 2011. Acesso em 01/05/2012.

GEOPROBE INC. **Soil Sampling.** Disponível em <http://www.geoprobe.com>. Acessado em 01/05/2012.

GIACHETI, Heraldo Luiz. **Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudos e considerações quanto à aplicação em solos tropicais.** Tese de Livre-Docência apresentado à Faculdade de Engenharia da Unesp – Campus de Bauru, Departamento de Engenharia Civil. 2001.

GIACHETI, Heraldo Luiz; PEIXOTO, Anna Silvia Palcheco; HAMADA, Jorge; DE MIO, Giuliano; ELIS, Vagner Roberto. **Investigação Geoambiental Utilizando a Tecnologia**

do Piezocone: Primeiros Resultados da sua Aplicação no Brasil. XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Cancun, México. Outubro, 2000

GIACHETI, Heraldo Luiz ; PEIXOTO, A. S. P. ; MONDELLI, Giuliana ; MIO, Giuliano de . **Resistivity Piezocone for Geo-environmental Site Characterization of Soils: Two Case Histories from Brazil.** In: 5th International Congress on Environmental Geotechnics, 2006, Cadiff. International Congress on Environmental Geotechnics, 2006

GIACHETI, Heraldo Luiz; ESQUIVEL, Edmundo Rogério; HAMADA, Jorge; DE MIO, Giuliano. **Investigação e Caracterização Geoambiental Utilizando a Tecnologia do Piezocone: Algumas Considerações Sobre a sua Aplicação no Brasil.** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre-RS. Dezembro, 2000

GLOEDEN, Elton et al. Texto explicativo: Relação de Áreas Contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo. Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2011/texto-explicativo.pdf> . Publicado em dez/2011. Acessado em 01/03/2012.

HAWTHORNE, J. M.; ADAMSKI, M.; CHARBENEAU, R.; GARG, S.; JOHNSON, T.; KIRKMAN, A.; MALANDER, M. **Demystifying NAPL Science for the Remediation Manager.** Applied NAPL Science Review, Volume 2, Issue 4. Junho/2012

HUNT, Gregg M. **Conceptual Site Model. What Regulators Want: Improved Quality of Site Characterization Through Effective Communication and the Conceptual Site Model Approach.** Massachusetts Department Bureau of Waste Site Clean-up. 2004

IDE, Daniela Massami. **Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana.** 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-22032010-094227/>>. Acesso em: 2012-02-27.

JESUS, Lucas Scarpanti de. MONDELLI, Giuliana. GIACHETI, Heraldo Luis. **Ensaio de Campo para a determinação da condutividade hidráulica no entorno de um aterro**

de resíduos sólidos urbanos. VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. UFMG. Belo Horizonte. Novembro/2011

KILLENBECK, Eric. **Depositional Systems: Why is Geology Important?** In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Março/2012

LEE, Dae Sung; ELSWORTH, Derek; HRYCIW, Roman. **Hydraulic Conductivity Measurement from On-the-Fly uCPT Sounding and from VisCPT.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 12, December, 2008. ASCE, ISSN 1090-0241/2008/12-1720-1729

LINCH, Kyra P. **Evolving Conceptual Site Models (CSMs) in Real-time for Cost Effective Projects.** National Site Assessment Symposium. San Diego, CA. 2004

MARTIN, Travis; St GERMAIN, Randy. **Direct Push Site Characterization Direct Push of NAPL with Laser-Induced Fluorescence (LIF).** In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Janeiro/2008

McCALL, Wes. **Applications of Geoprobe HPT Logging System for Geo-Environmental Investigations.** Geoprobe Technical Bulletin MK 3184. Fev/2011.

NEGRÃO Paulo C. **Introdução à Contaminação de Solos e Águas Subterrâneas.** Apostila do Curso de Investigação Geoambiental da Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP. Campinas-SP. Maio/2012.

NIELSEN, David M. **Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Ground-Water Monitoring, Second Edition.** CRC Press. Galena, OH. 2006

OLIVA, Andresa; CHANG, Hung Kiang; CAETANO-CHANG, Maria Rita. **Determinação da Condutividade Hidráulica da Formação Rio Claro: Alálise Comparativa Através de Análise Granulométrica e Ensaio com Permeômetro Guelph e Testes de Slug.** Revista Águas Subterrâneas, v. 19, n. 2, p. 1-17, 2005. São Paulo-SP. eISSN 2179-9784. 2005

PEIXOTO, A. S. P. ; PREGNOLATO, M. C. ; SILVA, A. C. C. L. ; Yamasaki, M. T. ; Conte Junior, F. . **Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geoenvironmental characterization.** In: 2nd International Symposium on Cone Penetration testing, 2010, Huntington Beach, CA, USA. CPT'10 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. v. 1. p. 1-8

QUINNAN, Joe. **Real-Time High Resolution LNAPL and DNAPL Characterization – Part 1: Philosophy and Background.** In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Março/2012

QUINNAN, J.A., WELTY, N.R.H., and KILLINBECK, E. 2010. **Hydrostratigraphic and permeability profiling for groundwater remediation projects.** In Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10), Huntington Beach, CA., 9–11 May 2010. Edited by P.K. Robertson and P.W. Mayne. CPT'10 Organizing Committee. Paper 3-33.

RIYIS, Marcos Tanaka; RIYIS, Mauro Tanaka. **Considerações Sobre a Norma Brasileira 15.495-1: Poços de Monitoramento em Aquíferos Granulares – Parte 1: Projeto e Construção.** II Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo – CIMAS. São Paulo. Outubro/2011.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. **Guidelines for Use, Interpretation and Application of the CPT and CPTU.** University of British Columbia. Department of Civil Engineering. Vancouver (CA). 1986. Third edition. 197 p.

SÃO PAULO. **Lei Estadual 13577/09, de 08 de julho de 2009.** Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. São Paulo. 2009. Legislação Estadual.

SINDICATO DAS EMPRESAS DE COMPRA, VENDA, LOCAÇÃO E ADMINISTRAÇÃO DE IMÓVEIS RESIDENCIAIS E COMERCIAIS DE SÃO PAULO – SECOVI. **Pesquisa sobre o Mercado Imobiliário.** Disponível em <http://www.secovi.com.br/files/Arquivos/pmi-graficos-de-1205.pdf> . Publicado em maio/2012. Acessado em 15/07/2012.

SINGER, Miguel; FIACCO, Joe. **Abordagen Triáde: Você Consegue Viver sem Ela?** In: VII Seminário Internacional Sobre Revitalização de Áreas Contaminadas. Instituto Ekos. São Paulo. Outubro/2010.

SCHULMEISTER, Marcia K.; BUTLER JR, James J.; HEALEY, John M.; ZHENG, Li; WISOCKY, Douglas A.; McCALL, G. Wesley. **Direct-Push Electrical Conductivity Logging for High-Resolution Hydrostratigraphic Characterization.** Ground Water Monitoring & Remediation 23, no 3: 52–62. 2008

SHINN III, James D. **Enhanced Access Penetration System - Draft Final Technical Report.** Applied Research Associates, Inc. 2004

SHIELDS, Timothy H. **Introduction to 3D Maps Techniques.** National Site Assessment Symposium. San Diego, CA. Jun/2004

SILVA, Rebeca Ashbar. **Caracterização Geotécnica e Avaliação de um Processo Erosivo em Bauru-SP.** Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia, UNESP - Campus de Bauru, como parte dos quesitos para obtenção do título de Engenheiro Civil. Dez/2010

St GERMAIN, Randy. **New Generation Optical Sensors for Characterization NAPL Source Zones.** Disponível em http://www.dtsc.ca.gov/hazardouswaste/upload/stgermain_remsymp_presentation.pdf . Publicado em 2008. Acessado em 01/05/2012.

St GERMAIN, Randy; EINARSON, Murray; FURE, Adrian. **Direct Push Optical Screening Tool for Chlorinated Solvent DNAPL.** In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Março/2012

St GERMAIN, Randy. **Your NAPL Conceptual Site Model: It's Probably Wrong.** In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Março/2012

UMUARAMA ILUSTRADO. **Agricultor tem até julho para devolver BHC.**

Disponível em

<http://www.ilustrado.com.br/2011/ExibeNoticia.aspx?Not=Agricultor%20tem%20at%C3%A9%20julho%20para%20devolver%20BHC&NotID=20540>. Publicado em 17/03/2012. Acesso em 01/07/2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **The Love Canal Tragedy**. Disponível em

<http://www.epa.gov/aboutepa/history/topics/lovecanal/01.html>. Publicado em 1979. Acesso em 01/07/2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Site Characterization Analysis Penetrometer System (SCAPS)**. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Brownfields Technology Support Center. Innovative Technology Evaluation Report. EPA 540-R-95-520. Agosto, 1995

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Soil Screening Guidance: User's Guide**. EPA Document Number: EPA540/R-96/018. 1996

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Expedited Site Assessment Tools For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Regulators**. Office of Underground Storage Tanks, OSWER. EPA 510-B-97-001. Março, 1997

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA –Region 9 – **1999 NAPL Field Investigation Report - McCormick and Baxter Superfund Site**. Stockton, California. Volume 1 of 2. June 2, 2000

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Conceptual Site Model – Part 1**. RCRA Corrective Action Workshop on Results-Based Project Management. 2000

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **EPA Removes Love Canal for Superfund List**. Disponível em

<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/e34cbb5867df82a085257359003d480c/40a7e32b0bbe56018525712a006fca02!OpenDocument>. Publicado em 2004. Acesso em 01/07/2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Brownfields Technology Support Center. **Innovations in Site Characterization. Case Study: The Role of a Conceptual Site Model for Expedited Site Characterization Using the Triad Approach at the Poudre River Site, Fort Collins, Colorado.** EPA 542-R-06-007. November, 2006

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA Office of Superfund Remediation and Technology Innovation: Superfund Triad Support Team. **Considerations for Applying the Triad Approach Hartford Area Hydrocarbon Plume Site Hartford, Illinois.** EPA 542-R-06-008. August, 2007

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Module 6, Truth Serum for Environmental Decision-Making: Efficient and Effective Program Designs. Short course manual for Best Practices for Efficient Soil Sampling Designs.** CERCLA Education Center. January, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Soil Sampling.** Disponível em <http://www.clu-in.org/characterization/technologies/soilandsoilgassamp.cfm>. Acesso em 01/07/2009.

VEIGA, Anabela Quintela Nunes. **Caracterização geotécnica dos terrenos do vale tifónico Parceiros-Leiria.** 2012. Tese de Doutorado em Engenharia Geológica. Universidade de Coimbra. Disponível em <http://hdl.handle.net/10316/19906>. Acessado em 01/12/2012

VIENKEN, Thomas; LEVEN, Carsten; DIETRICH, Peter. **Use of CPT and other direct push methods for (hydro-) stratigraphic aquifer characterization — a field study.** Canadian Geotechnical Journal, Volume 49, Number 2, February 2012 , pp. 197-206(10)

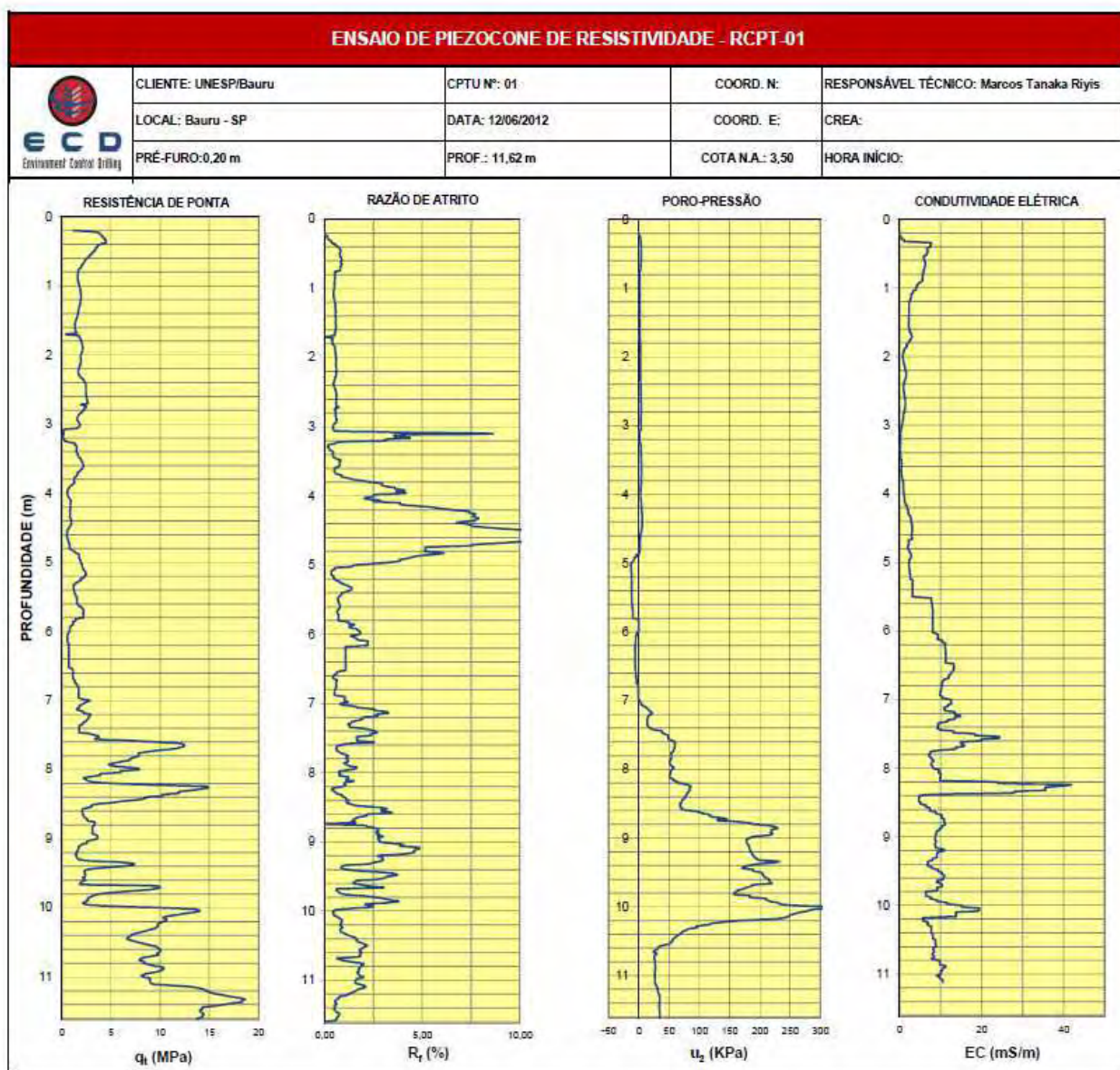
VOLZ, Conrad (Dan). **Lecture 2, Part 1, Conceptual Site Models for Exposure Assessment.** Disponível em

http://www.chec.pitt.edu/Lecture%20Part_1_Conceptual%20Site%20Models_volz.pdf .
Acesso em 01/05/2012

WELTY, Nicklaus. **Permeability Mapping: Strategies and Methods.** In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Março/2012

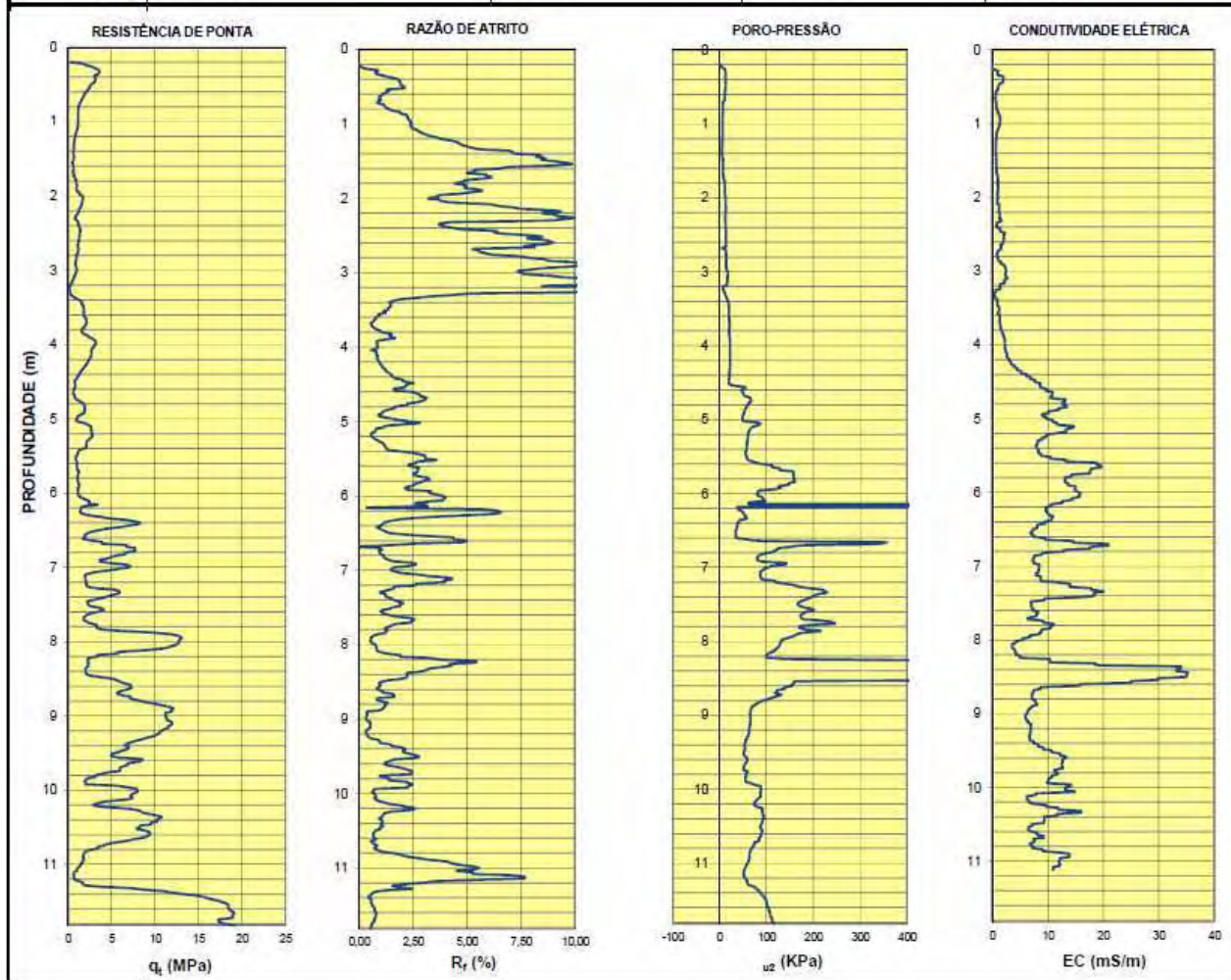
WOLL, B.; MACK J.; ELLERBUSCH, F.; VETTER, J.R. **Facilitating Browfields Transactions Using Triad and Environmental Insurance.** Remediation: The Journal of Environmental Cleanup Costs, Technologies & Techniques. Vol. 13, No. 2, pp. 113-130 (Spring 2003). Disponível em: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/104520300/ABSTRACT> . Acesso em 20/07/2012.

8 ANEXOS




ENSAIO DE PIEZOCONE: RCPT-02

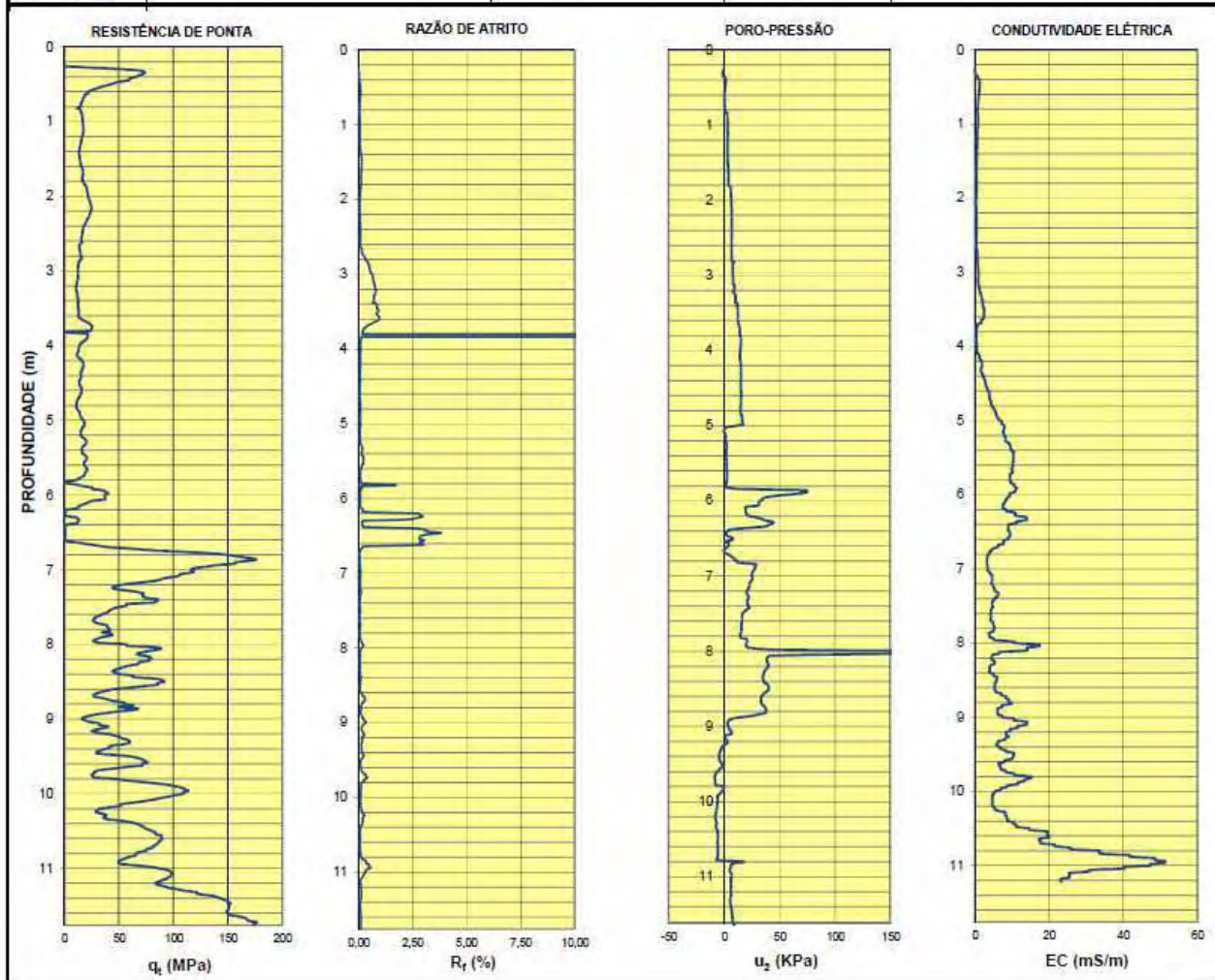
	CLIENTE: Marcos	CPTU N°: 02	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:	
	LOCAL: Bauru - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:	
	PRÉ-FURO: 0,20 m	PROF.: 11,82 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:	





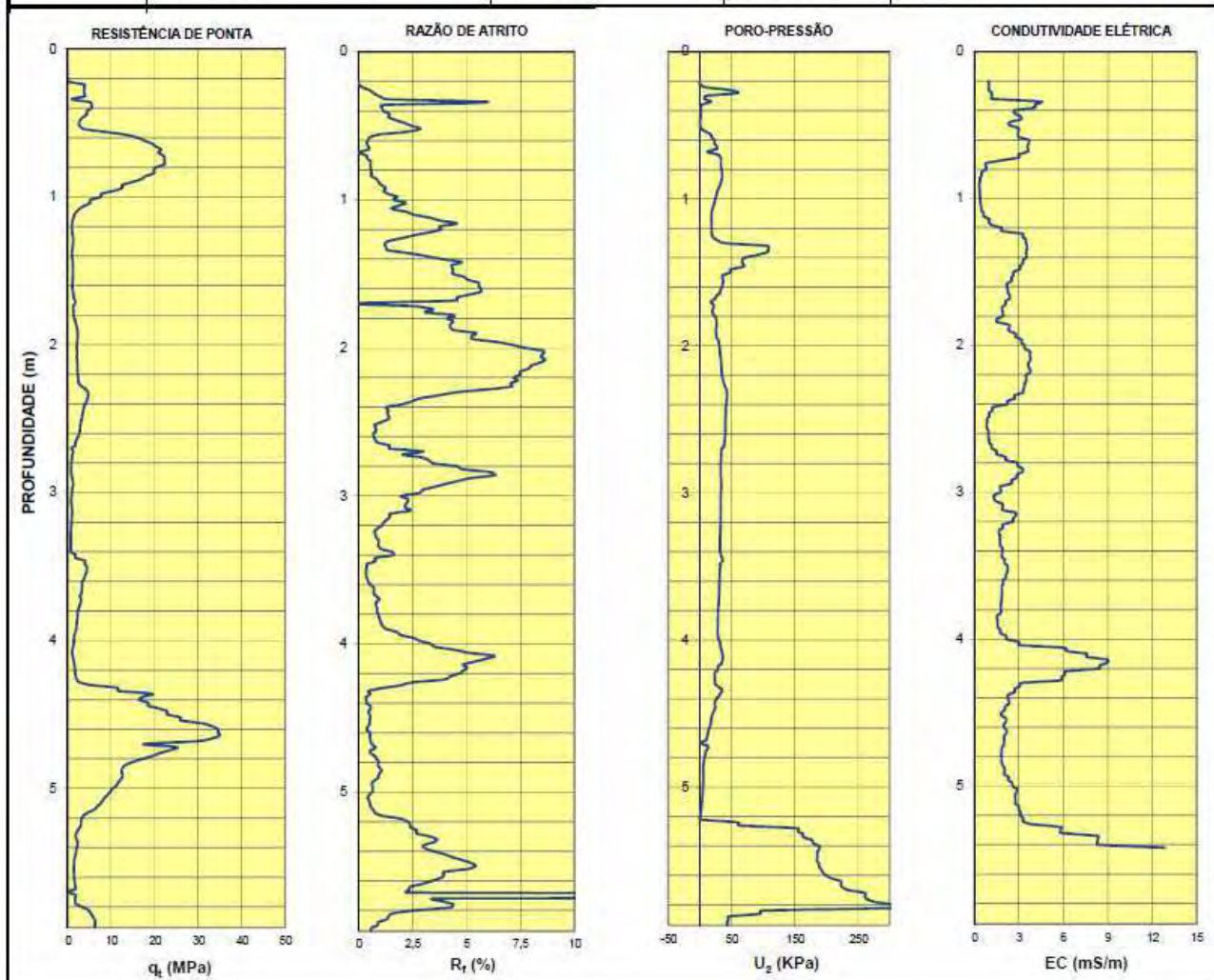
ENSAIO DE PIEZOCONE RCPT-03

	CLIENTE: Marcos	CPTU N°: 03	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:
	LOCAL: Bauru - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:
	PRÉ-FURO: 0,26 m	PROF.: 11,76 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:





ENSAIO DE PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE - RCPT-04

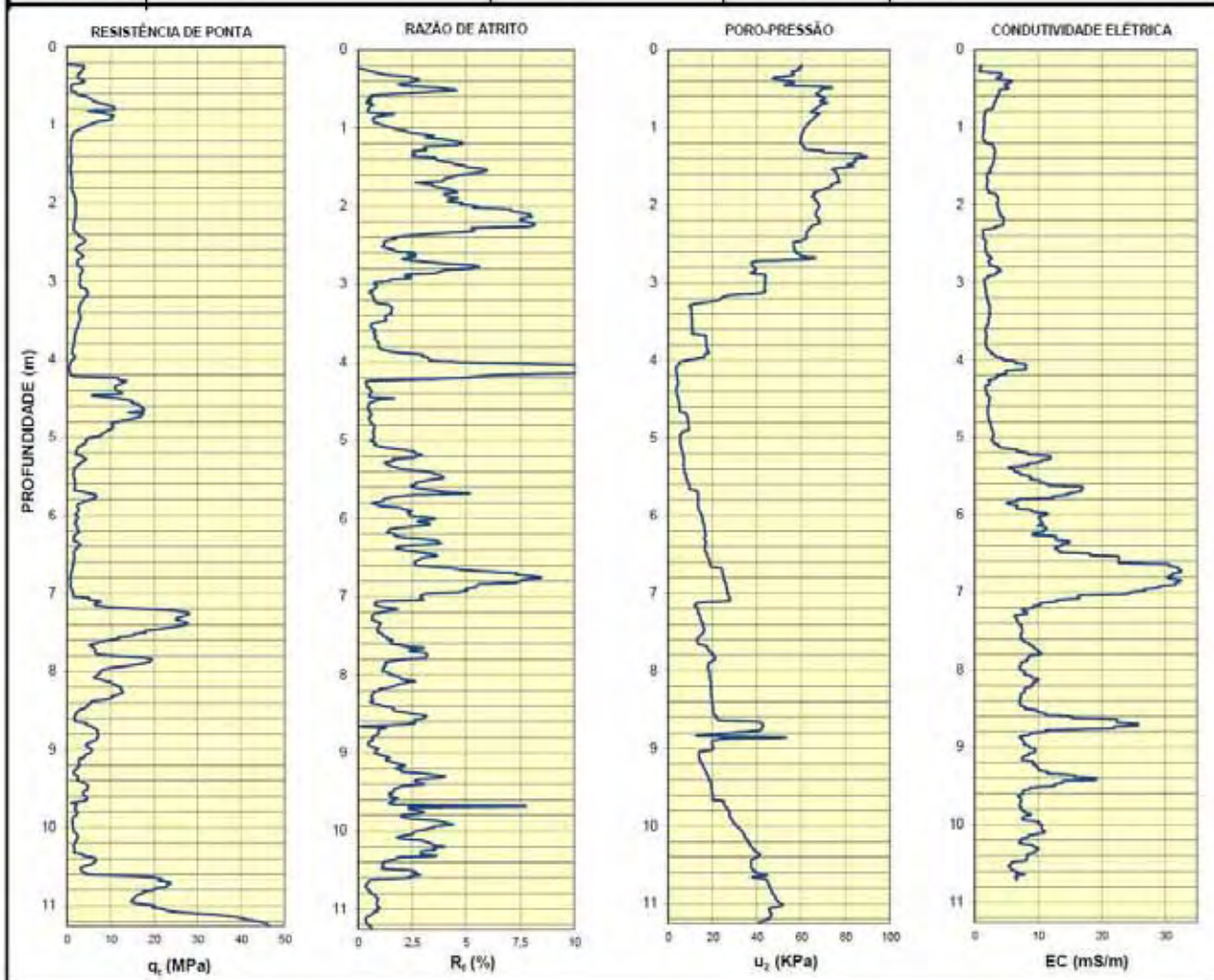
	CLIENTE: Marcos	CPTU N°: 04	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:
	LOCAL: Bauru - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:
	PRÉ-FURO: 0,20 m	PROF.: 5,64 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:





ENSAIO DE PIEZOCONE - RCPT-05

	CLIENTE: Marcos	CPTU N°: 05	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:
	LOCAL: Baura - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:
	PRÉ-FURO: 0,20 m	PROF.: 11,26 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:




ENSAIO DE PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE - RCPT-06


CLIENTE: Marcos

CPTU N°: 06

COORD. N:

RESPONSÁVEL TÉCNICO:

LOCAL: Bauru - SP

DATA: 12/06/2012

COORD. E:

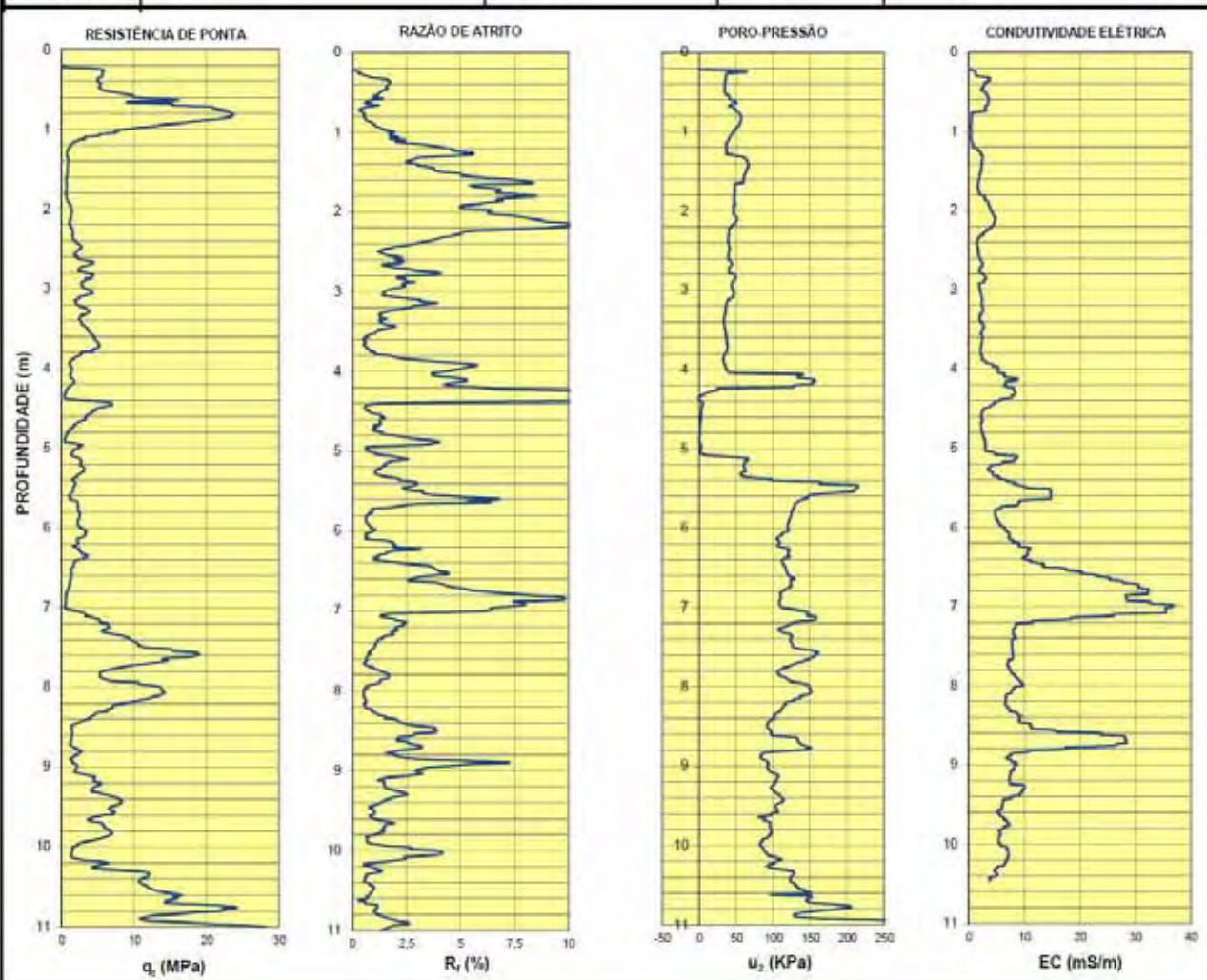
CREA:

PRÉ-FURO: 0,20 m


PROF.: 11,00 m

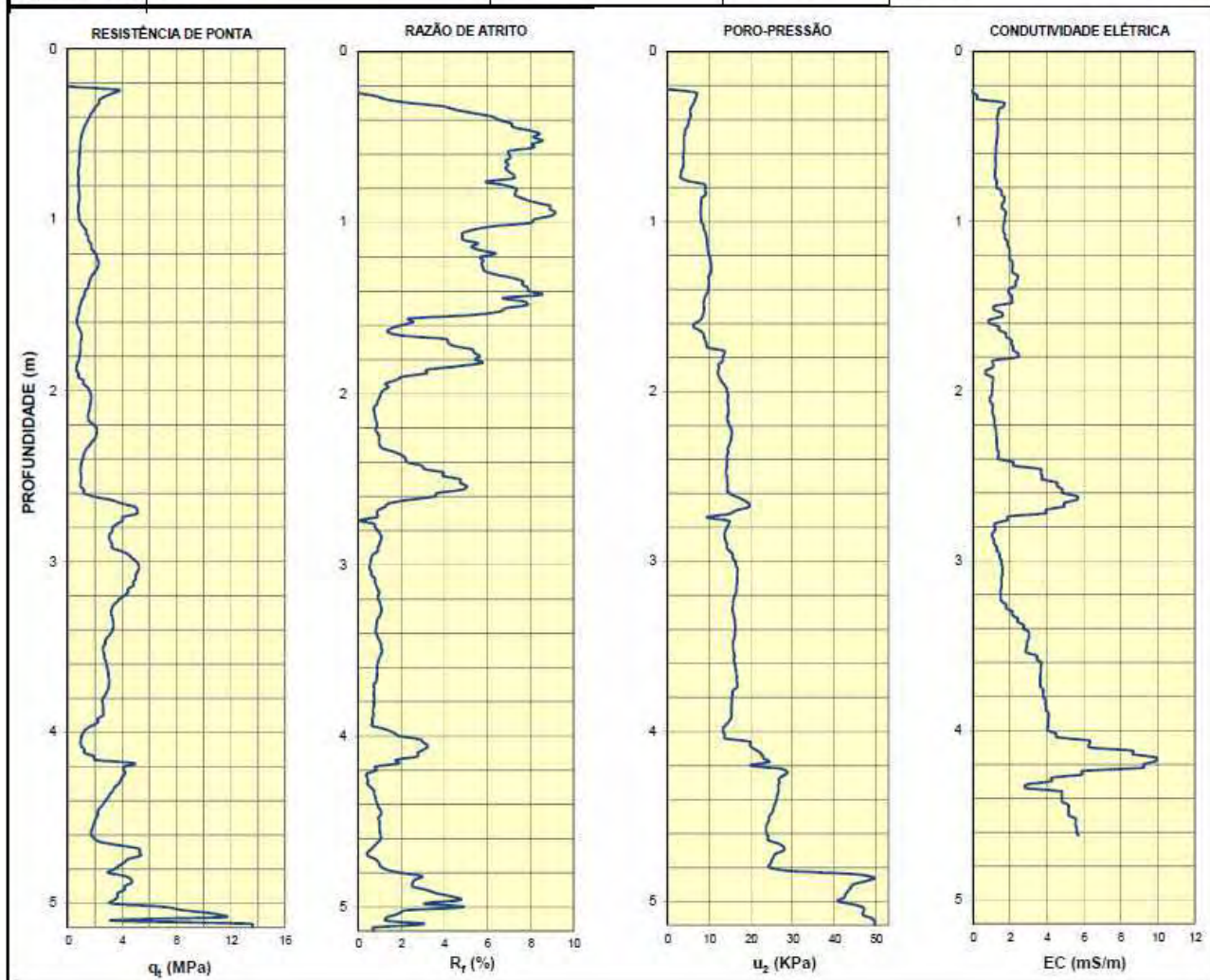
COTA N.A.: 3,50

HORA INÍCIO:




ENSAIO DE PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE - RCPT-07

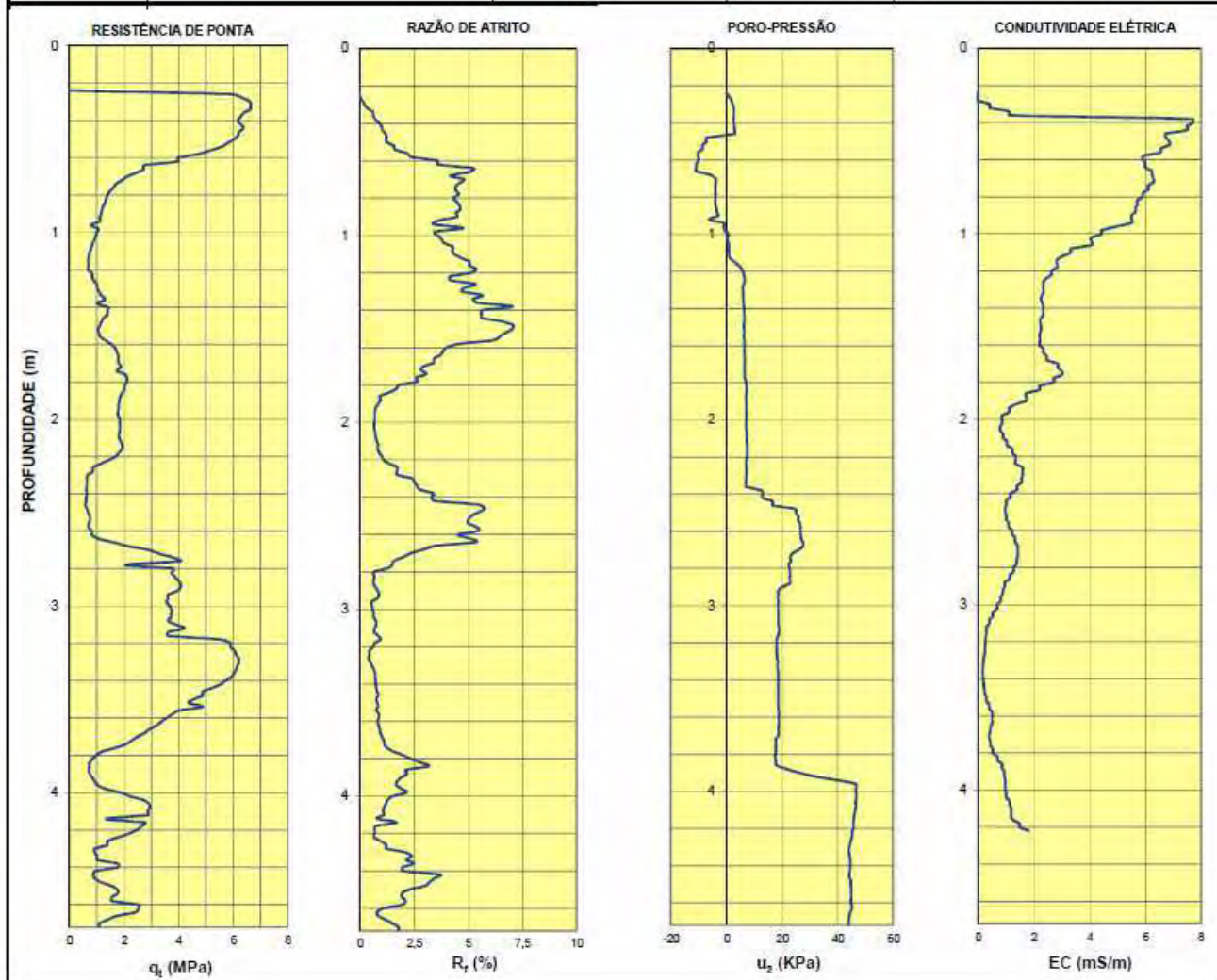
	CLIENTE: Marcos	CPTU N°: 07	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:
	LOCAL: Bauru - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:
	PRÉ-FURO: 0,22 m	PROF.: 5,14 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:





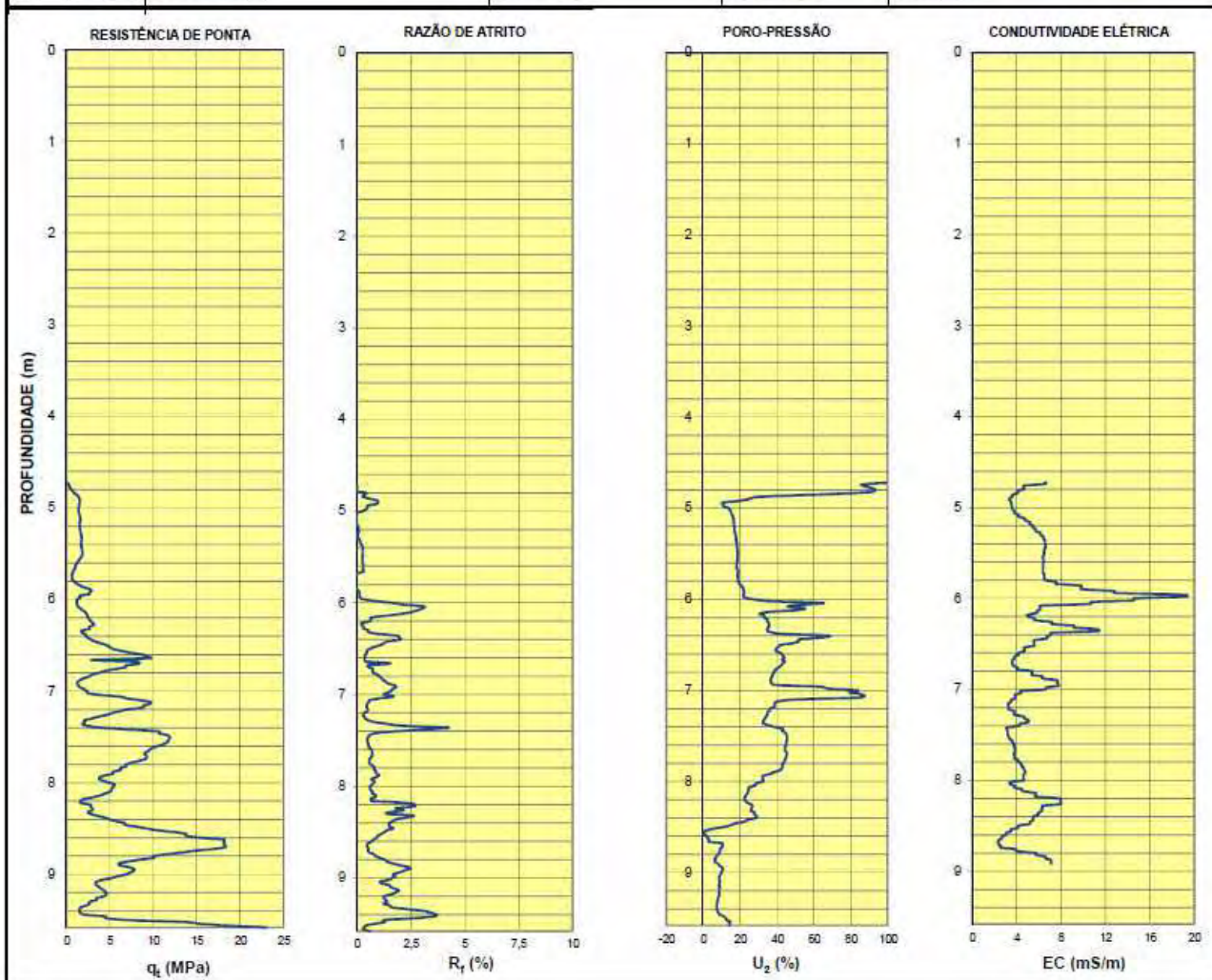
ENSAIO DE PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE - RCPT-08

	CLIENTE: Marcos	CPTU Nº: 08	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:
	LOCAL: Bauru - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:
	PRÉ-FURO: 0,24 m	PROF.: 4,72 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:




ENSAIO DE PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE - RCPT-09

	CLIENTE: Marcos	CPTU N°: 09	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:
	LOCAL: Bauru - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:
	PRÉ-FURO: 4,72 m	PROF.: 9,58 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:




ENSAIO DE PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE - RCPT-10

	CLIENTE: Marcos	CPTU N°: 10	COORD. N:	RESPONSÁVEL TÉCNICO:
	LOCAL: Bauru - SP	DATA: 12/06/2012	COORD. E:	CREA:
	PRÉ-FURO: 0,20 m	PROF.: 10,26 m	COTA N.A.: 3,50	HORA INÍCIO:

