



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**RAFAEL MURARO DERRITE**

**INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO COM O PIEZOCONE:  
UM ESTUDO DE CASO**

Bauru  
2017



**RAFAEL MURARO DERRITE**

**INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO COM O PIEZOCONE:  
UM ESTUDO DE CASO**

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



Bauru  
2017

**Derrite, Rafael Muraro.**

Investigação de alta resolução com o piezocone:  
um estudo de caso / Rafael Muraro Derrite, 2017

130 f.

Orientador: Heraldo Luis Giacheti

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

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

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RAFAEL MURARO DERRITE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 06 dias do mês de março do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Universidade de Campinas, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETTI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Dr. PAULO CESAR DE MELO NEGRÃO do(a) - / Clean Environment Brasil, Profª Drª ANA ELISA SILVA DE ABREU do(a) Departamento Instituto de Geociências / Universidade de Campinas, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RAFAEL MURARO DERRITE, intitulada **INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO COM PIEZOCONE: UM ESTUDO DE CASO**. 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 GIACHETTI

Dr. PAULO CESAR DE MELO NEGRÃO

Profª Drª ANA ELISA SILVA DE ABREU

## DEDICATÓRIA

Esse trabalho é dedicado a minha família, Bartolomeu, Catarina, Quitéria, Vitória, Júlia, Marley, Theodoro, Sultão (*in memorian*), Mafalda (*in memorian*) e Natália, que me dão os maiores e melhores ensinamentos e razão para enfrentar qualquer batalha.

## **AGRADECIMENTOS**

À Natália, pela compreensão, conselhos, colaboração na execução, por sempre me ajudar e apoiar em todas as decisões; demonstro eterna gratidão.

Ao Felipe, Diego e Otavio por me darem auxílio nas etapas finais, fundamental para conclusão deste trabalho.

Ao amigo Thiago Rodrigues pelo talento e dedicação dispendidos neste trabalho.

Aos meus pais, irmãos e amigos por toda colaboração direta e indireta, que sempre se refletem nos meus trabalhos.

Ao meu amigo, Marcos Tanaka Riyis, por contribuir valorosamente e apoiar minhas conquistas acadêmicas, profissionais e pessoais ao longo destes últimos nove anos.

Agradecimento especial à ECD Sondagens Ambientais e toda sua equipe, especialmente aos amigos Charles, Mauro e Manoel, empresa que fomentou e possibilitou toda execução deste trabalho.

Ao Rodrigo Cunha e Centro Universitário Senac – Campus Santo Amaro, por gentilmente cederem a área experimental a esta pesquisa.

Ao orientador e Professor Dr. Heraldo Luiz Giacheti, por sua inigualável paciência e pelos fundamentais ensinamentos ao longo destes últimos anos.

Aos professores Drs. Roger Augusto Rodrigues e Sandro Donnini Mancini pelas colaborações neste trabalho.

À Fernanda Beluca Minatel, pelo auxílio na execução desta pesquisa.

## RESUMO

A heterogeneidade hidrogeológica do meio físico é um dos fatores principais na definição da distribuição dos contaminantes e seus subprodutos para elaboração de um Modelo Conceitual da Área (MCA). Existem diversas abordagens para a investigação ambiental de áreas contaminadas, sendo que a investigação de alta resolução (*High Resolution Site Characterization - HRSC*) permite obter um detalhamento em densidade e escala adequadas, tanto da variabilidade vertical e horizontal da condutividade hidráulica e dos tipos de solo, quanto das concentrações dos contaminantes, sua distribuição e interações no meio físico. Uma das ferramentas de alta resolução utilizada para se definir o Modelo Conceitual do Meio Físico é o piezocone (CPTu), a qual permite avaliar e classificar o tipo de solo e descrever um perfil hidroestratigráfico em escala centimétrica. O presente estudo teve como principal objetivo definir perfis e seções hidroestratigráficas em alta resolução, utilizando amostragem de solo *Direct Push Dual Tube Sampling* (DPDTS) e ensaios CPTu com Dissipação de Poro-Pressão (PPDT). A amostragem de solo DPDTS permitiu uma caracterização do solo *in situ*, definindo-se preliminarmente as principais zonas de fluxo e armazenamento de eventual contaminação. Os ensaios CPTu detectaram o tipo de solo em microescala (centímetros), com a identificação adequada das zonas de fluxo e armazenamento, bem como estabeleceram um perfil contínuo de condutividade hidráulica, além também de fornecerem dados pontuais através dos ensaios PPDT, definindo-se, então, um perfil hidroestratigráfico em alta resolução, subsidiando o projeto e aplicação de qualquer técnica de remediação. Os resultados mostraram grandes diferenças entre as descrições do tipo de solo obtidas pela sondagem DPDTS (tátil-visual) e pelos ensaios CPTu. Estes últimos possibilitaram identificar a heterogeneidade do meio físico, sua variação e alternância da condutividade hidráulica em detalhe, tendo sido detectados até cinco tipos de solos distintos pelos ensaios CPTu dentro de um único descrito pelo método tátil-visual (DPDTS), demonstrando o potencial de emprego dessa técnica para definição da hidrogeologia em escala centimétrica e a vantagem da sua utilização como ferramenta de alta resolução.

**Palavras-chave:** Piezocone; Investigação de Alta Resolução; Zonas de Fluxo; Zonas de Armazenamento, Modelo Conceitual do Meio Físico.

## ABSTRACT

The hydrogeological heterogeneity of the physical environment is one of the main factors in the definition of the distribution of contaminants and their by-products for the elaboration of a Conceptual Site Model (CSM). There are several approaches to the environmental investigation of contaminated sites, and the High-Resolution Site Characterization (HRSC) allows to obtain an adequate density and scaling detail of both vertical and horizontal variability of hydraulic conductivity and soil types, as well as the concentrations of contaminants, their distribution and interactions in the physical environment. One of the high-resolution tools used to define the Conceptual Model of the Physical Environment is the piezocone (CPTu), which allows to evaluate and classify the soil type and describe a hydrostratigraphic profile in a centimeter scale. The main purpose of the present study was to define high-resolution hydrostratigraphic profiles and sections using Direct Push Dual Tube Sampling (DPDTS) and CPTu tests with Pore-Pressure Dissipation (PPDT). The DPDTS soil sampling allowed an *in-situ* soil characterization, defining the main flux and storage zones of eventual contaminants. The CPTu tests detected the soil type in microscale (centimeters), with adequate identification of the flux and storage zones, also established a continuous profile of hydraulic conductivity, as well as obtained punctual data through the PPDT tests, thus defining the hydrostratigraphic profile in high resolution, supporting the design and application of any remediation technique. The results showed large differences between the soil type descriptions obtained by the DPDTS (tactile-visual) and the CPTu tests. The latter allowed the identification of the heterogeneity of the physical environment, its variation and alternation of hydraulic conductivity in detail, and up to five different soil types were detected by the CPTu tests within a single type described by the tactile-visual method (DPDTS), demonstrating the potential use of this technique to define the local hydrogeology in a centimeter scale and the advantage of its use as a high-resolution tool.

**Keywords:** Piezocone; High-Resolution Site Characterization; Flux Zones; Storage Zones, Conceptual Model of the Physical Environment.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Heterogeneidade do aquífero e variabilidade na distribuição espacial de fluxo de água subterrânea (adaptado de PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008).....	9
Figura 2 - Evolução conceitual de maturidade da pluma, resultante da interação entre as zonas de fluxo e de armazenamento de contaminantes e seus mecanismos de transporte (advectivo e difusivo) (adaptado de SUTHERSAN et al., 2010) .....	10
Figura 3 – Representação esquemática de uma ponteira de piezocone (adaptado de SCHNAID, 2009) .....	15
Figura 4 – Representação esquemática da correção do efeito de áreas desiguais em um piezocone .....	16
Figura 5 – Ábaco para identificação do tipo de comportamento do solo não normalizado (SBT) (adaptado de ROBERTSON et al., 1986) .....	17
Figura 6 – Ábaco CPT normalizado ( $SBT_N$ ) (adaptado de ROBERTSON, 1990) .....	18
Figura 7 – Ábaco CPT normalizado ( $SBT_N$ ), $Q_{tn} - F_r$ , mostrando os intervalos de valores de $I_c$ (adaptado de ROBERTSON; CABAL, 2015).....	20
Figura 8 – Ábaco modificado de SBT não normalizado com base na resistência de ponta adimensional, $(q_c/p_a)$ e razão de atrito, $R_f$ , mostrando os limites de contornos do $I_{SBT}$ (adaptado de ROBERTSON; CABAL, 2015).....	22
Figura 9 – Condutividade hidráulica pelo tipo de solo (adaptado de FREEZE; CHERRY, 1979) .....	24
Figura 10 – Variação de condutividade hidráulica do solo em função de $I_c$ ( $SBT_N$ ) (adaptado de ROBERTSON, 2010) .....	25
Figura 11 - Relação entre a condutividade hidráulica e $t_{50}$ de Parez e Fauriel (1988) (adaptado de KRAM et al., 2008).....	26
Figura 12 – Mapa Geológico da Área de Estudo (adaptado de FUSP, 2002) .....	29
Figura 13 – Hidrogeologia da área de estudo (adaptado de DAEE/IG, 2009) .....	30
Figura 14 – Centro Universitário Senac – Santo Amaro, Área de Estudo e Canal Jurubatuba.....	31
Figura 15 – Traçado aproximado do antigo leito do Rio Pinhos sobre imagem aérea (adaptado de KAYO, 2013).....	31
Figura 16 - Traçado aproximado do antigo leito do Rio Pinhos sobre Mapa Digital da Cidade de São Paulo (adaptado de KAYO, 2013) .....	32
Figura 17 - Área investigada, Centro Universitário SENAC - Santo Amaro.....	33
Figura 18 - Localização dos pontos de sondagem DPDTS e ensaios CPTu realizados na área .....	34
Figura 19 – Sondagens DPDTS e CPTu sendo executadas .....	35

Figura 20 – Sonda e ferramentas utilizadas nas sondagens DPDTS .....	39
Figura 21 – Ferramental DPDTS utilizado.....	40
Figura 22 – Preparação para descrição tátil-visual e coleta de amostra de solo .....	41
Figura 23 – Colocação da pedra porosa com glicerina deaerada .....	47
Figura 24 – Preparação para início da cravação do CPTu.....	48
Figura 25 – Realização de ensaios de piezocone .....	49
Figura 26 – Operação do ensaio de piezocone.....	50
Figura 27 – Localização das três linhas principais dos ensaios .....	52
Figura 28 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-01 e R-02..	59
Figura 29 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-03 e R-04..	59
Figura 30 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-05 e R-06..	60
Figura 31 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-07 e R-08..	60
Figura 32 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-10 .....	61
Figura 33 - Seção estratigráfica – Linha 01.....	63
Figura 34 - Seção estratigráfica – Linha 03.....	64
Figura 35 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-01 e R-05 .....	65
Figura 36 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-02 e R-06 .....	66
Figura 37 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-03, R-10 e R-07.....	67
Figura 38 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-04 e R-08 .....	68
Figura 39 - Detalhe das principais amostras coletadas pelo método DPDTS ainda no <i>liner</i> , no momento da descrição tátil-visual realizada em campo .....	70
Figura 40 – Alguns dos horizontes encontrados nas amostras coletadas pelo método DPDTS ainda no <i>liner</i> , no momento da descrição tátil-visual realizada em campo .....	71
Figura 41 – Perfil CPTu R-02.....	76
Figura 42 - Perfil CPTu R-07.....	76
Figura 43 – Ajuste de profundidade dos ensaios com base nos valores de $R_f$ e intervalo de dados retirados da comparação.....	79
Figura 44 – Perfis de poro pressão medida em ensaios em duplicata utilizando graxa biodegradável no filtro de cavidade e glicerina deaerada na pedra porosa .....	81
Figura 45 – Dissipação do excesso de poro pressão utilizando glicerina deaerada na pedra porosa (R-05G).....	82
Figura 46 - Dissipação do excesso de poro pressão utilizando graxa no filtro de cavidade (R-07) .....	82
Figura 47 – Valor de $I_c$ e respectiva classificação do tipo de solo $SBT_N$ .....	83
Figura 48 – Tipos de solo segundo a descrição tátil-visual .....	84
Figura 49 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-01.....	84
Figura 50 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-02.....	84

Figura 51 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-03.....	85
Figura 52 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-04.....	85
Figura 53 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-05.....	85
Figura 54 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-06.....	85
Figura 55 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-07.....	86
Figura 56 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-08.....	86
Figura 57 – Perfil do subsolo interpretado pelo $I_c$ do ponto R-09.....	86
Figura 58 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo $I_c$ do ponto R-10.....	86
Figura 59 – Perfil do subsolo interpretado pelo $I_c$ do ponto R-11.....	87
Figura 60 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-01.....	89
Figura 61 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-02.....	89
Figura 62 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-03.....	90
Figura 63 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-04.....	90
Figura 64 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-05.....	91
Figura 65 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-06.....	91
Figura 66 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-07.....	92
Figura 67 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-08.....	92
Figura 68 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-09.....	93
Figura 69 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-10.....	93
Figura 70 – Perfil de solo DPDTS, de $I_c$ e de K do ponto R-11.....	94
Figura 71 – Comparações entre os perfis DPDTS, $I_c$ e K para o ponto R-06 investigado.	95
Figura 72 – Seção estratigráfica (Linha 01) obtida a partir da descrição tátil-visual e seção hidroestratigráfica em alta resolução elaborada a partir do CPTu.....	96
Figura 73 - Seção estratigráfica (Linha 03) obtida a partir da descrição tátil-visual e seção hidroestratigráfica em alta resolução elaborada a partir do CPTu.....	97
Figura 74 – Correlação para $t_{50}$ entre graxa e glicerina.....	100
Figura 75 – Correlação para Log de K (cm/s) entre graxa e glicerina .....	100
Figura 76 – Comparação entre K pontual obtido pelos PPDT e perfil de K contínuo pelo $I_c$ .....	102
Figura 77 - Comparação entre K pontual obtido pelos PPDT e perfil de K contínuo pelo $I_c$ .....	103
Figura 78 – R-11 - Comparação entre K pontual determinado pelo PPDT e perfil de K contínuo pelo $I_c$ .....	104

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Unificação entre os ábacos de Robertson et al. (1986), CPT não normalizado (SBT) e Robertson (1990), CPT normalizado (SBT <sub>N</sub> ).....	21
Tabela 2 - Profundidade atingida em cada ensaio CPTu realizado.....	51
Tabela 3 – Descrição Tátil-Visual das amostras de solo das sondagens DPDTS e valores de K adotados.....	58
Tabela 4 - Massa Específica dos Sólidos, Limites de Consistência e Azul de Metileno ...	72
Tabela 5 – Granulometria conjunta.....	73
Tabela 6 – Classificação textural das amostras ensaiadas em laboratório.....	73
Tabela 7 – Descrição tátil-visual e a partir dos ensaios de laboratório .....	74
Tabela 8 - Profundidade dos ensaios CPTu.....	75
Tabela 9 - Ajuste de profundidade das duplicatas em relação a seu par.....	78
Tabela 10 - Conjunto de dados obtidos em cada ensaio de piezocone.....	78
Tabela 11 - Resultados da correlação linear de Pearson (r) .....	79
Tabela 12 – Valores de Log de K e t <sub>50</sub> dos pares de ensaios em duplicata utilizando graxa e glicerina. ....	99

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
3.1	INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO E HETEROGENEIDADES HIDROGEOLÓGICAS...	5
3.2	ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DO CONE E DO PIEZOCONE .....	11
3.2.1	<i>Estimativa da Condutividade Hidráulica através do CPT e CPTu</i> .....	23
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>28</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	28
4.2	AMOSTRAGEM DE SOLO POR CRAVAÇÃO CONTÍNUA ( <i>DIRECT PUSH DUAL TUBE SAMPLING - DPDTS</i> ) .....	36
4.2.1	<i>Ensaio em laboratório para caracterização do solo</i> .....	42
4.2.2	<i>Estimativa da Condutividade Hidráulica a partir da Descrição Tátil-visual</i> .....	42
4.3	ENSAIOS CPTU E DE DISSIPAÇÃO DE PORO PRESSÃO (PPDT) .....	43
4.3.1	<i>Comparação entre o Filtro de Cavidade (Slot Filter) com graxa e Pedra Porosa com glicerina deaerada para medir a Poro Pressão</i> .....	52
4.3.2	<i>Índice do Tipo de Comportamento do Solo (<math>I_c</math>) SBT<sub>N</sub></i> .....	56
4.3.3	<i>Estimativa da Condutividade Hidráulica através do <math>I_c</math></i> .....	56
4.3.4	<i>Estimativa da Condutividade Hidráulica através do ensaio PPDT</i> .....	56
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>58</b>
5.1	DESCRIÇÃO TÁTIL-VISUAL - PERFIL HIDROESTRATIGRÁFICO (DPDTS).....	58
5.1.1	<i>Ensaio laboratorial para caracterização do solo</i> .....	71
5.2	ENSAIOS CPTU E DE DISSIPAÇÃO DE PORO-PRESSÃO (PPDT).....	74
5.2.1	<i>Comparação entre o uso de Slot Filter (com graxa) e Pedra Porosa (com glicerina deaerada) para registro da Poro-Pressão (<math>u_2</math>)</i> .....	77
5.2.2	<i>Definição de perfis do subsolo com base no CPTu (<math>I_c</math> - SBT<sub>N</sub>)</i> .....	83
5.2.3	<i>Perfis de Condutividade Hidráulica através do CPTu (<math>I_c</math> - SBT<sub>N</sub>)</i> .....	88
5.2.4	<i>Condutividade Hidráulica Pontual através do Ensaio PPDT</i> .....	99
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>106</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE</b> .....	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>109</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Um diagnóstico adequado sobre uma área contaminada precisa proporcionar o entendimento da interação meio físico/contaminante. A esse entendimento, dá-se o nome de Modelo Conceitual da Área (MCA).

A tomada de decisão e as medidas de intervenção no Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) estão diretamente ligadas a definição do MCA. Desta forma, é necessário conhecer as diversas variáveis que atuam sobre o meio físico para que seja possível gerenciar as incertezas durante as etapas do processo de investigação e remediação.

A Decisão de Diretoria da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), DD 038/2017/C, em seu ANEXO II, define que Modelo Conceitual é o relato escrito, acompanhado de representação gráfica, dos processos associados ao transporte de substâncias químicas de interesse na área investigada, desde as fontes potenciais primárias e secundárias de contaminação, até os potenciais ou efetivos receptores (CETESB, 2017).

A ABNT NBR 16210/2013 estabelece que toda a complexidade do meio físico (hidrogeologia) deve ser considerada na elaboração do MCA e que o mesmo deve ser revisado e refinado para efetivamente atender sua finalidade.

O Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas também da CETESB, estabelece que um MCA deve ser elaborado de modo que se identifique as fontes primárias e secundárias de contaminação, bem como os mecanismos de transporte de contaminantes, suas vias preferenciais de veiculação e os receptores potencialmente expostos. Além disso, preconiza que, ao final da Investigação para Remediação, é crucial que esse Modelo Conceitual tenha poucas e gerenciáveis incertezas (CETESB, 1999).

Segundo Payne, Quinnan e Potter (2008), o Modelo Conceitual deve mostrar como a contaminação da área vai responder à estratégia de remediação proposta e que este deve ser ao mesmo tempo cientificamente defensável e adaptável a novas informações que vão sendo obtidas no decorrer do processo.

O diagnóstico da área e o Modelo Conceitual correspondente são, portanto, pontos relevantes do projeto de reabilitação de uma área contaminada.

Para Payne, Quinnan e Potter (2008) e SERDP e ESTCP (2014), o termo hidroestratigrafia está sendo cada vez mais utilizado dentro da hidrogeologia de contaminação, principalmente devido à necessidade de se desenvolver meios quantitativos para descrever o comportamento de contaminantes ou reagentes em aquíferos. O termo deriva de "hidro", que significa água e "estratigrafia", que significa o estudo das sequências sedimentares, ou ainda simplesmente, camadas sedimentares.

Segundo a Decisão de Diretoria da CETESB, DD 038/2017/C, em seu ANEXO II, é necessário delimitar tridimensionalmente o meio físico e as plumas de contaminação de uma área contaminada, considerando as fases livre, dissolvida, gasosa e retida, destacando as unidades hidroestratigráficas de importância para o transporte e a retenção dos contaminantes (CETESB, 2017).

Os termos hidroestratigrafia e unidades hidroestratigráficas utilizados neste estudo são aplicados dentro da área de engenharia de remediação ou de contaminação, relativos a matriz solo, diferentemente do que determina o Código Brasileiro de Nomenclatura Estratigráfica, assim como o Guia Estratigráfico Internacional, os quais se aplicam às rochas e dão as diretrizes na área da geologia, em escala regional.

Os depósitos sedimentares e suas fácies demonstram uma estrutura tridimensional de auto-organização que se traduz em uma relação complexa, da macroescala (metros) para a microescala (centímetros) dentro da engenharia de remediação, e o resultado é que a abordagem de estratigrafia em “camada de bolo” acaba sendo simplificada, faltando-lhe a escala de detalhe no mapeamento da arquitetura de aquíferos que controlam a distribuição e transporte de reagentes e contaminantes (PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008).

Para desenvolver soluções e remediações bem-sucedidas, é necessário refinar a escala de interpretação constantemente para entender como os reagentes e contaminantes se movem dentro das formas deposicionais que compõem os segmentos de maior e menor permeabilidade nos aquíferos. Isso só pode ser feito utilizando técnicas de alta resolução, com amostragem e caracterização contínuas, correlacionando a distribuição de uma pluma de contaminação com a hidroestratigrafia, para desenvolver a compreensão quantitativa da distribuição do fluxo e transporte dentro das fácies de maior permeabilidade, que compreendem a porosidade móvel (vias de migração advectiva), e sua interação com as fácies de

menor permeabilidade, que compreendem a porosidade imóvel (via de migração por difusão em zonas de armazenamento) (SERDP;ESTCP, 2014; PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008).

Segundo Guilbeault, Parker e Cherry (2005) e Riyis et al. (2013), é fundamental que sejam utilizadas ferramentas de investigação de alta resolução no diagnóstico de uma área, pois o subsolo possui heterogeneidades hidrogeológicas em microescala (cm) que precisam ser identificadas, como a variabilidade de unidades hidroestratigráficas.

Pitkin et al. (2014) explica que essas heterogeneidades podem controlar o fluxo da água subterrânea, o transporte e distribuição de contaminantes ou agentes remediadores.

Para Welty (2012), Suthersan, Quinnan e Welty (2015), abordagens em investigação de alta resolução indicam as zonas alvo de contaminação do subsolo que mais necessitam de tratamento, possivelmente diminuindo-se o custo e duração da etapa de remediação.



## 2 OBJETIVOS

### Objetivo Geral:

Definir perfis e seções hidroestratigráficas através de técnicas de investigação de alta resolução, executadas em uma área experimental como estudo de caso.

### Objetivos Específicos:

- a. Elaborar, comparar e discutir a classificação do tipo de solo obtida pela descrição tátil-visual e pelos ensaios CPTu;
- b. Avaliar e comparar os registros de poro pressão dos ensaios CPTu entre a utilização de graxa biodegradável no filtro de cavidade e glicerina deaerada na pedra porosa;
- c. Elaborar, comparar e discutir os perfis contínuos e seções de condutividade hidráulica a partir dos resultados de classificação do tipo de solo obtidos pela descrição tátil-visual e pelos ensaios CPTu.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Investigação de Alta Resolução e Heterogeneidades Hidrogeológicas

Uma investigação de área contaminada tem como objetivo fazer um diagnóstico que permita tomadas de decisões adequadas sobre as intervenções de reabilitação, ou seja, que visam a sua recuperação.

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2013), estratégias e tecnologias de investigação de alta resolução resultam em um entendimento em escala adequada da distribuição do contaminante, embasando de forma mais eficiente e confiável a avaliação, seleção, concepção e implementação das tecnologias de remediação.

Investigações de alta resolução fornecem os seguintes subsídios para os processos de remediação (USEPA, 2013):

- Caracterização das condições do subsolo críticas para que um projeto de remediação seja bem-sucedido, em uma escala que métodos de investigação convencionais não são capazes de atingir;
- Identificação da fase da massa de contaminantes presentes (fase líquida não aquosa (NAPL), dissolvida, sorvida e vapor);
- Avaliar se a massa de contaminantes está em uma zona de fluxo (porosidade móvel) ou em uma zona de armazenamento (porosidade imóvel).

As diretrizes de uma investigação de alta resolução de áreas contaminadas têm como foco principal permitir o diagnóstico correto, gerar uma grande densidade de dados, utilizar várias técnicas e métodos trabalhando de forma integrada, evitar ao máximo o retrabalho, tomar as decisões em tempo real ou em curto intervalo de tempo, reduzir e gerenciar as incertezas e, principalmente, elaborar um modelo conceitual com embasamento consistente (WELTY, 2012; AQUINO NETO, 2007; CLEARY, 2009).

Como abordagem teórica para um método de investigação, destaca-se a Abordagem Tríade (*Triad Approach*). Essa metodologia está fundamentada em três pontos principais (CRUMBLING, 2004; USEPA, 2006):

- Planejamento Sistemático;
- Estratégias Dinâmicas de Trabalho;
- Sistema de Aquisição de Dados em Tempo Real.

Nos projetos executados com esta abordagem é obrigatório fazer um planejamento exaustivo antes de mobilizar as equipes de campo (RIYIS, 2012), passando pelas seguintes fases:

- Conversar com todos os tomadores de decisão (*stakeholders*) envolvidos (órgãos governamentais, órgãos ambientais, prefeituras, proprietários, população, empresas terceirizadas);
- Estudar com afinco as informações prévias da área;
- Mobilizar os recursos necessários que permitam uma investigação em alta resolução e que obtenham uma grande densidade de dados em menor tempo (isso inclui laboratório móvel, sondas, máquinas, sensores e equipamentos de última geração que realizem coleta de dados “*in situ*” tanto do meio físico, quanto geoquímico);
- Designar profissionais qualificados e capacitados, para tomada de decisão em campo;
- Construir e aperfeiçoar o modelo conceitual durante a investigação de campo.

Os métodos de investigações inteligentes, em alta resolução, possuem uma integração dinâmica, em tempo real, da alta densidade de coleta de amostras de solo e água subterrânea com a interpretação da hidroestratigrafia e mapeamento da condutividade hidráulica em três dimensões (SUTHERSAN; QUINNAN; WELTY, 2015).

Das variáveis presentes no subsolo, as heterogeneidades hidrogeológicas são as mais críticas para o processo de diagnóstico, por possuírem variação medida em ordens de grandeza (CLEARY, 1989; HADLEY; NEWELL, 2012; MCGUIRE et al., 2016). Deste modo, essa variação deve ser adequadamente estudada e priorizada na investigação (PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008; QUINNAN; WELTY; KILLEMBECK, 2010; RIYIS et al., 2013).

Payne, Quinnan e Potter (2008) ressaltam que, embora a hidrogeologia seja a ciência que estuda o movimento da água em subsuperfície e tenha uma forte base na Hidrologia, seus principais fatores limitantes decorrem do meio em que a água caminha, portanto, é fortemente dependente da variação (heterogeneidade e anisotropia) geológica. A variação da condutividade hidráulica, então, é uma

variável chave para o entendimento do meio físico, que vai condicionar o fluxo subterrâneo e o transporte de contaminantes.

Payne, Quinnan e Potter (2008) definem o estudo da hidroestratigrafia como a relação entre a hidrogeologia clássica e a estratigrafia.

Nas investigações de áreas contaminadas, Payne, Quinnan e Potter (2008) recomendam uma abordagem onde a avaliação dos modelos deposicionais seja peça importante para a identificação de características hidráulicas dos aquíferos comuns entre dois pontos de coleta de dados (sondagens ou ensaios). Essa avaliação deve permitir o entendimento tridimensional da arquitetura do aquífero em escala adequada à área de estudo, a qual é diferente da escala do aquífero regional, e sua relação com o contaminante e com eventuais sistemas de remediação (produtos oxidantes, redutores, biorremediadores, surfactantes, vácuo, bombeamento, entre outros (CLEARY, 1989; QUINNAN; WELTY; KILLEMBECK, 2010, SUTHERSAN; QUINNAN; WELTY, 2015).

Payne, Quinnan e Potter (2008), Quinnan, Welty e Killemebeck (2010), Welty (2012), Riyis (2012), Suthersan, Quinnan e Welty (2015) e Welty, Curry e Quinnan (2016) propõem que é fundamental o conhecimento do perfil hidroestratigráfico, com foco na variação da condutividade hidráulica, para o entendimento dos mecanismos de transporte da água e dos contaminantes e, essa variação tem relação intrínseca com a estratigrafia. Para esse entendimento, é preciso avaliar em escala de detalhe, ou seja, em alta resolução, o meio poroso (solo), a água e o contaminante e suas interações, definindo qual horizonte estratigráfico é uma “zona de fluxo” (*flux zone*), e qual é uma “zona de armazenamento” (*storage zone*). Os mesmos trabalhos ressaltam que é fundamental ir além da tradicional coleta de amostras de solo e instalação de poços de monitoramento para compreender a hidroestratigrafia, e usar métodos com escala mais apropriada.

Suthersan, Quinnan e Welty (2015) e Welty, Curry e Quinnan (2016) propõem que a avaliação da hidroestratigrafia e mapeamento da condutividade hidráulica é essencial para a definição do modelo conceitual da área.

Ao correlacionar dados de concentração com dados de hidroestratigrafia e permeabilidade, ambos em alta resolução, é possível mapear e distinguir zonas de fluxo de massa de contaminação das zonas de armazenamento mais propícias ao transporte de contaminantes por difusão (SUTHERSAN; QUINNAN; WELTY, 2015).

Esta abordagem permite classificar, em tempo real, as escalas de variabilidade que controlam o transporte de massa na fonte e o distanciamento das plumas de contaminação na água subterrânea (SUTHERSAN; QUINNAN; WELTY, 2015)

Segundo Suthersan et al. (2010), compreender o transporte de contaminantes e sua interação dentro e entre as camadas de alta e baixa condutividade hidráulica do aquífero permite um maior aproveitamento da relação custo-benefício do projeto de investigação e remediação de áreas contaminadas, pois visa remediar menores volumes do aquífero, em comparação à restauração do aquífero como um todo, atingindo alvos que não teriam a necessidade de tratamento.

Sobre o aspecto econômico, quando comparadas a abordagem de investigação tradicional com a de alta resolução, Pitkin et al (2014) afirma que pode haver uma economia, na etapa de remediação, de 10 vezes o valor investido na investigação quando adotadas técnicas de alta resolução. Já, Suthersan, Quinnan e Welty (2015), mostrando diversos casos, estimam uma economia da ordem de 7 vezes o que foi investido.

A combinação dos conceitos de distribuição da massa de contaminantes com conceitos de variação de permeabilidade (e mecanismos de transporte advectivo-difusivo), possibilita estimar o fluxo e armazenamento de massa dos contaminantes (GILLHAM et al., 1984; GUILBEAULT; PARKER; CHERRY, 2005).

A Figura 1 mostra como as heterogeneidades hidrogeológicas influenciam significativamente na variabilidade espacial da descarga de massa de contaminantes e como uma fração relativamente pequena do aquífero pode participar na maioria do transporte advectivo (SUTHERSAN et al., 2010).

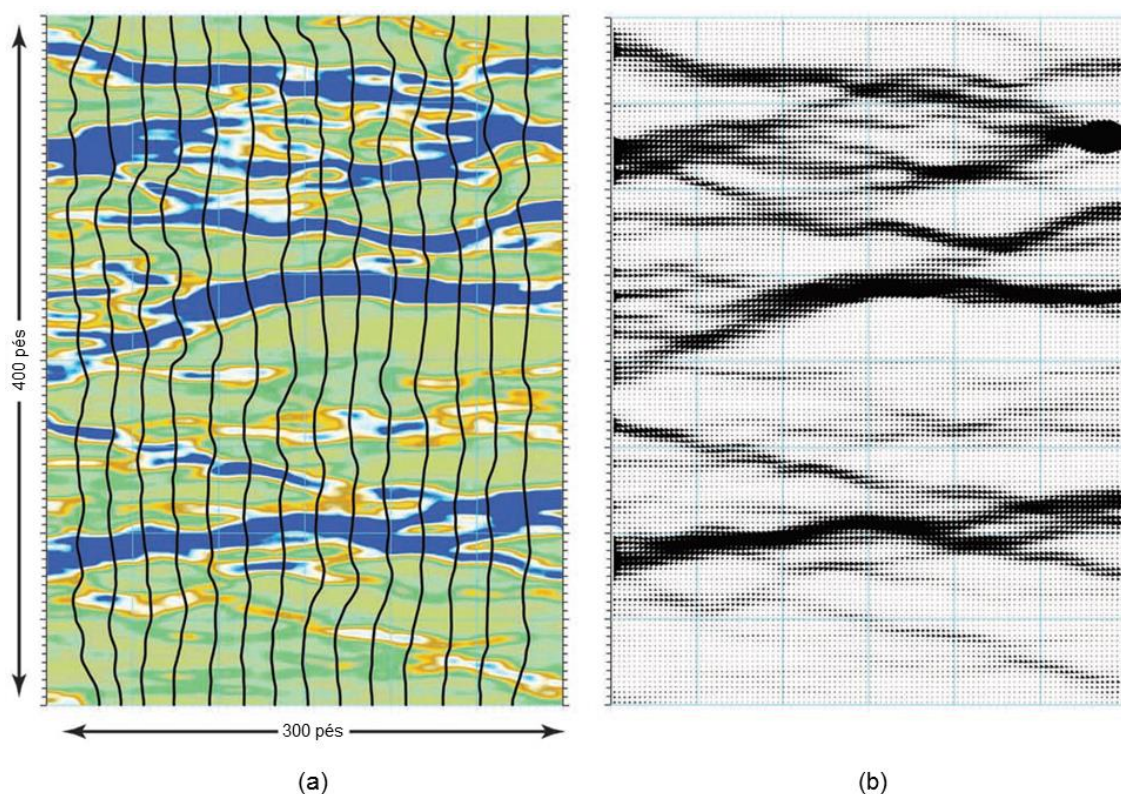


Figura 1 - Heterogeneidade do aquífero e variabilidade na distribuição espacial de fluxo de água subterrânea (adaptado de PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008)

A Figura 1 (a) mostra um aquífero em um ambiente com variação de condutividade hidráulica de três ordens de grandeza, a mais alta condutividade hidráulica representada pela cor azul e a mais baixa pela cor branca.

A Figura 1 (b) mostra o fluxo da água (cor escura) localizado somente nas zonas de maior condutividade hidráulica. Neste caso, mais de 90% do fluxo da água subterrânea está concentrado em 20% da seção transversal do aquífero, enquanto que quase nenhum fluxo ocorre em 80% do aquífero (SUTHERSAN et al., 2010).

A estrutura e heterogeneidade de um aquífero resultam em um significativo fluxo concentrado e distribuição espacial heterogênea do fluxo das águas subterrâneas (PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008).

A Figura 2 ilustra os conceitos de pluma em expansão, onde atuam principalmente o transporte advectivo nas zonas de fluxo, e pluma em contração, onde predomina o processo de transporte de massa de contaminante por difusão entre a zona de armazenamento e zona de fluxo. As condições de transporte advectivo dentro das camadas de maior condutividade hidráulica do aquífero permitem um transporte rápido de contaminantes. Já, a transferência de massa por

mecanismo difusivo, ocorre, em geral, no meio saturado, num período maior de tempo (SUTHERSAN et al., 2010).

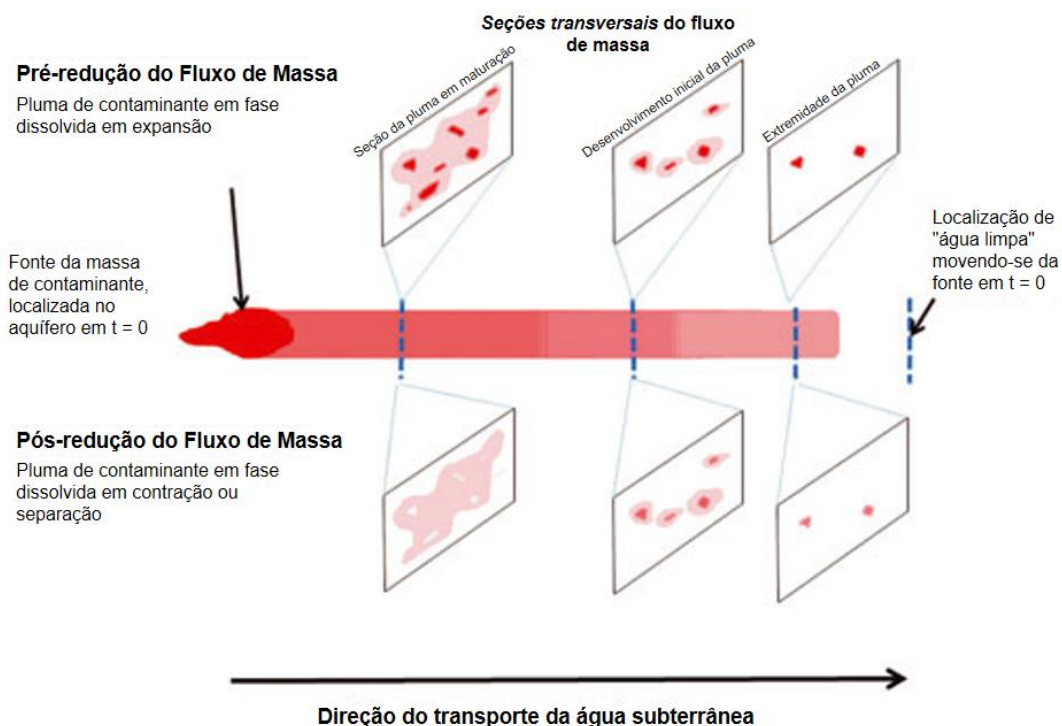


Figura 2 - Evolução conceitual de maturidade da pluma, resultante da interação entre as zonas de fluxo e de armazenamento de contaminantes e seus mecanismos de transporte (advectivo e difusivo) (adaptado de SUTHERSAN et al., 2010)

Nota-se na Figura 2 a condição de expansão e maturidade de uma pluma, usando escala de cor vermelha para descrever o nível de concentração do contaminante. Percebe-se o processo de difusão na matriz menos permeável na cor rosa. A evolução das seções denota a condição da pluma após a retirada da fonte de contaminação e aplicação de algum sistema de remediação, com a redução da transferência de massa. Após tal medida de intervenção, é observada nos segmentos com condutividades hidráulicas mais elevadas uma diminuição da concentração do contaminante (em branco).

Quanto maior for o tempo de contato da pluma de contaminação com uma formação de baixa condutividade hidráulica, maior será a quantidade de massa armazenada, o que pode ocorrer com maior probabilidade nas proximidades da fonte

(SALE; MCWHORTER, 2001; PARKER; PARK; TANG, 2008; PARKER; CHAPMAN; GUILBEAU, 2008).

Nas zonas de fluxo, devido sua característica de maior condutividade hidráulica em relação as outras unidades hidroestratigráficas que a cercam, há uma migração mais rápida do contaminante e, uma vez que a contaminação a partir da fonte é reduzida ou eliminada, inicia-se o mecanismo de transporte de massa por difusão a partir das zonas de armazenamento, devido ao gradiente de concentração gerado entre as zonas de fluxo e armazenamento. Este cenário gera a necessidade de aplicação de diversas estratégias de remediação nos diferentes estágios de evolução de uma pluma (GUILBEAULT; PARKER; CHERRY, 2005).

Os métodos de remediação como bombeamento e tratamento, extração de vapores, injeção de produtos remediadores (oxidante, redutor, biorremediador, entre outros) podem ser aplicados de forma eficiente nas zonas de fluxo. Já, nas proximidades da fonte, as concentrações relativamente elevadas podem persistir nas zonas de armazenamento, mesmo após a remediação inicial bem sucedida das zonas de fluxo, gerando, através da difusão, um efeito rebote significativo. Quando isso acontece, é necessário, então, algum tipo de intervenção para se alcançar reduções significativas na área afetada (PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008).

### **3.2 Ensaios de Penetração do Cone e do Piezocone**

Riyis (2012) divide as ferramentas de investigação de alta resolução em dois grandes grupos:

- 1) Varredura vertical de concentrações de substâncias químicas de interesse;
- 2) Varredura vertical de dados hidroestratigráficos.

No primeiro grupo estão, por exemplo, o *Membrane Interface Probe* (MIP) e os equipamentos *Laser-Induced Fluorescence* (LIF) como o UVOST e DYE-LIF (SAINT-GERMAIN et al., 2014; WELTY; CURRY; QUINNAN, 2016).

O segundo grupo, que é objeto do presente estudo, pode ser subdividido em dois subgrupos:

- 2a) Obtenção de dados hidroestratigráficos por injeção de fluido sob pressão;



2b) Obtenção de dados hidroestratigráficos por monitoramento contínuo de tensão e pressão.

No primeiro subgrupo (2a) estão o *Hydraulic Profile Tool* (HPT), fabricado pela *Geoprobe* e com suas aplicações descritas por McCall, Christy e Evald (2016), o *Direct Push Injection Logging* (DPIL), descrito por Vienken, Leven e Dietrich (2012) e o *Waterloo APS*, descrito, em sua versão inicial, por Pitkin et al. (1999).

No segundo subgrupo (2b) está o ensaio de penetração de cone elétrico (CPT) e seus derivados, como o piezocone (CPTu) e o piezocone de resistividade (RCPTu).

USEPA (2013) indica o CPT como exemplo a ser usado para a definição da estratigrafia. Diversos estudos indicam o CPTu como uma das alternativas para a obtenção de perfis hidroestratigráficos em alta resolução.

Payne, Quinnan e Potter (2008), Quinnan, Welty e Killebeck (2010), Riyis (2012), Suthersan, Quinnan e Welty (2015) e Welty, Curry e Quinnan (2016) ressaltam a importância da avaliação do perfil de poro pressão e da dissipação da poro pressão na definição da hidroestratigrafia por apresentar correlação com dados de condutividade hidráulica.

Entre as ferramentas de investigação de alta resolução para definição de perfis hidroestratigráficos, Payne, Quinnan e Potter (2008), Quinnan, Welty e Killebeck (2010) e Welty (2012) indicam o ensaio de penetração de cone (CPT) com medição da poro-pressão (CPTu). Assim como Schulmeister et al. (2003) e Riyis (2012) demonstram a aplicação do CPTu aliado ao uso do sensor de condutividade elétrica (RCPTu).

Desde o início dos anos 1980, profissionais têm utilizado como metodologia o CPT para analisar o tipo de comportamento de solo após as publicações de Robertson e Campanella (1983) e Robertson e Campanella (1986). Informações detalhadas sobre ensaios de penetração de cone (CPT) são dadas também por Meigh (1987), Lunne, Robertson e Powell (1997) e Robertson e Cabal (2015).

Segundo Payne, Quinnan e Potter (2008) e Robertson e Cabal (2015) o tipo de comportamento do solo é derivado a partir de medições obtidas por três sensores primários conforme a ponteira do cone avança no solo: ponteira cônica - medidas de resistência à penetração (resistência de ponta); luva de atrito lateral - medidas de atrito ao longo da parede do cilindro da sonda; e poro-pressão - mede a pressão hidrostática nos solos saturados.

O método é ideal para diferenciar, em escala de detalhe, diferenças de unidades hidroestratigráficas, como a matriz do aquífero (areias e cascalhos), de aquitardes (siltes e argilas) devido a maneira como os sensores respondem às características do solo (PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008):

- **Resistência de ponta:** é proporcional ao tamanho do grão, quando os solos exibem níveis comparáveis de compactação ou densidade no local. Maior resistência de ponta implica em um aumento de tamanho do grão, mas pode também indicar cimentação, condições muito densas do solo e argilas mais consolidadas.
- **Atrito lateral:** é proporcional ao teor de argila e silte por conta de sua natureza coesiva. Geralmente, maior atrito lateral implica em um maior teor de silte e argila. A razão entre atrito lateral e resistência de ponta, denominada razão de atrito, é comumente usada com a resistência de ponta no ábaco de tipo de comportamento de solo de Robertson (2010) e Robertson e Cabal (2015).
- **Poro pressão:** a pressão hidrostática aumenta linearmente com a profundidade abaixo do nível freático. Conforme a ponteira avança na zona saturada, a água subterrânea vai sendo deslocada. Elevadas permeabilidades de areias e cascalhos facilmente dissipam essa água deslocada, produzindo medidas próximas à pressão hidrostática. Siltes e argilas não dissipam o excesso de pressão na água facilmente, resultando em valores de poro-pressão negativos e positivos medidos no sensor. Uma característica fundamental dos siltes é que eles são dilatantes, isto é, são menos coesos na medida em que eles se expandem quando perturbados, mas são caracterizados por permeabilidade relativamente baixa. Como resultado, siltes comumente mostram desvios de poro-pressão negativos medidos durante o avanço da sonda. Em contraste, argilas não dilatam e são caracterizadas por baixa permeabilidade. Quando a sonda avança em argilas, o excesso de poro-pressão não pode se dissipar e picos de pressão positiva são medidos em excesso de pressão hidrostática. A resposta à poro-pressão é um ponto chave para distinguir a matriz de aquífero permeável de areia e cascalho de aquitardes menos permeáveis, compostos de siltes e argilas. Quando são necessárias estimativas quantitativas de permeabilidade, o CPTu também pode ser usado para medir a taxa de

dissipação da poro-pressão em solos moderadamente permeáveis e estimar o valor da condutividade hidráulica.

Segundo Riyis (2012), ensaios de cone elétrico (CPT) e suas variações, como piezocone (CPTu) ou piezocone de resistividade (RCPTu) já têm sido utilizados com frequência fora do Brasil como ferramenta para aquisição de dados em tempo real para elaboração do Modelo Conceitual Hidroestratigráfico nas Investigações de Alta Resolução de Áreas Contaminadas.

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

Quinnan, Welty e Killebeck (2010) e Vienken, Leven e Dietrich (2012) compararam diversas técnicas para mapear a 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 (PPDT) permitem um mapeamento vertical contínuo da variação da condutividade hidráulica, detectando as zonas de fluxo e armazenamento.

Segundo Giacheti et al. (2000), a partir da interpretação das medidas em tempo real pelo CPTu (resistência à penetração da ponta -  $q_t$ , o atrito lateral -  $f_s$  e poro-pressão -  $u$ ) durante a penetração do equipamento, é possível identificar detalhadamente o perfil estratigráfico. A base desta interpretação é a diferenciação da penetração drenada (areias) em relação à não-drenada (argilas) do solo.

O procedimento do ensaio de penetração de cone está padronizado pela ASTM D3441/1998 e ASTM D6067/2010, tanto para o ensaio com medida de poro-pressões (CPTu), como para o ensaio sem essa medida (CPT). No Brasil, o ensaio era padronizado pela ABNT NBR 12069/1991 (MB 3406) (GIACHETI, 2001), entretanto esta norma foi cancelada em 20/07/2015.

Na Figura 03 tem-se a representação gráfica de uma ponteira de piezocone.

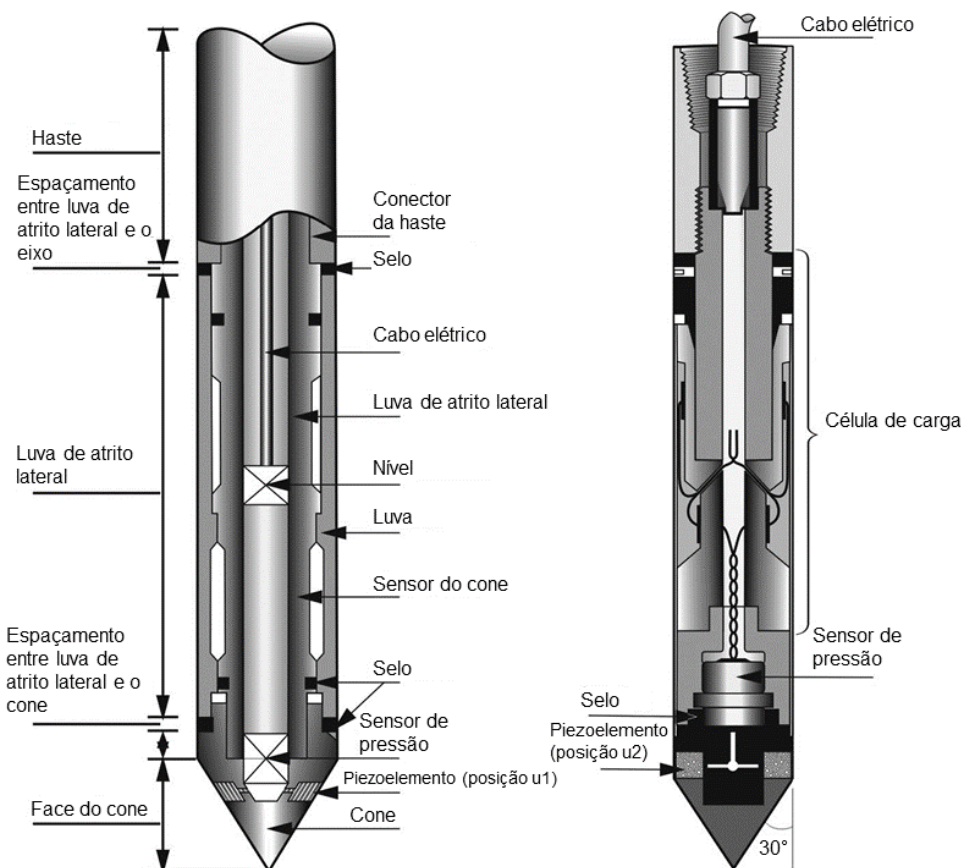


Figura 3 – Representação esquemática de uma ponteira de piezocone (adaptado de SCHNAID, 2009)/

No esquema acima tem-se o piezoelemento na posição  $u_1$  no cone à esquerda da Figura 3, e na posição  $u_2$  no cone à direita, além da posição dos sensores que medem a resistência de ponta ( $q_c$ ), localizado na ponta do cone, e o atrito lateral ( $f_s$ ), através da luva de atrito lateral.

Conforme já mencionado, os cones possuem células de carga que registram durante sua penetração a resistência de ponta ( $q_c$ ) e o atrito lateral ( $f_s$ ). Os valores da poro-pressão ( $u$ ) são determinados no piezocone, sensor adicional ao cone, através de um transdutor de pressão, o qual pode estar localizado na sua ponta (posição  $u_1$ ), atrás da ponta (posição  $u_2$ ) ou atrás da luva de atrito ( $u_3$ ) (SCHNAID, 2009).

Nas medidas de resistência de ponta ( $q_c$ ) do cone tem-se o efeito de áreas desiguais, pois a área do cone que recebe a pressão é diferente da área interna pela qual é transmitida ao sensor, por conta da localização do piezoelemento na posição  $u_2$ , conforme ilustrado na Figura 04. Para obtenção da resistência real na

ponta do cone, é necessário aplicar a correção dada pela Equação 1 (SCHNAID, 2009).

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

Onde,

$q_t$  = resistência do cone corrigida

$q_c$  = resistência do cone medida

$a$  = razão de área ( $= A_N / A_T$ )

$A_N$  = área da seção interna

$A_T$  = área da seção externa

$u_2$  = poro-pressão medida durante ensaio

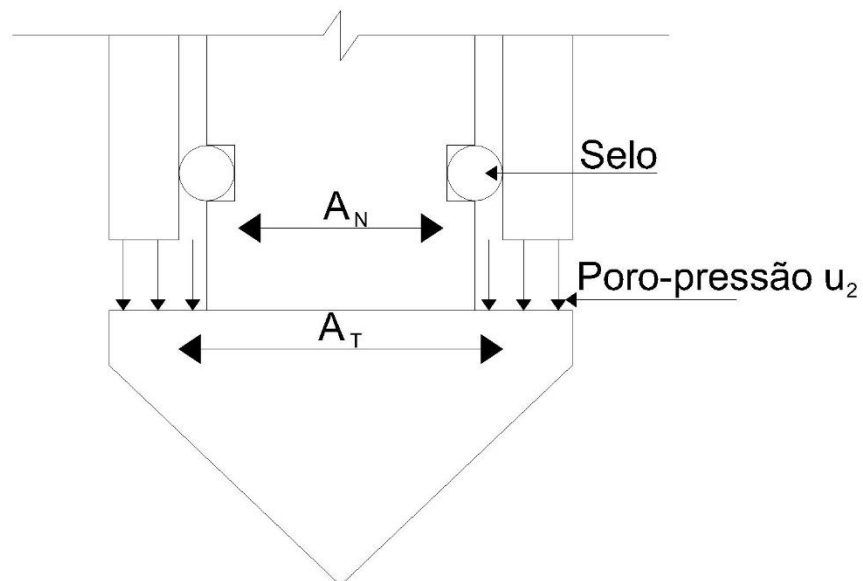
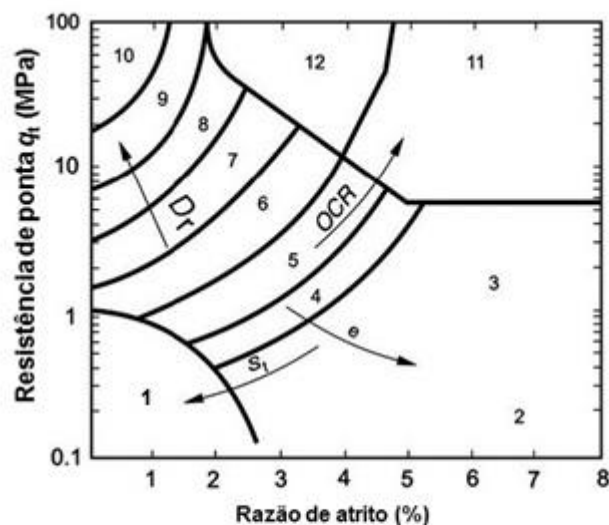


Figura 4 – Representação esquemática da correção do efeito de áreas desiguais em um piezocone

Segundo Robertson (2010) e Robertson e Cabal (2015), uma das principais aplicações do CPT é a caracterização do tipo de solo. Em geral, a interpretação dos seus registros definem que as areias apresentam resistência de ponta ( $q_t$ ) elevada, enquanto as argilas tem baixos valores de  $q_t$ , já para a razão de atrito ( $R_f$

=  $f_s / q_t$ ), areais apresentam baixos valores de  $f_s$  e respectivamente  $R_f$ , enquanto estes são elevados nas argilas.

A interpretação do tipo de solo baseado no CPT é denominada por Robertson e Campanella (1986) como Tipo de Comportamento do Solo (*Soil Behavior Type*) – SBT, no qual é possível definir o SBT de acordo com sua classificação no ábaco da Figura 5, que leva em conta os valores de resistência de ponta ( $q_t$ ) e razão de atrito ( $R_f$ ).



Zona: Tipo de comportamento do solo

- |                            |                                    |                                |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Solo fino sensível      | 5. Silte argiloso a argila siltosa | 9. Areia                       |
| 2. Matéria orgânica        | 6. Silte arenoso a silte argiloso  | 10. Areia com cascalho a areia |
| 3. Argila                  | 7. Areia siltosa a silte arenoso   | 11. Solo fino muito rijo*      |
| 4. Argila siltosa a argila | 8. Areia a areia siltosa           | 12. Areia a areia argilosa*    |
- \* Muito consolidado ou cimentado

Figura 5 – Ábaco para identificação do tipo de comportamento do solo não normalizado (SBT) (adaptado de ROBERTSON et al., 1986)

Robertson (1990) explica que conforme o aumento da profundidade dos ensaios CPT e CPTu, aumentam as tensões totais e efetivas no maciço, aumentando também os valores de resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão. Portanto, essas tensões foram consideradas em seus ábacos, sendo normalizados os dados dos ensaios CPT e CPTu para obtenção do SBT, passando-se a denominar SBT<sub>N</sub>.

Outra modificação em relação ao ábaco de Robertson (1986) é que o ábaco normalizado proposto por Robertson (1990) e apresentado na Figura 6 adiante,

incluiu um ábaco adicional de poro-pressão normalizada,  $B_q$ , que pode auxiliar na classificação de solos moles e de grãos finos saturados.

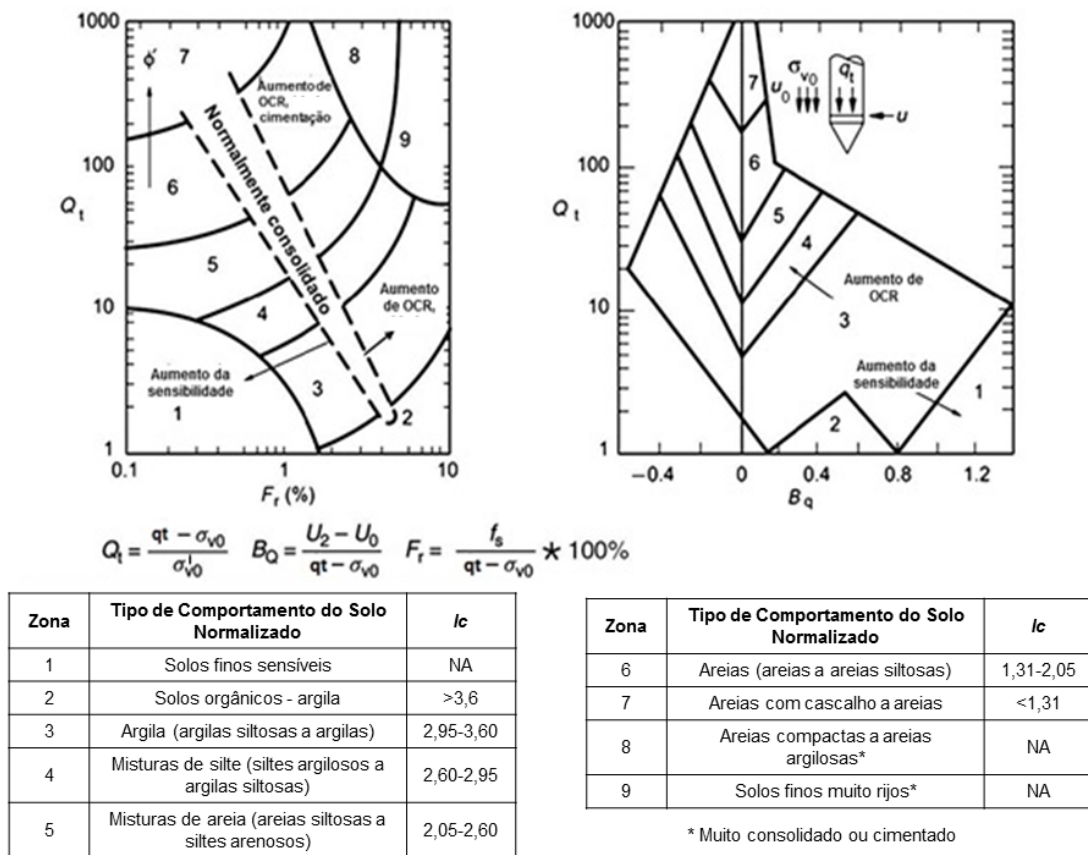


Figura 6 – Ábaco CPT normalizado ( $SBT_N$ ) (adaptado de ROBERTSON, 1990)

Onde,

$Q_t$  = resistência de ponta normalizada

$q_t$  = resistência de ponta

$F_r$  = razão de atrito normalizada

$B_q$  = poro-pressão normalizada

$\sigma_{v0}$  = tensão total vertical

$\sigma_{v0}'$  = tensão efetiva vertical

$f_s$  = atrito lateral

$U_2$  = poro-pressão medida no ensaio

$U_0$  = pressão neutra ou hidrostática

Em argilas moles, as medidas de poro-pressão ( $u_2$ ) podem ser elevadas, enquanto que em argilas rijas, siltes densos e areias siltosas podem ser pequenas

e às vezes negativas em relação às pressões neutras ( $u_0$ ) (ROBERTSON; CABAL, 2015).

Segundo Robertson (2010), a taxa de dissipação da poro-pressão durante uma pausa na penetração do cone também pode orientar sobre a identificação do tipo de solo. Em solos arenosos, qualquer excesso de poro-pressão tende a se dissipar muito mais rápido do que em solos argilosos.

Jefferies e Davies (1993) definiram um índice de tipo de comportamento de solo,  $I_c$ , que poderia representar as zonas do ábaco de CPT normalizado (SBT<sub>N</sub>) mostrado na Figura 6 (SBT normalizado), onde  $I_c$  é o raio dos círculos essencialmente concêntricos que representam os limites entre cada tipo de solo SBT<sub>N</sub>.

Robertson e Wride, (1998), atualizado por Robertson (2009) modificaram a definição de  $I_c$ , assim como mostrado por Robertson (2010) e por Robertson e Cabal (2015) na Equação 2:

$$I_c = ((3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2)^{0,5} \quad (2)$$

Onde,

$$Q_{tn} = ((q_t - \sigma_{vo})/P_a) * (P_a / \sigma'_{vo})^n$$

$$F_r = (f_s / (q_t - \sigma_{vo})) \times 100\%$$

$Q_{tn}$  = resistência de ponta normalizada (adimensional)

$F_r$  = razão de atrito normalizada, em %

$(q_t - \sigma_{vo})/P_a$  = resistência de ponta adimensional

$(P_a / \sigma'_{vo})^n$  = fator de normalização da tensão

$q_t$  = resistência de ponta corrigida

$f_s$  = atrito lateral

$\sigma_{vo}$  e  $\sigma'_{vo}$  são, respectivamente, as tensões total e efetiva

$P_a$  = pressão atmosférica, na mesma unidade de  $\sigma_{vo}$ ,  $q_t$  e  $\sigma'_{vo}$

$n$  = expoente de tensão, que varia de acordo com o SBT

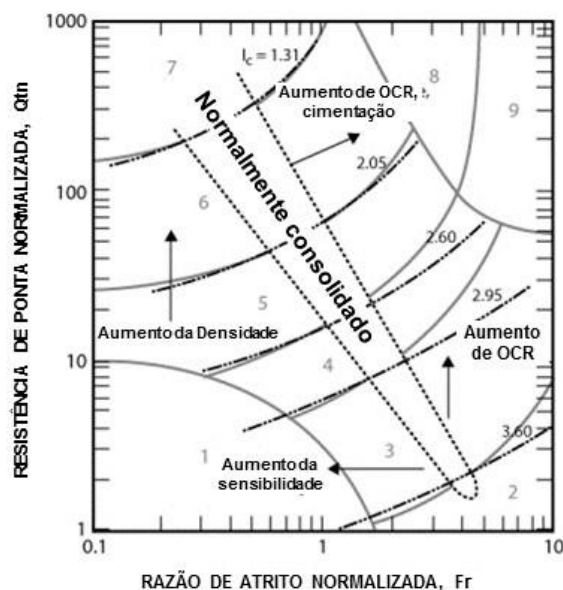
Robertson (2009) mostra uma discussão detalhada sobre normalização de tensão e sugeriu a abordagem adiante, pela Equação 3, para permitir uma variação do expoente de tensão ( $n$ ) de acordo com SBT<sub>N</sub>  $I_c$  (tipo de solo) e nível de tensão:



$$n = 0,381 (I_c) + 0,05 (\sigma'_{vo}/p_a) - 0,15 \quad (3)$$

onde  $n \leq 1,0$

Robertson (2010) atualizou o ábaco CPT normalizado  $SBT_N$  de Robertson (1990), assim como mostra Robertson e Cabal (2015) na Figura 7.



Zona	Tipo de Comportamento do Solo ( $SBT_N$ )	$I_c$
1	Solos finos sensíveis	N/A
2	Solos orgânicos - argila	>3,60
3	Argila (argilas siltosas a argilas)	2,95 – 3,60
4	Misturas de silte (siltos argilosos a argilas siltosas)	2,60 – 2,95
5	Misturas de areia (areias siltosas a siltos arenosos)	2,05 – 2,60
6	Areias (areias a areias siltosas)	1,31 – 2,05
7	Areias com cascalho a areias densas	< 1,31
8	Areias muito compactas a areias argilosas*	N/A
9	Solos finos muito rijos*	N/A

\* Muito consolidado ou cimentado

Figura 7 – Ábaco CPT normalizado ( $SBT_N$ ),  $Q_{tn} - F_r$ , mostrando os intervalos de valores de  $I_c$  (adaptado de ROBERTSON; CABAL, 2015).

O índice do tipo de comportamento do solo,  $I_c$ , não se aplica às zonas 1, 8 e 9, pois seu fundamento se baseia no raio dos círculos concêntricos, e essas zonas estão fora do posicionamento necessário para o cálculo do índice (ROBERTSON; CABAL, 2015).

O ábaco de Robertson et al. (1986) faz uso das medidas básicas do CPT,  $q_c$  e  $f_s$ , e tem 12 tipos de solo (zonas), enquanto que o ábaco de Robertson (1990) utiliza parâmetros normalizados e tem 9 tipos de solo.

Robertson (2010) modificou o ábaco de Robertson et al. (1986), deixando a medida de resistência de ponta adimensional,  $(q_c/p_a)$ , onde  $p_a$  = pressão atmosférica ( $p_a = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$ ), e  $R_f$  (em porcentagem), ambos em escalas logarítmicas para expandir a porção onde  $R_f < 1\%$ . No ábaco de Robertson et al. (1986) a escala de  $R_f$  é natural e a unidade de  $q_t$  é MPa.

Na modificação mostrada por Robertson (2010), foram unificados os tipos de solo dos ábacos, sendo reduzido de 12 zonas SBT (ROBERTSON et al.1986) para 9 SBT<sub>N</sub> (ROBERTSON, 1990).

A Tabela 1 sintetiza essa unificação.

Tabela 1 – Unificação entre os ábacos de Robertson et al. (1986), CPT não normalizado (SBT) e Robertson (1990), CPT normalizado (SBT<sub>N</sub>)

Zonas SBT Robertson et al. (1986)	Zonas SBT <sub>N</sub> Robertson (1990)	Descrição de Tipo de Solo - SBT unificado
1	1	Solos finos sensíveis
2	2	Solos orgânicos - argila
3	3	Argila (argilas siltosas a argilas)
4 e 5	4	Misturas de silte (siltes argilosos a argilas siltosas)
6 e 7	5	Misturas de areia (areias siltosas a siltes arenosos)
8	6	Areias (areias a areias siltosas)
9 e 10	7	Areias com cascalho a areias
12	8	Areias compactas a areias argilosas*
11	9	Solos finos muito rijos*

\* Muito consolidado ou cimentado

Com a unificação desses ábacos, reduzindo o número de zonas de Robertson et al. (1986), torna-se mais fácil a comparação entre os tipos de solo SBT normalizados e não normalizados.

Robertson (2010) mostra um Índice de Comportamento de Solo ( $I_{SBT}$ ) definido a partir do ábaco SBT não normalizado unificado, com  $Q_t$  adimensional

$(q_c/p_a)$ , e  $R_f$  em escala logarítmica, conforme descrito anteriormente, dado pela Equação 4, a seguir:

$$I_{SBT} = (3,47 - \log (q_c/p_a))^2 + (\log R_f + 1,22)^2)^{0,5} \quad (4)$$

Onde:

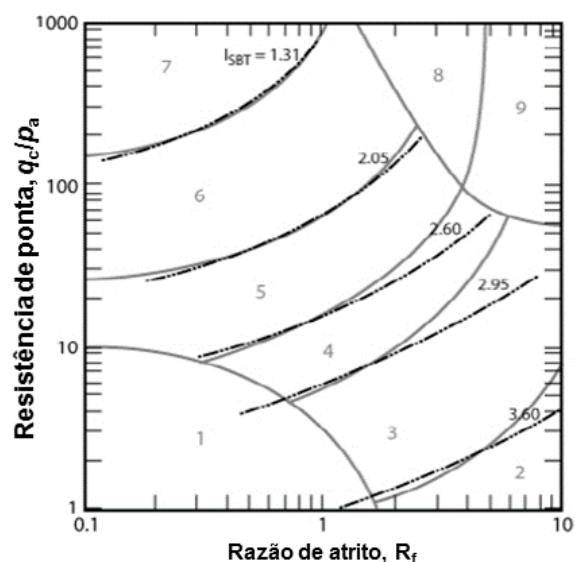
$q_c$  = resistência de ponta (ou resistência de ponta corrigida,  $q_t$ )

$p_a$  = pressão atmosférica

$R_f$  = razão de atrito =  $(f_s/q_c) \cdot 100\%$

$f_s$  = atrito lateral

A Figura 8 mostra como ficou o ábaco modificado de SBT não normalizado de Robertson (2010), e a posição do  $I_{SBT}$ .



Zona	Tipo de Comportamento do Solo (SBT)
1	Solos finos sensíveis
2	Solos orgânicos - argila
3	Argila (argilas siltosas a argilas)
4	Misturas de silte (siltos argilosos a argilas siltosas)
5	Misturas de areia (areias siltosas a siltos arenosos)
6	Areias (areias a areias siltosas)
7	Areias com cascalho a areias
8	Areias compactas a areias argilosas*
9	Solos finos muito rijos*

\* Muito consolidado ou cimentado

Figura 8 – Ábaco modificado de SBT não normalizado com base na resistência de ponta adimensional,  $(q_c/p_a)$  e razão de atrito,  $R_f$ , mostrando os limites de contornos do  $I_{SBT}$  (adaptado de ROBERTSON; CABAL, 2015)

O índice SBT não normalizado ( $I_{SBT}$ ) é essencialmente o mesmo que o Índice SBT<sub>N</sub> normalizado ( $I_c$ ), porém, faz uso apenas das medidas básicas do ensaio CPT.

Em geral, o  $I_c$  fornece uma informação de SBT mais confiável do que o SBT não normalizado do  $I_{SBT}$ , mas quando a tensão efetiva vertical fica entre 50 kPa e 150 kPa, geralmente há pouca diferença entre os índices normalizado e não normalizado. O  $I_{SBT}$  tem a vantagem de poder ser obtido em tempo real, no campo, no momento do ensaio, por fazer uso apenas dos índices básicos do CPT (ROBERTSON, 2010).

### **3.2.1 Estimativa da Condutividade Hidráulica através do CPT e CPTu**

Os valores da condutividade hidráulica, na hidrogeologia clássica, conforme mostraram Fetter (2004) e Freeze e Cherry (1979), podem ser obtidos a partir da interpretação de ensaios hidrogeológicos tipo *slug test* ou *bail test*.

Esses ensaios são realizados dentro de poços de monitoramento, considerando sua seção filtrante totalmente dentro da mesma camada que se quer obter a condutividade hidráulica. Porém, normalmente, os poços de monitoramento, por questões práticas, tem no mínimo, 1,0 m de seção filtrante (RIYIS, 2015).

Suthersan, Quinnan e Welty (2015), Payne, Quinnan e Potter (2008), Guilbeault, Parker e Cherry (2005), entre outros, já mostraram que 1,0 m de seção filtrante pode conter muitas unidades hidroestratigráficas diferentes, com condutividades hidráulicas diferentes, variando até 5 ordens de grandeza. Dessa forma, o *slug test*, mesmo sendo um ensaio consagrado na hidrogeologia, não fornece as informações necessárias na escala que uma investigação de alta resolução necessita se aplicado interceptando diversas unidades hidroestratigráficas distintas, sendo, portanto, imperativo obter essa informação de outra forma, em detalhe (SUTHERSAN et al, 2010).

Freeze e Cherry (1979) mostram a variação da condutividade hidráulica conforme o material geológico, assim como segue na Figura 9.

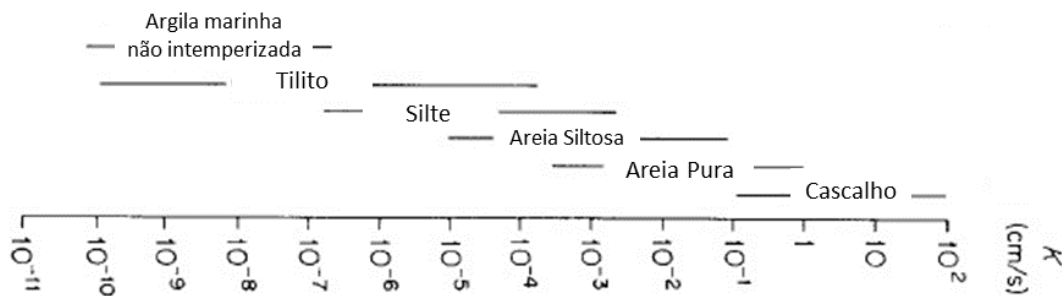


Figura 9 – Condutividade hidráulica pelo tipo de solo (adaptado de FREEZE; CHERRY, 1979)

Lunne, Robertson e Powell (1997) sugeriram um método aproximado para estimar a condutividade hidráulica a partir da classificação do tipo de solo no ábaco não normalizado de Robertson et al. (1986). Isto foi pautado pela observação básica que areias normalmente têm alta permeabilidade e argilas baixa permeabilidade e que como o CPT pode ser usado para classificar o tipo de solo, poderia ser também empregado para a estimativa da condutividade hidráulica. No entanto, Lunne et al (1997) aplicaram um amplo intervalo de condutividade hidráulica para cada determinado tipo de solo (SBT).

Robertson (2010) explica que é crescente o uso do índice do tipo de comportamento do solo ( $I_c$ ) com resultados de CPT normalizados como um meio de variação de correlações empíricas, em função da classificação do tipo de solo. Isto também pode ser aplicado para correlacionar os dados de  $I_c$  com a condutividade hidráulica.

Robertson (2010) e Robertson e Cabal (2015) mostram uma estimativa aproximada da condutividade hidráulica do solo,  $K$ , através do índice do tipo de comportamento do solo normalizado  $SBT_N$ , usando o ábaco apresentado na Figura 7, conforme mostram as Equações 5 e 6 e Figura 10:

$$\text{Quando } 1,0 < I_c \leq 3,27 \quad k = 10^{(0,952 - 3,04 I_c)} \text{ m/s} \quad (5)$$

$$\text{Quando } 3,27 < I_c < 4,0 \quad k = 10^{(-4,52 - 1,37 I_c)} \text{ m/s} \quad (6)$$

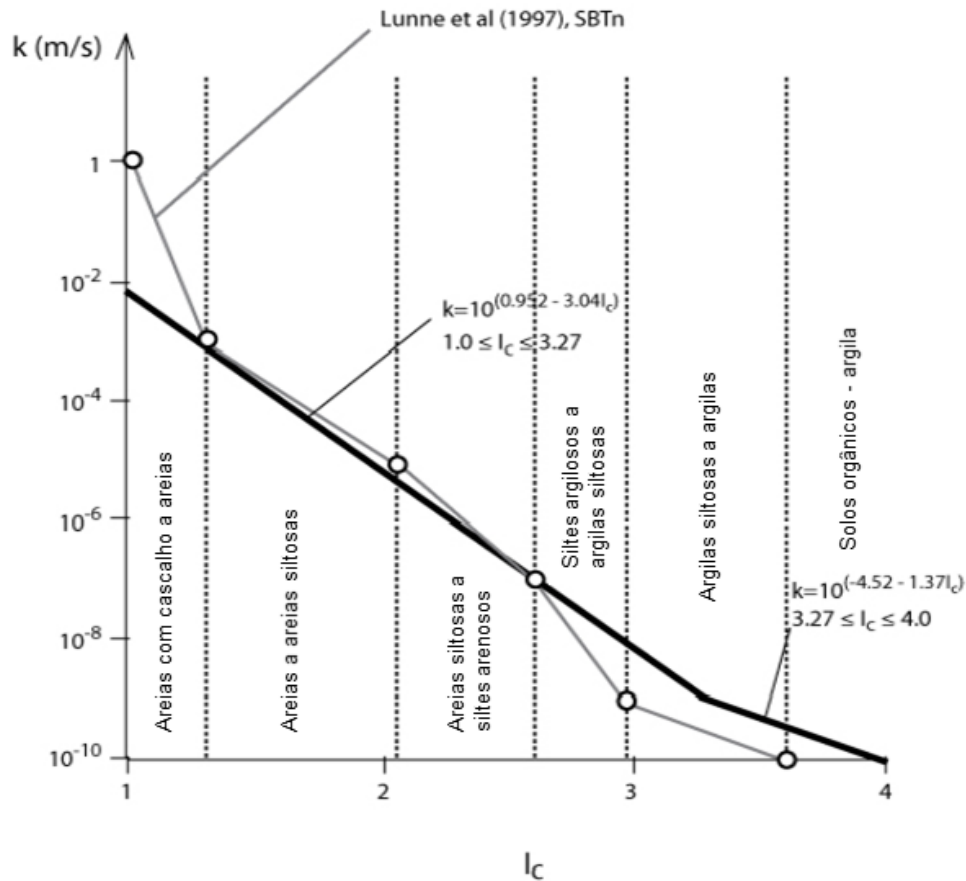


Figura 10 – Variação de condutividade hidráulica do solo em função de  $I_c$  (SBT<sub>N</sub>) (adaptado de ROBERTSON, 2010)

Esta relação pode ser empregada para fornecer uma estimativa aproximada de condutividade hidráulica e apresentar sua variação vertical de acordo com o ensaio CPT (ROBERTSON; CABAL, 2015).

Kram et al. (2008) e Parez e Fauriel (1988) mostram a relação entre o  $t_{50}$  e a condutividade hidráulica, onde  $t_{50}$  é o tempo necessário para atingir 50% da dissipação do excesso de poro-pressão  $u_2$  medido durante o ensaio CPTu. Conforme Equação 7 e Figura 11 a seguir:

$$K_h \text{ (cm/s)} \approx \left( \frac{1}{251 * t_{50}} \right)^{1,25} \quad (7)$$

Onde:

$t_{50}$  é dado em segundos.

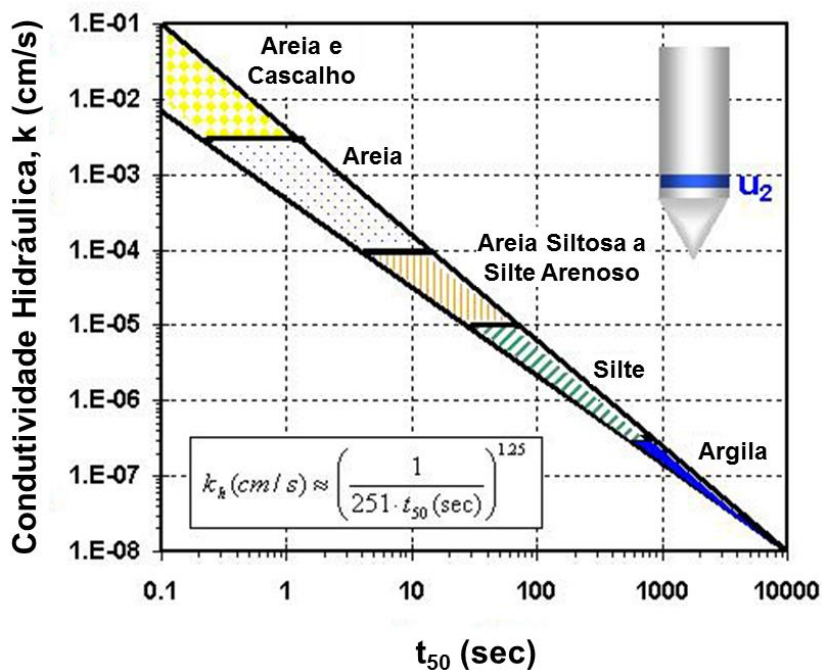


Figura 11 - Relação entre a condutividade hidráulica e  $t_{50}$  de Parez e Fauriel (1988) (adaptado de KRAM et al., 2008)

Através desta figura é possível observar, graficamente, a relação entre a condutividade hidráulica e o tempo de dissipação do excesso de poro-pressão. Segundo Kram et al. (2008), o  $t_{50}$  é mais próximo de zero apenas nas areias e cascalhos, uma vez que sedimentos grossos, com alta permeabilidade, permitem a rápida dissipação do excesso de poro-pressão, e os valores de poro-pressão são mais próximos da pressão hidrostática. Solos finos, por sua vez, apresentam baixa permeabilidade, não permitindo a rápida dissipação desta pressão, e o valor de poro-pressão ( $u$ ) medido no piezômetro aumenta.

Riyis et al. (2013) mostrou que é possível relacionar métodos de obtenção do valor de  $K$  pontual (seja realmente pontual através da relação descrita por Parez e Fauriel (1988), ou seja por um *slug test* em um poço de monitoramento de seção curta, abaixo de 0,30 m) com medidas contínuas obtidas pelo ensaio RCPTu.

As ferramentas de obtenção de dados hidroestratigráficos por injeção de fluidos sob pressão (HPT, DPIL) são capazes apenas de fornecer dados qualitativos de condutividade hidráulica em microescala (cm) de forma contínua. Quinnan, Welty e Killebeck (2010), Welty (2012) e Riyis et al. (2013) mostram que, utilizando ferramentas de obtenção de dados hidroestratigráficos por monitoramento de pressão (CPTu, RCPTu), é possível obter dados quantitativos

confiáveis de condutividade hidráulica, da mesma maneira que os ensaios tipo *slug test*, métodos consagrados na hidrogeologia, pois este, embora já bem estudado e cientificamente defensável, depende de dados gerados a partir de um poço de monitoramento, instrumento que se não for dimensionada adequadamente sua escala de seção filtrante em relação ao local de estudo e Modelo Conceitual da Área, não é capaz de fornecer a informação desejada.



## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da Área

A área investigada está localizada no Centro Universitário Senac - Campus Santo Amaro, na Avenida Engenheiro Eusébio Stevaux, 823 - Santo Amaro, São Paulo - SP. Esse campus abriga os cursos de pós-graduação em Gerenciamento e Remediação de Áreas Contaminadas, além de diversos cursos de graduação e outros programas de pós-graduação, e possui uma área aproximada de 118.056 m<sup>2</sup>.

A área investigada está inserida no bairro de Jurubatuba, Zona Sul do município de São Paulo. A região de Jurubatuba é classificada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) como uma das Áreas Críticas Contaminadas do estado de São Paulo. Possui uso e ocupação predominantemente industrial, por isso as origens das contaminações, em especial, por substâncias derivadas de solventes halogenados de uso industrial.

Sendo assim, essa região recebe atenção especial não somente da CETESB, mas também de outros órgãos estaduais e municipais, como o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Centro de Vigilância Sanitária Estadual e a Vigilância Sanitária Municipal (COVISA), que participam dos processos regulatórios de outorga sobre o uso, principalmente, da água subterrânea.

Diversas medidas de gerenciamento e restrições de controle e uso da água subterrânea dessa região foram implementadas pelos referidos órgãos.

As atividades da pesquisa, onde foram realizados os ensaios e trabalhos de campo, correspondem a uma área de aproximadamente 300 m<sup>2</sup>.

A Figura 17 apresenta a área investigada, a Figura 18 mostra a posição dos pontos de sondagem *Direct Push Dual Tube Sampling* (DPDTS) e dos ensaios CPTu realizados e a Figura 19 a vista geral da área nos dias de trabalho de campo.

Antes do deslocamento para realização dos trabalhos de campo, fez parte da preparação pré-campo levantar as informações sobre a área de estudo e, como a descrição do tipo de solo foi uma etapa importante na pesquisa, mapas geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos auxiliaram a ter uma ideia preliminar sobre a possível litologia a ser encontrada no local, dando suporte à interpretação no momento da descrição em campo do perfil do subsolo local.

A Figura 12 mostra as unidades geológicas próximas à área de estudo.

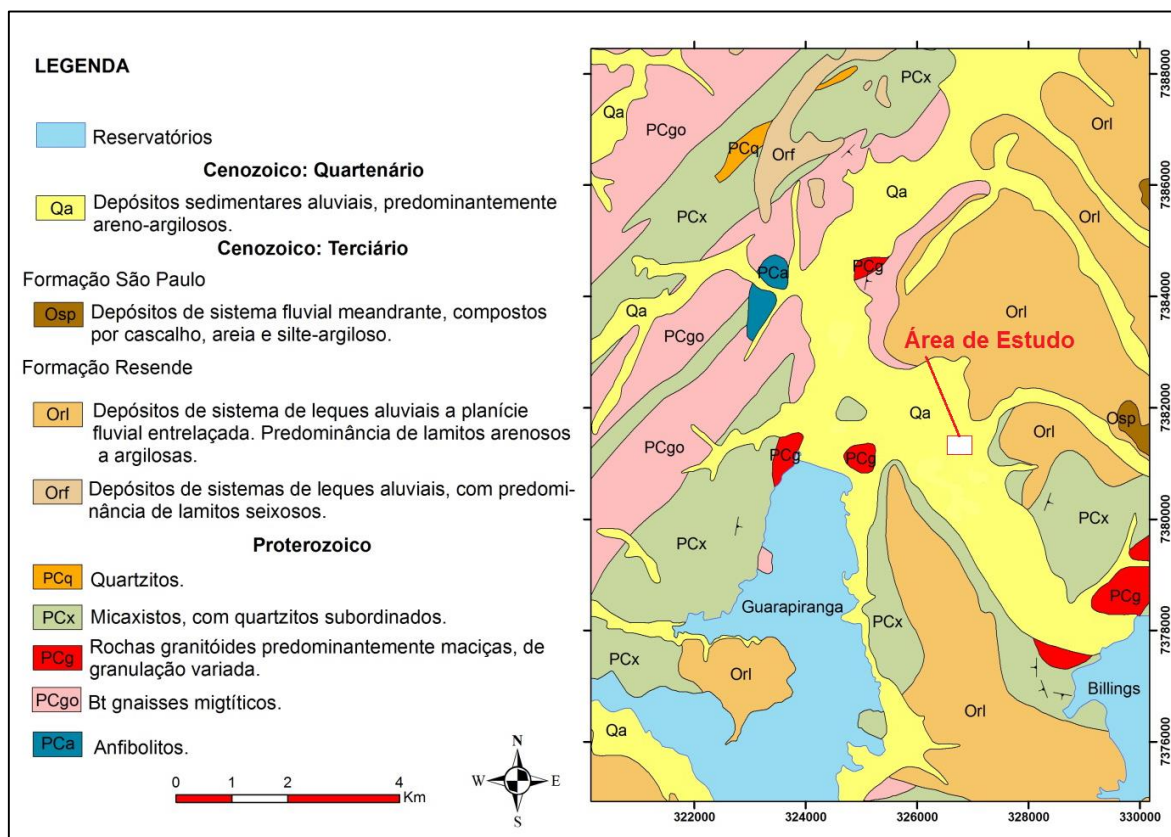


Figura 12 – Mapa Geológico da Área de Estudo (adaptado de FUSP, 2002)

Observa-se que o local estudado está inserido na região dos sedimentos aluvionares do Quaternário. Segundo Monteiro et al. (2012), a cobertura quaternária nessa região é constituída por argilas ricas em matéria orgânica, de coloração escura, moles a muito moles, e também por camadas arenosas, às vezes, com matéria orgânica ou cascalho, de coloração amarela a cinza escura, fofas a compactas.

Sobre a hidrogeologia, conforme mostra a Figura 13, a área investigada pertence ao Aquífero Quaternário (Qa), que faz parte do Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), dentro da Bacia do Alto Tietê (BAT), e engloba depósitos sedimentares aluviais, predominantemente areno-argilosos.

Nesta Figura 13, o Aquífero A, do Sistema Aquífero Cristalino (SAC), corresponde à associação de unidades que incluem rochas granitóides (PCg e PCgo), rochas gnáissicas (PCgn), filitos e xistos subordinados (PCf). Caracteriza-se por aquífero livre onde as melhores vazões estão associadas às falhas e fraturas

nas rochas, com baixa produtividade. Vazão média individual por poço de 9,1 m<sup>3</sup>/h e capacidade específica de 0,2 m<sup>3</sup>/h/m (DAEE/IG, 2009).

O Aquífero B, do Sistema Aquífero Cristalino, corresponde à associação de rochas predominantemente metassedimentares que incluem quartzitos (PCq), micaxistos (PCx), anfibolitos (PCa) e rochas carbonáticas (PCc). Caracteriza-se por aquífero livre onde as melhores vazões estão associadas às falhas e fraturas nas rochas, com média a baixa produtividade. Vazão média individual por poço de 17,5 m<sup>3</sup>/h e capacidade específica de 1,4 m<sup>3</sup>/h/m (DAEE/IG, 2009).

A Figura 14 ilustra a distância de aproximadamente 1,0 km do local estudado ao Canal do Jurubatuba.

As Figuras 15 e 16 mostram o traçado aproximado do antigo meandro do Rio Pinheiros, nas décadas de 20 e 30, antes de sua retificação, passando exatamente na área de estudo, conferindo uma complexidade ainda maior em relação à heterogeneidade hidrogeológica do local estudado.

Os materiais e procedimentos detalhados são descritos adiante.

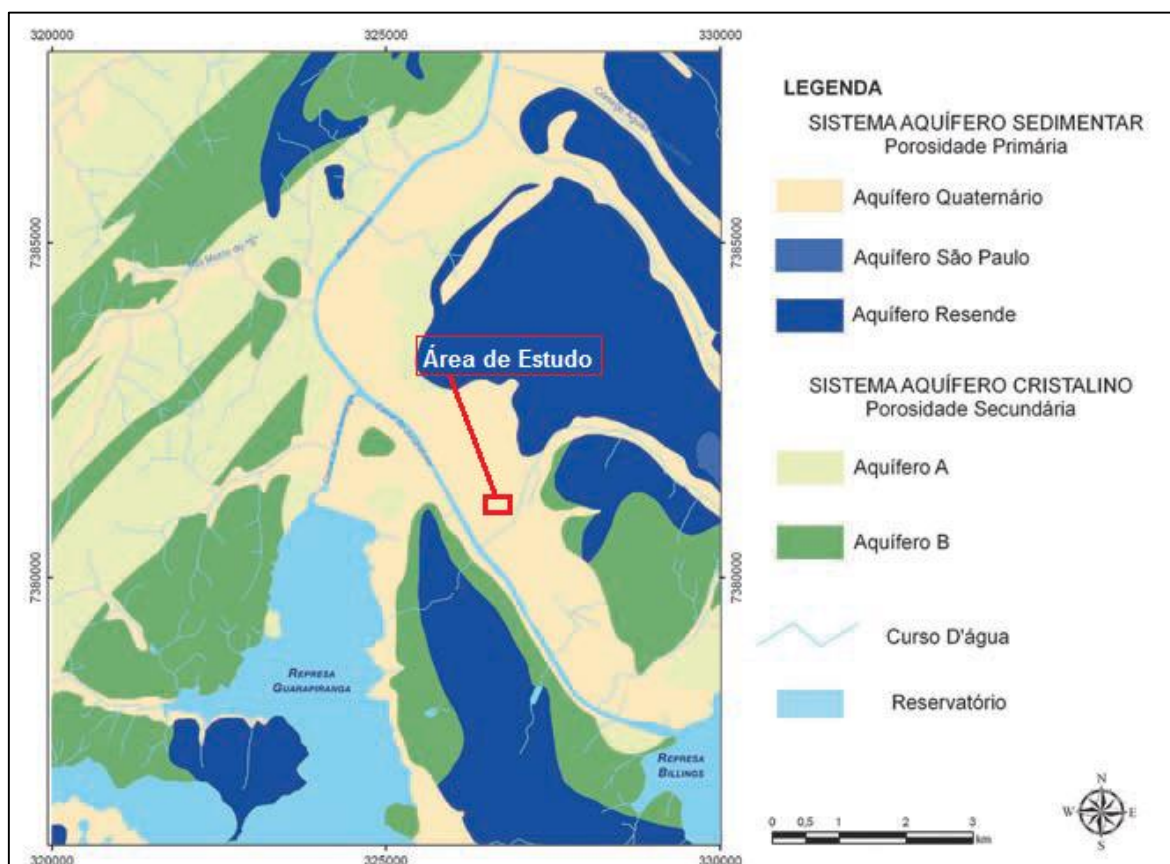


Figura 13 – Hidrogeologia da área de estudo (adaptado de DAEE/IG, 2009)

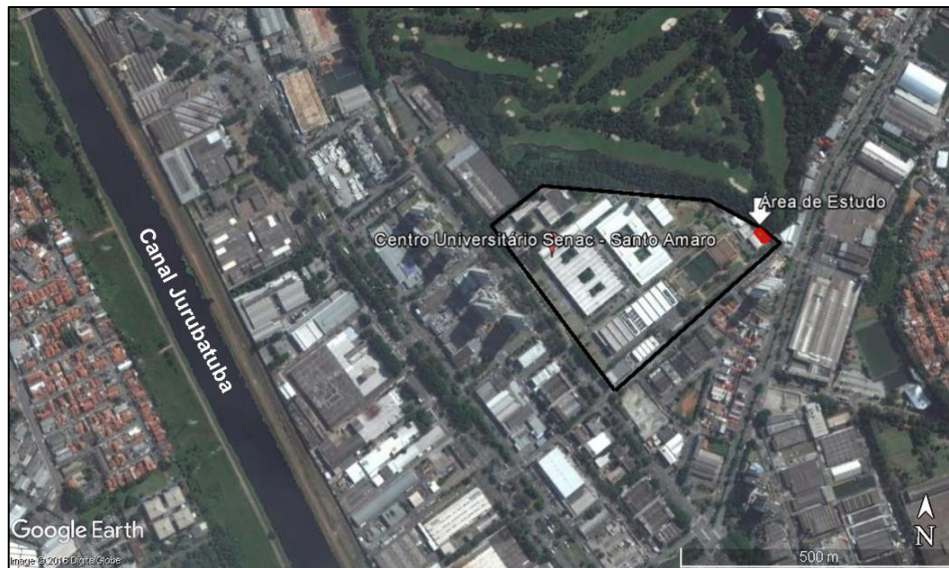


Figura 14 – Centro Universitário Senac – Santo Amaro, Área de Estudo e Canal Jurubatuba

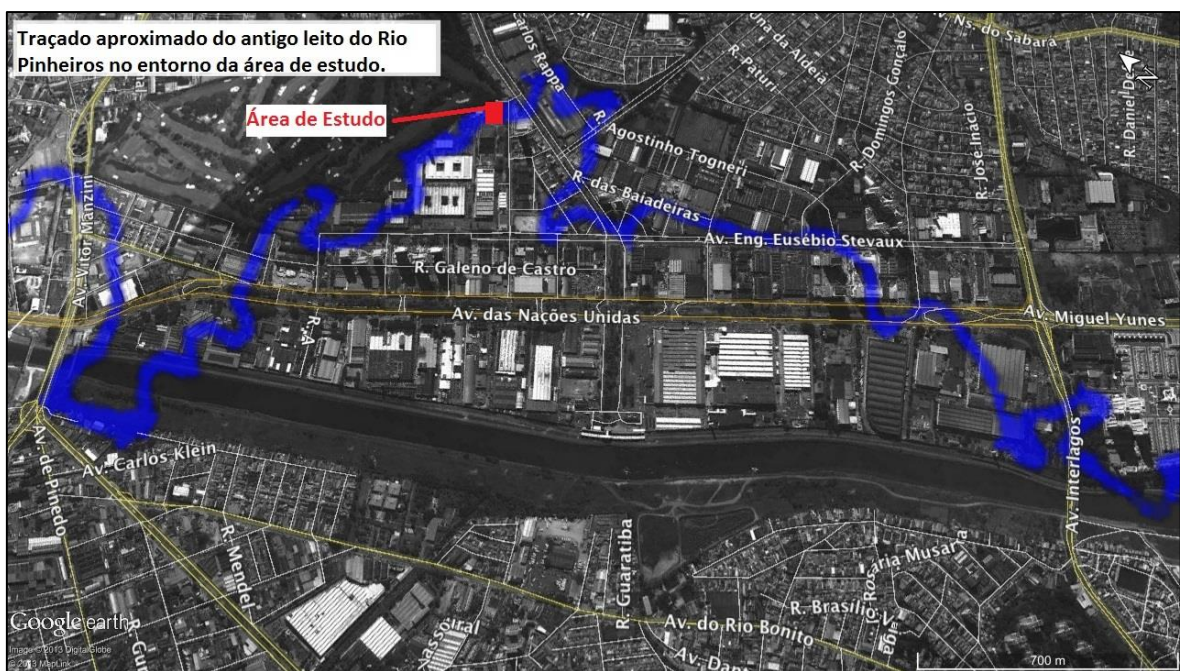


Figura 15 – Traçado aproximado do antigo leito do Rio Pinheiros sobre imagem aérea (adaptado de KAYO, 2013)

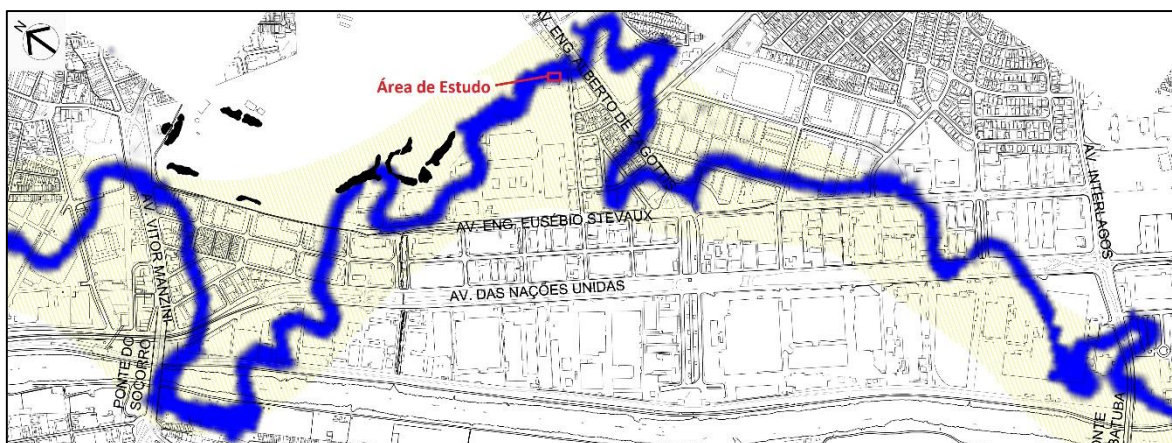


Figura 16 - Traçado aproximado do antigo leito do Rio Pinhos sobre Mapa Digital da Cidade de São Paulo (adaptado de KAYO, 2013)

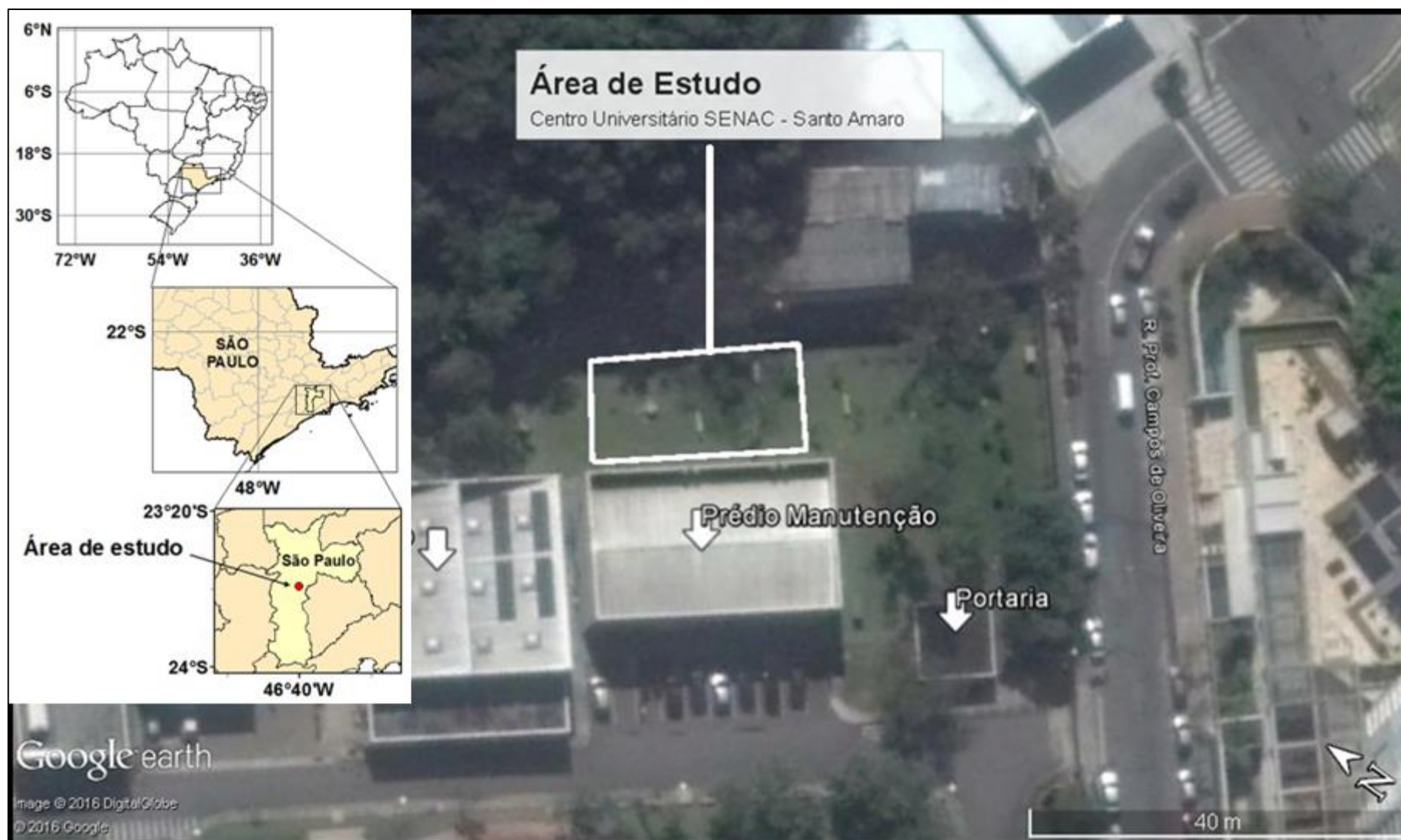


Figura 17 - Área investigada, Centro Universitário SENAC - Santo Amaro



Figura 18 - Localização dos pontos de sondagem DPPTS e ensaios CPTu realizados na área

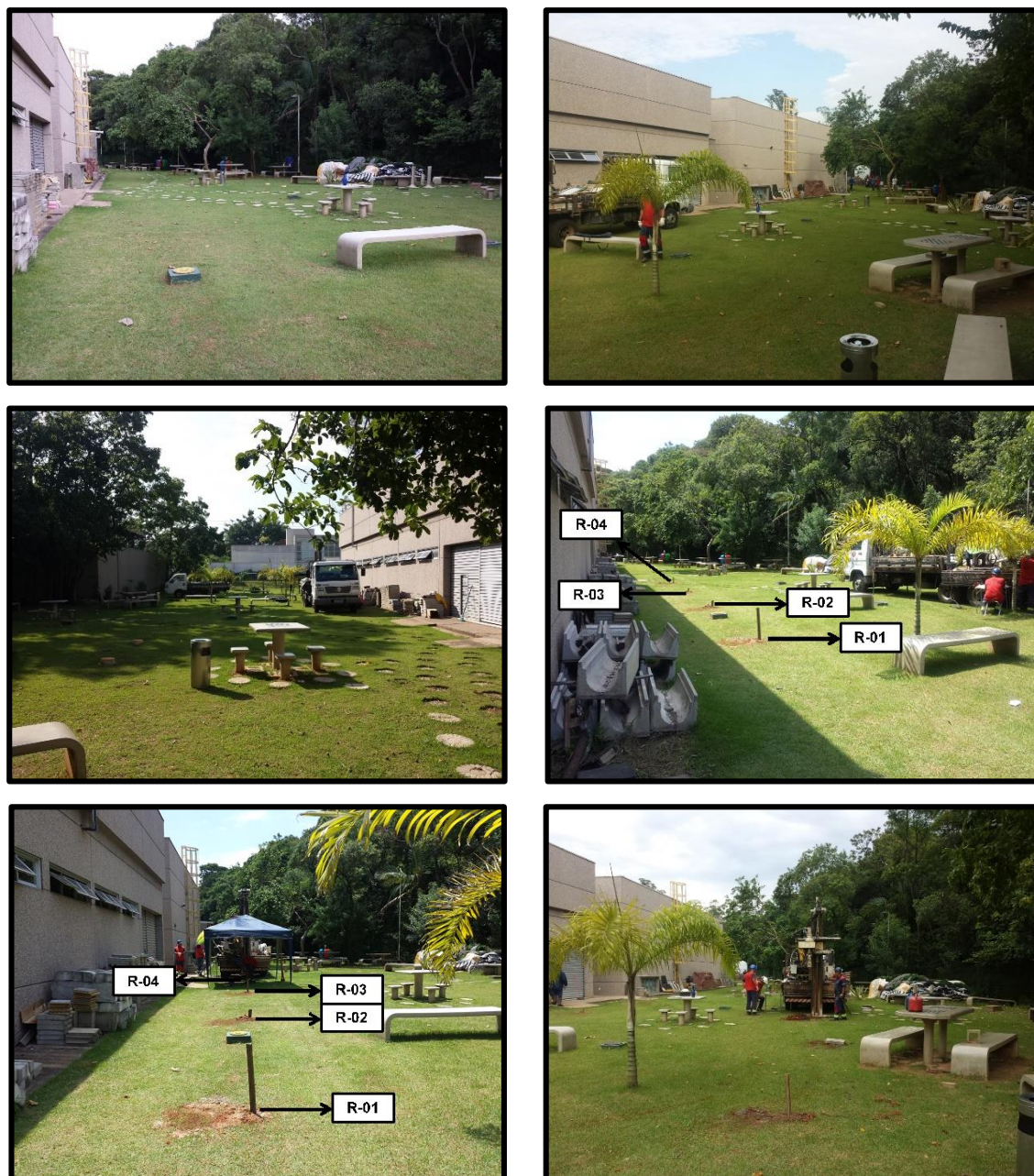


Figura 19 – Sondagens DPDTs e CPTu sendo executadas

A escolha pela abordagem de investigação de alta resolução, HRSC (*High Resolution Site Characterization*), justifica-se pelo seu conceito de: coletar dados em escala e densidade adequadas para conseguir definir em detalhes a distribuição de uma possível contaminação e o meio em que a mesma está inserida, com um menor número de incertezas possível. A abordagem HRSC aplicada neste estudo teve como foco a investigação do meio físico e contemplou os seguintes requisitos:

- Planejamento Sistemático, com plano de trabalho prévio e bem definido envolvendo todos os “*stakeholders*” (orientador, orientado, empresa de



sondagem e Centro Universitário, proprietário do imóvel), no intuito de viabilizar todas as atividades de operação e execução da empreitada;

- Equipamentos e máquinas com tecnologias avançadas, adequadas ao objetivo da pesquisa, para uma coleta de dados em alta resolução, densa e representativa;
- Tomada de decisão, entendimento e estabelecimento do Modelo Conceitual em campo e em tempo real.

A empresa ECD Sondagens Ambientais foi quem executou a campanha de Ensaios de Campo composta por DPDTS e ensaios CPTu e PPDT empregando sondas hidráulicas mecanizadas e ferramental específico conforme descrito neste tópico.

As atividades de campo principais que compuseram esta pesquisa foram:

1. **Amostragens de Solo *Direct Push Dual Tube Sampling (DPDTS)*:** para descrição tátil-visual do perfil estratigráfico, delimitação inicial das camadas significativas de fluxo e armazenamento e coleta de amostras para análise em laboratório de mecânica dos solos, visando auxiliar e validar a caracterização tátil-visual dos solos em campo.
2. **Ensaio CPTu:** para determinar em microescala (cm) os perfis hidroestratigráficos, mostrando a variabilidade vertical contínua do tipo de solo e de condutividade hidráulica, identificando as zonas preferenciais de fluxo e de armazenamento.

Em cada ensaio CPTu, foram realizados ensaios de dissipação de poro pressão (PPDT) quando eram observados, durante o avanço da cravação, excessos de poro pressão em relação a pressão hidrostática, os quais permitiram uma estimativa pontual do valor de condutividade hidráulica.

#### 4.2 Amostragem de Solo por Cravação Contínua (*Direct Push Dual Tube Sampling - DPDTS*)

A sondagem DPDTS não é muito utilizada nos trabalhos de investigação de áreas contaminadas no Brasil, assim como mostrou Riyis (2012), por não ser um método de amplo conhecimento e a alternativa de menor custo no mercado, aliado a isso, por também não existir legislação ou obrigação regulamentadora específica que obrigue sua aplicação. Porém, este método traz alguns benefícios que

garantem a qualidade e integridade da amostra, agregando valor significativo ao projeto.

O DPDTS permite que o furo permaneça revestido durante a execução da sondagem, por possuir duas hastes trabalhando em conjunto. Enquanto a haste interna é retirada para coleta da amostra de solo e colocação de novo amostrador para a próxima amostra a ser coletada, a haste externa permanece no furo, fazendo o papel de revestimento, preservando a qualidade da amostragem sem que haja o colapso do furo, impedindo a mistura de solo de diversas unidades estratigráficas na mesma amostra. Por isso, possibilita identificar, através da descrição tátil-visual, a estratigrafia e suas zonas de fluxo e armazenamento.

A descrição tátil-visual seguiu como base as orientações da ABNT NBR 7250/1982 e 6502/1995, além também de outras características pedológicas, como friabilidade. Ressalta-se que quando eram notadas apenas diferenciações de cor do solo, sendo comuns outras características, como textura, consistência e plasticidade, a mesma classificação do tipo de solo era aplicada, acrescentando-se a cor ao final da descrição.

Foram executadas 9 sondagens para amostragem de solo por cravação contínua, pelo método *Direct Push Dual Tube Sampling* (DPDTS), de acordo com a norma ASTM D6282/D6282M - 14, posteriormente aos ensaios CPTu, praticamente nos mesmos locais onde estes foram realizados, distantes aproximadamente 0,15 m destes, por isso, foi utilizada a mesma identificação para cada ponto DPDTS e CPTu, sendo os pontos DPDTS denominados R-01 a R-08 e R-10. Essa distância levou em conta apenas a necessidade de se tentar coletar as amostras de solo DPDTS o mais próximo possível dos locais de ensaio CPTu.

Os materiais utilizados nos nove pontos de amostragem de solo por cravação contínua DPDTS são descritos abaixo:

- Sonda Perfuratriz Hidráulica Mecanizada marca AMS, modelo *Power Probe* 9100-ATV;
- Ferramental para Cravação Contínua (*Direct Push Dual Tube Sampling*): amostrador, *macrocore*, hastes externas e internas prolongadoras, acoplamentos, todos de aço, amostrador tubular *liner* composto de PEAD. O *liner* permanecia conectado às hastes internas prolongadoras até a superfície, sendo revestido pelas hastes externas e ambos eram

cravados simultaneamente. Junto ao início do *liner*, em sua extremidade, próximo ao *macrocore*, era acoplado um retentor de amostras para auxiliar na recuperação do solo dentro do *liner*. O *liner* tem 1,20 m de comprimento e 37 mm de diâmetro. A haste externa (revestimento) e amostrador de aço tem 1,20 m de comprimento e 70 mm de diâmetro. A haste interna (conectada ao *liner*) possui 1,20 m de comprimento e 31,75 mm de diâmetro.

Em cada ponto de amostragem de solo, foi realizado o seguinte procedimento:

1. Cravação do ferramental *Dual Tube*;
2. Retirada apenas do amostrador *liner* de dentro do revestimento através das hastes internas, mantendo o furo revestido pelas hastes externas, evitando o seu colapso;
3. Retirada do retentor de amostras da extremidade do *liner*;
4. Identificação do ponto e profundidade da amostra no próprio *liner* com caneta do tipo pincel atômico;
5. Colocação de um novo amostrador *liner* dentro do revestimento que permaneceu no furo;
6. Acoplamento das hastes prolongadoras e revestimentos prolongadores para a coleta de nova amostra e se repetia o procedimento.

Após a retirada da amostra, foi realizado, com cada *liner*, o seguinte procedimento:

1. Abertura do *liner* através de dois cortes longitudinais utilizando um cortador, ferramenta específica, gerando uma abertura de aproximadamente 1/3 do diâmetro total do *liner*;
2. Registro fotográfico;
3. Realização de uma descrição tátil-visual do solo amostrado, para posterior elaboração do perfil estratigráfico;
4. Após a descrição do perfil, eram selecionadas algumas amostras de solo para serem enviadas ao laboratório.

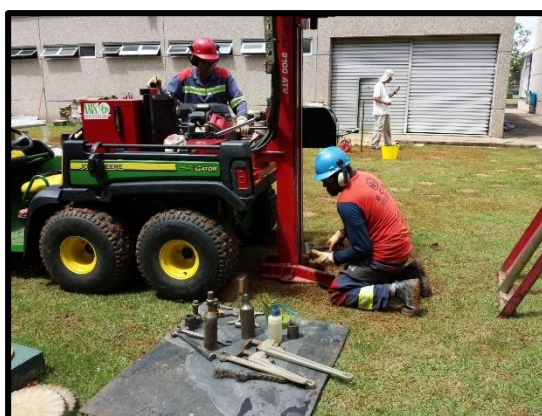
As Figura20 a 22 mostram os procedimentos descritos acima.



a) Sonda Perfuratriz Hidráulica Mecanizada marca AMS, modelo *Power Probe* 9100-ATV, de propriedade da ECD



b) Sonda *Power Probe* cravando as ferramentas *Dual Tube* (Amostrador de aço com *macrocore*, *liner* e retentor de amostra)



c) Sonda *Power Probe*, seus acoplamentos e ferramentas de apoio



d) Amostrador de aço completo, com *macrocore*, acoplamentos, *liner* e retentor de amostra

Figura 20 – Sonda e ferramentas utilizadas nas sondagens DPPTS



a) Amostrador de aço com *macrocore*



b) Detalhe para hastes prolongadoras externas (revestimento) e internas (que conectam ao *liner*)



c) Vista geral das hastes prolongadoras externas e internas



d) *Liner* (amostrador tubular de PEAD) dentro do amostrador de aço, hastes prolongadoras externas e internas

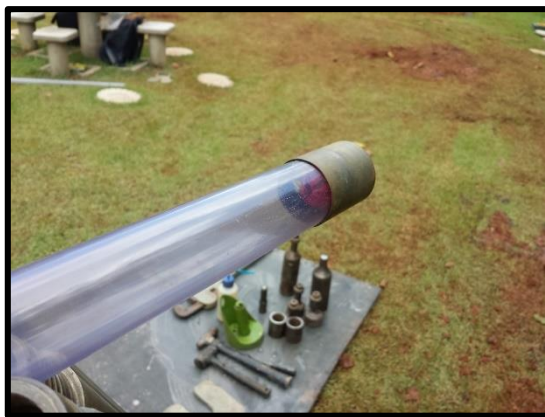


e) *Liner* com retentor de amostras e hastes prolongadoras externas e internas



f) Detalhe para o retentor de amostras e hastes prolongadoras externas e internas

Figura 21 – Ferramental DPPTS utilizado



a) *Liner* com retentor de amostras e, ao fundo, acoplamentos e ferramentas de apoio



b) Cortador de *liner*



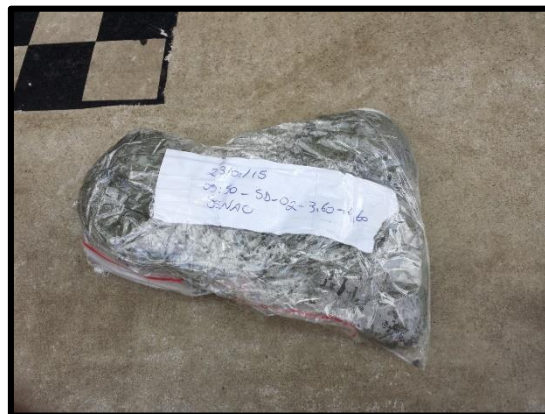
c) Detalhe para cortador de *liner*



d) *Liner* sendo cortado para descrição tátil-visual e seleção de amostras



e) *Liner* cortado para descrição tátil-visual e seleção de amostras



f) Amostra selecionada para o laboratório

Figura 22 – Preparação para descrição tátil-visual e coleta de amostra de solo

#### **4.2.1 Ensaios em laboratório para caracterização do solo**

Foram escolhidas 8 amostras de solo, com profundidades variando de acordo com a camada de interesse, selecionando-se uma amostra por unidade estratigráfica identificada a partir do nível d'água ( $NA = 0,80$  m). Sendo assim, foram obtidas 2 amostras do ponto R-01, 3 do ponto R-02 e 3 do ponto R-10, coletadas pelo método de cravação contínua DPPTS, retiradas diretamente do *liner* e encaminhadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos da FEB – UNESP.

Essas amostras foram utilizadas para auxiliar na identificação do tipo de solo e de suas características, como forma de confirmar a descrição tátil-visual de campo. Foram realizados os ensaios de Granulometria Conjunta empregando como defloculante o hexametáfosfato de sódio, conforme especifica a norma ABNT NBR 7181/84, ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidade, respeitando respectivamente as normas ABNT NBR 6459/2016 e 7180/2016. A Massa Específica dos Sólidos foi determinada conforme estabelece a ABNT NBR 6508/2016 e os ensaios de Adsorção de Azul de Metileno empregou o método descrito por Pejon (1992), conhecido como método da mancha. A preparação das amostras para os ensaios de caracterização foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 6457/2016.

#### **4.2.2 Estimativa da Condutividade Hidráulica a partir da Descrição Tátil-visual**

Foram adotados alguns valores de condutividade hidráulica, que variaram de  $10^{-7}$  cm/s a  $5,0 \times 10^{-1}$  cm/s, com base nos intervalos sugeridos por Freeze e Cherry (1979), na Figura 9, para cada tipo de solo classificado segundo a descrição tátil-visual de campo, conforme será apresentado posteriormente no item 5.1, nas discussões dos resultados.

Através destes valores, foi criado para cada ponto DPPTS um perfil vertical de condutividade hidráulica, mostrando sua variabilidade em função da descrição tátil-visual executada, apenas com o objetivo de fornecer uma base de comparação, mesmo que teórica, ao perfil de condutividade hidráulica em alta resolução obtido pelos ensaios CPTu. Optou-se em não representar uma faixa de valores de condutividade hidráulica, mas sim valores absolutos, posicionados no meio da profundidade de cada unidade estratigráfica de solo descrita, devido a variação

elevada do intervalo para um mesmo tipo de solo, como mostrado na Figura 9. Por exemplo, para Areia Pura,  $K$  varia de  $10^{-4}$  cm/s a  $10^0$  cm/s.

### 4.3 Ensaios CPTu e de Dissipação de Poro pressão (PPDT)

Os ensaios CPT, CPTu e suas variações que incorporam outros sensores, ainda são pouco utilizados na investigação para fins ambientais no Brasil. Esses ensaios têm maior aplicação no seu ramo de origem, na geotecnia, para obtenção de parâmetros geotécnicos de fundações e auxílio nos projetos de engenharia civil. Porém, é possível obter vários benefícios quando empregados para a investigação ambiental, principalmente devido resultados gerados em alta resolução, para descrever a variabilidade do tipo de solo e de condutividade hidráulica e identificação e delimitação das unidades hidroestratigráficas.

Nesta pesquisa foram executados 16 ensaios CPTu, dos quais 11 utilizaram graxa biodegradável no filtro de cavidade (*slot filter*) e 5 utilizaram pedra porosa saturada com glicerina, ambos instalados na posição  $u_2$  para registro da poro-pressão.

Para cada ensaio CPTu foram feitos diversos ensaios de dissipação de poro pressão (PPDT), ao todo 59, sendo 42 PPDT utilizando graxa no elemento poroso e 17 utilizando glicerina. O critério para a realização dos ensaios PPDT era baseado na observação em campo do excesso de poro pressão, sendo que a qualquer excesso gerado observado pelo operador da sonda, iniciava-se o ensaio.

A distância entre os ensaios CPTu com graxa e glicerina foi definida como sendo algo em torno de 1,0 m, com a finalidade de se comparar os registros de poro pressão e, ao mesmo tempo, não afetar as medidas de resistência de ponta ( $q_c$ ) e atrito lateral ( $f_s$ ) do CPT.

Os materiais utilizados nos dezesseis ensaios CPTu são apresentados a seguir:

- Sonda hidráulica mecanizada montada sobre caminhão;
- Hastes prolongadoras de aço de 1,0 m de comprimento;
- Piezocone utilizado nos ensaios CPTu de fabricação Geotech AB (Suécia), modelo NOVA Acustic - sem fio - com ponteira em formato cônico (ângulo de vértice de  $60^\circ$ ) e área de  $10 \text{ cm}^2$ ;



- O elemento poroso para medida de poro pressão se encontra instalado na posição  $u_2$ . O equipamento tem uma relação de áreas desiguais ( $A_N/A_T$ ) igual a 0,63;
- A aquisição de dados sem fio foi feita por um Microfone, sistema NOVA Acustic, que transmite as ondas sonoras à interface ligada ao software de comando e visualização do ensaio, compondo o sistema completo da Geotech ©;
- Notebook Dell para visualização dos dados em campo;
- Pedra porosa de cobre (elemento poroso);
- Filtro de cavidade (*Slot Filter*) para medida de poro pressão
- Glicerina deaerada;
- Funil para saturação da pedra porosa em glicerina no campo;
- Graxa biodegradável para preenchimento do *slot filter*;
- Seringa para injeção da graxa biodegradável no *slot filter*.

Para cada ensaio CPTu foi adotado o seguinte procedimento:

1. A primeira etapa foi a preparação do elemento poroso em campo, colocando-o na posição  $u_2$ , sendo executado de duas maneiras diferentes, dependendo do tipo de material utilizado para transmitir a pressão do meio ao sensor interno, para registro da poro pressão ( $u_2$ ):
  - a. Slot Filter preenchido com graxa:

Em campo, o elemento poroso era preenchido completamente com graxa biodegradável através de injeção com seringa de plástico de 20 ml. Após a saída de graxa pelas fendas do piezocone, constatando-se todo o seu preenchimento, a cavidade do cone junto ao sensor de poro pressão era preenchida com água deionizada, posteriormente, rosqueava-se a ponteira cônica.
  - b. Pedra porosa saturada com glicerina deaerada:

Em campo, era preparado o piezocone, colocando-se a pedra porosa já saturada com glicerina deaerada na posição  $u_2$ , esse procedimento era realizado dentro de um funil, preso ao cone, preenchido também com glicerina deaerada, evitando-se o tempo de exposição da pedra porosa ao

ar, inibindo-se a perda de saturação. Depois de estabelecida a conexão do piezocone e ponteira cônica, era retirada a glicerina do funil, assim como o próprio funil.

2. Após a preparação do piezocone, posicionou-se a ponteira e efetuou-se um pré-furo com o uso de trado manual tipo caneca de 3" de diâmetro, para permitir a execução de um ensaio alinhado e nivelado;
3. Conectou-se o equipamento CPTu ao sistema de aquisição de dados e este ao notebook;
4. Tomou-se a linha base (zero de referência do sistema);
5. Posicionou-se o equipamento no pré-furo e iniciou-se a cravação quasi-estática, de velocidade constante de 2 cm/s;
6. A cada final de curso no avanço das hastes de aço prolongadoras de 1,0 m de comprimento, era conectada outra haste e a cravação continuava;
7. As leituras foram registradas em intervalos regulares de 2,0 cm, sendo apresentadas pelo software de comando em tempo real no notebook ligado ao sistema de transmissão sônica. As seguintes medidas eram feitas:
  - a. Resistência de ponta ( $q_c$ );
  - b. Atrito lateral ( $f_s$ );
  - c. Poro-pressão ( $u_2$ );
8. Os dados coletados foram posteriormente tratados e interpretados empregando planilhas eletrônicas e software de visualização, sendo mostrados de forma gráfica os perfis e seções hidroestratigráficas, bem como os resultados de comparações e correlações geradas.
9. O ensaio foi conduzido conforme prescrito pelas normas ASTM D3441/1998 (*Standard Test Method for Deep, quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soil*), ASTM D6067/2010 (*Using the Electronic Piezocone Penetrometer Test for Environmental Site Characterization*);
10. Durante o ensaio de cada ponto, em profundidades que ocorreram excesso de poro pressão, era realizado o ensaio de dissipação de poro pressão (PPDT). Ao todo, foram realizados 59 ensaios PPDT.
11. O ensaio CPTu terminava quando se atingia o limite de cravação da sonda, ou quando a capacidade de algum dos três sensores do piezocone de era atingido;

12. Ao final do ensaio, retirava-se o equipamento cravado e tomava-se novamente a linha base. Após isso, desconectava-se os equipamentos e limpava-se a ponteira.

A Figuras 23 a 26 ilustram os procedimentos descritos.



a) Glicerina deaerada e cone sendo preparado para a colocação do piezoelemento



b) Colocação da pedra porosa saturada em glicerina



c) Pedra porosa colocada na posição  $u_2$



d) Retirada do funil com glicerina após colocação da pedra porosa



e) Funil utilizado na colocação da pedra porosa



f) Funil e recipiente com glicerina após colocação da pedra porosa

Figura 23 – Colocação da pedra porosa com glicerina deaerada



a) Piezocone montado com filtro de cavidade (*slot filter*)



b) Detalhe para Piezocone montado



c) Detalhe para ponteira do Piezocone com filtro de cavidade



d) Abertura inicial do pré-furo



e) Pré-furo realizado com trado manual

Figura 24 – Preparação para início da cravação do CPTu



a) Nivelamento da primeira haste



b) Detalhe para nível utilizado



c) Microfone para transmissão dos dados



d) Interface entre o recebimento de sinal do microfone e o notebook



e) Ensaio CPTu sendo realizado por cravação de sonda hidráulica mecanizada sobre caminhão



f) Operação e execução do ensaio CPTu

Figura 25 – Realização de ensaios de piezocone



a) Detalhe para operação do *software* e da sonda



b) *Layout* do *software* da Geotech apresentando os dados online

Figura 26 – Operação do ensaio de piezocone

Para os 11 ensaios CPTu com graxa e 05 com glicerina foi empregada a mesma numeração na identificação dos pontos, variando de R-01 a R-11, já que os ensaios com glicerina foram chamados nessa pesquisa de duplicatas, distantes apenas 1,0 m um do outro, conforme mostra a Figura 15 apresentada anteriormente e a Figura 27, a seguir. Esse distanciamento foi adotado como medida de segurança, para que a alteração na mecânica do solo local, devido a cravação do ensaio, não influenciasse no par de ensaio correspondente.

Na apresentação e discussão dos resultados, os ensaios com glicerina (duplicatas) são identificados com a letra “G” na frente do número.

Portanto, os ensaios com graxa são os pontos R-01 a R-11, e seus pares duplicatas correspondentes são os pontos R-02G, R-04G, R-05G, R-06G e R-07G.

Nos 05 ensaios em duplicata foi utilizada glicerina deaerada para saturação da pedra porosa, enquanto que nos outros 11 ensaios, foi utilizada graxa biodegradável no filtro de cavidade (*slot filter*) para medição da poro pressão na posição  $u_2$ .

Os ensaios foram dispostos basicamente em 03 linhas principais (seções transversais), conforme mostra a Figura 27, mantendo distância entre os pontos da mesma linha de aproximadamente 5,0 m e, entre uma linha e outra, entre 3,0 a 4,0 m:

- **Linha 01:** R-01, R-02, R-03 e R-04;
- **Linha 02:** R-09, R-10 e R-11;
- **Linha 03:** R-05, R-06, R-07 e R-08.

As seções transversais são uma forma de entender o comportamento de diversas variáveis do meio em 3 dimensões, conforme suas integrações de uma linha para outra, sendo que, para a presente pesquisa, eram relevantes as variáveis de tipo de solo e condutividade hidráulica. Possuem essa denominação por serem locadas transversalmente ao maior valor da dispersividade de uma pluma de contaminação, portanto, perpendicularmente à direção do fluxo local do aquífero. Dessa forma, possibilitam estudar a maturidade e comportamento hidrodinâmico da pluma. Para este estudo, salienta-se que a área não está contaminada e apesar de não se ter definido o sentido principal do fluxo da água subterrânea, inferiu-se que este ocorre de Sudoeste para Nordeste da Figura 27, devido à presença de um córrego à jusante dessa área e histórico do posicionamento do antigo leito do Rio Pinheiros.

A Tabela 02 apresenta a profundidade de cada ensaio. Os ensaios avançaram até o limite de profundidade máximo alcançado pela capacidade da sonda hidráulica mecanizada e levando em conta o tipo de solo perfurado, por exemplo, presença de cascalhos, argila rija ou areia muito compacta como fatores limitantes.

Tabela 2 - Profundidade atingida em cada ensaio CPTu realizado.

<b>Identificação</b>	<b>Profundidade (m)</b>
R-01	5,42
R-02	7,88
R-02G	5,88
R-03	7,32
R-04	5,7
R-04G	5,68
R-05	8,32
R-05G	8,18
R-06	8,12
R-06G	8,68
R-07	8,82
R-07G	9,74
R-08	5,66
R-09	7,62
R-10	6,06
R-11	8,56





Figura 27 – Localização das três linhas principais dos ensaios

#### 4.3.1 **Filtro de Cavidade (Slot Filter) com graxa e Pedra Porosa com glicerina deaerada para medida de Poro Pressão**

A graxa é um material que varia de sólido a semi-sólido, já a glicerina é um fluido, porém, apesar das diferentes naturezas dos materiais, podem ou não diferirem em relação a seus comportamentos mecânicos, da mesma forma, podem ou não diferirem nos valores de poro pressão registrados nos ensaios CPTu. Sendo assim, um dos objetivos desta pesquisa foi avaliar o grau de correlação e comportamento entre as medidas de poro pressão dos ensaios com graxa biodegradável no filtro de cavidade (*slot filter*) e glicerina deaerada na pedra porosa.

Mondelli et al (2009) compararam a utilização de graxa e glicerina no sensor de poro pressão e ambos os materiais indicaram as principais variações de poro pressão no perfil, porém, a utilização de graxa mostrou resultados e picos sensivelmente maiores que aqueles registrados com o uso de glicerina. Já Larson

(1995) mostrou o contrário, sendo que o uso da graxa forneceu valores menores do que aqueles registrados com uso de glicerina.

Nesta pesquisa, a primeira ação necessária foi estabelecer e validar qual a população amostral de dados a ser comparada.

Ressalta-se que o equipamento CPTu e sensores de resistência de ponta e atrito lateral utilizados foram os mesmos em todos os ensaios, sendo a única diferença o elemento poroso e seu material na posição  $u_2$  (graxa no filtro de cavidade e glicerina na pedra porosa).

Os ensaios de campo não podem ser realizados exatamente no mesmo local, por isso, adotou-se a distância de 1,0 m entre um ensaio e sua duplicata. Nessa distância, a própria topografia do terreno e principalmente os fatores da heterogeneidade e anisotropia do meio tiveram que ser levados em conta, devido a variabilidade vertical e horizontal em microescala (cm) da hidroestratigrafia.

Para selecionar uma população amostral base, que representasse o mais próximo possível do mesmo tipo de solo entre os pares considerados duplicatas, portanto, que representasse as mesmas unidades estratigráficas, foi necessário definir um padrão de comparação, validando a análise e identificação do mesmo tipo de solo.

Entre as medidas do cone,  $q_t$ ,  $f_s$  e  $R_f$ , e sem considerar a poro pressão, por ser justamente objeto do estudo de comparação, a Razão de Atrito ( $R_f$ ) permite uma melhor definição do comportamento do solo, uma vez que relaciona 2 medidas, Atrito Lateral ( $f_s$ ) e Resistência de Ponta ( $q_t$ ).

Sendo assim, primeiramente foi encontrado o mesmo tipo de solo entre os pares relacionados, ou seja, foram definidas as mesmas unidades estratigráficas em ambos os pontos comparados (pares duplicatas), analisando-se os valores de  $R_f$  de cada ponto e sua duplicata, ajustando-se a profundidade para que fosse possível definir qual população amostral a ser utilizada na correlação e eliminar os pontos que devido à heterogeneidade do meio não foi possível correlacionar. Salientando-se que cada medida, a cada 2 cm durante a cravação, era considerada um indivíduo dentro da população amostral daquele ponto. Sendo assim, ao final de cada ensaio, tinha-se um conjunto de dados pertencentes ao perfil ensaiado, coletados a cada 2 cm, dos quais foram selecionados alguns, com base em  $R_f$ , que representassem o mesmo tipo de solo, para compor a população amostral.

#### **4.3.1.1 Correlação de Pearson entre os ensaios em duplicata**

Foi feita uma correlação linear entre os ensaios e suas duplicatas para  $R_f$ ,  $q_t$  e  $u_2$  (graxa x glicerina) através do cálculo do coeficiente de Pearson, pela função "PEARSON" disponível planilha eletrônica, que mostra o grau de associação e relacionamento entre os dados comparados.

Por ser um modelo linear, supõe-se que o incremento ou decréscimo do valor em um dado gera o mesmo efeito, diretamente ou inversamente proporcional, em sua variável correspondente e pode ser ilustrado por uma linha reta.

O coeficiente de Pearson ( $r$ ) varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 mais forte é o grau de correlação entre as variáveis, indicando que o valor aproximado de uma amostra pode ser obtido a partir de uma outra conhecida, e quanto mais próximo de 0, mais fraco é o grau de correlação entre as duas variáveis, impossibilitando assim a obtenção de um valor de uma amostra a partir de uma já conhecida.

O coeficiente também pode obter valores positivos ou negativos, sendo que um valor positivo pode indicar uma correlação diretamente proporcional e o negativo uma correlação inversamente proporcional (FIGUEIREDO FILHO; JUNIOR, 2010).

Como valores absolutos (0 ou 1) são dificilmente obtidos em análises estatísticas, a interpretação do valor do coeficiente Pearson varia na literatura. Segundo Cohen (1988), valores para o coeficiente entre 0 e 0,09 indicam que não há correlação entre as amostras; entre 0,10 e 0,29 indicam que há uma correlação de fraca intensidade; entre 0,30 e 0,49 indicam uma correlação de média intensidade; e valores entre 0,50 e 1 indicam uma forte correlação entre as amostras.

Dancey e Reid (2006) estabelecem uma divisão de intervalos ligeiramente diferentes para o valor da correlação de Pearson, sendo que  $r$  de 0,10 até 0,40 indica uma correlação de intensidade fraca;  $r$  de 0,40 até 0,70 indica uma correlação de intensidade média e  $r$  de 0,70 até 1,00 indica uma correlação de forte intensidade. Em síntese, quanto mais próximo do valor 1, independentemente do sinal, maior é a dependência estatística entre as amostras analisadas.

Os ensaios CPTu registram dados de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$  a intervalos de 2,0 cm, portanto, levando em conta o pré-furo e as profundidades totais atingidas de cada ponto, obteve-se uma grande quantidade de dados de população amostral para

cada ensaio realizado, variando de 222 (R-04) a 387 (R-07) conjunto de dados, o que permitiu priorizar apenas aqueles dados que garantissem o mesmo tipo de solo, segundo o fator  $R_f$ , entre os ensaios e suas duplicatas. Deste modo teve-se a garantia de se ter um conjunto de confiança para a comparação entre os valores de poro pressão registrados com utilização de graxa e glicerina.

Antes da eliminação dos dados discrepantes, foi necessário definir a população amostral, calculando o tamanho mínimo do conjunto de dados necessários, para se obter de forma confiável o valor do coeficiente de Pearson. Para isso, foi adotado inicialmente um erro amostral tolerável de até 7%, levando em conta a finalidade do estudo e os parâmetros avaliados, uma vez que é comum nesse tipo de análise erros amostrais toleráveis de até 10%.

Segundo Moreira (2001), é possível calcular o tamanho mínimo da população amostral pela Equação 8:

$$n = \frac{1}{e^2} \quad (8)$$

Onde:

$n$  = número mínimo de dados para população infinita;

$e$  = erro amostral tolerável.

Como a população é finita e possui valor conhecido, é necessário realizar um ajuste, através da Equação 9:

$$n = \frac{N * \frac{1}{e^2}}{N + \frac{1}{e^2}} \quad (9)$$

Onde:

$n$  = número mínimo de dados para população finita;

$N$  = número de dados da população;

$e$  = erro amostral tolerável.

Pontos fora da curva são definidos como valores aberrantes ou atípicos e para o presente estudo estão relacionados à heterogeneidade do meio, levando a

uma dificuldade adicional na análise geoestatística dos dados. Por isso, foram adotadas algumas premissas na definição desses dados discrepantes para cada parâmetro, sendo elas, executadas em três etapas:

1. Para  $q_t$ , considerou-se os valores em módulo da diferença entre o ensaio e sua duplicata (graxa - glicerina) acima de 10 MPa.
2. Já, para  $R_f$ , considerou-se valores acima de 2%;
3. Para  $u_2$ , considerou-se os valores do módulo da diferença acima de 100 KPa.

#### **4.3.2 Índice do Tipo de Comportamento do Solo ( $I_c$ ) $SBT_N$**

O perfil do subsolo foi classificado a intervalos de 2 cm, conforme programação definida em campo para o intervalo de coleta de dados pelo software da Geotech ©, resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), atrito lateral ( $f_s$ ), razão de atrito ( $R_f$ ) e poro pressão ( $u_2$ ).

Para elaboração dos perfis estratigráficos em alta resolução e suas seções, os valores medidos nos ensaios CPTu, em campo, foram posteriormente tratados e interpretados em planilhas eletrônicas e, para cada dado coletado, foi calculado o valor do Índice do Tipo de Comportamento do Solo ( $I_c$ ), pelo ábaco CPT normalizado ( $SBT_N$ ),  $Q_{tn} - F_r$ , apresentado na Figura 8, aplicando-se a Equação 2.

#### **4.3.3 Estimativa da Condutividade Hidráulica através do $I_c$**

Foi elaborado para cada ensaio CPTu realizado, um perfil vertical contínuo de condutividade hidráulica em função do  $I_c$  ( $SBT_N$ ), conforme indicado na Figura 10, com destaque para a variabilidade ao longo da profundidade, através das Equações 5 e 6.

#### **4.3.4 Estimativa da Condutividade Hidráulica através do ensaio PPDT**

Durante cada ensaio CPTu, foram realizados diversos ensaios de dissipação do excesso de poro pressão (PPDT), em variadas profundidades. Em cada um desses ensaios o  $t_{50}$  foi calculado, ou seja, tempo gasto para que ocorresse a dissipação de 50% do excesso de poro pressão. Após determinação do  $t_{50}$ , foi utilizada a Equação 7 para a estimativa da condutividade hidráulica pontual de cada

ensaio PPDT. Este valor foi comparado com os outros métodos disponíveis para determinação e/ou estimativa da condutividade hidráulica.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Descrição Tátil-Visual - Perfil Hidroestratigráfico (DPDTS)

Através da descrição tátil-visual de campo aplicada nos 09 pontos de coleta, R-01 a R-08 e R-10, foram classificados 07 principais tipos de solo, distintos, conforme apresenta a Tabela 3 e mostram as Figuras 28 a 32. Ainda na Tabela 3, são apresentados os valores de condutividade hidráulica adotados para cada tipo de solo, assim como descrito no item 4.2.2, anteriormente.

Os perfis foram construídos com a própria foto do solo descrito, a título apenas de uma melhor ilustração dos horizontes. Outras fotos serão apresentadas adiante.

Tabela 3 – Descrição Tátil-Visual das amostras de solo das sondagens DPDTS e valores de K adotados

Nº de Tipos de Solo	Descrição Tátil-Visual	K (cm/s)
1	Argila, plástica, consistente, marrom avermelhado	1,0E-07
2	Areia, média/grossa, friável, cinza escuro, claro ou bege	5,0E-01
3	Argila, plástica, mole, marrom escuro, cinza ou cinza escuro	1,0E-07
4	Argila, não plástica, mole, cinza ou marrom escuro	1,0E-06
5	Areia, fina, friável, cinza ou cinza escuro	1,0E-04
6	Areia, fina/média, friável, bege ou cinza escuro	1,0E-02
7	Areia argilosa, mediamente compacta, cinza escuro	1,0E-04

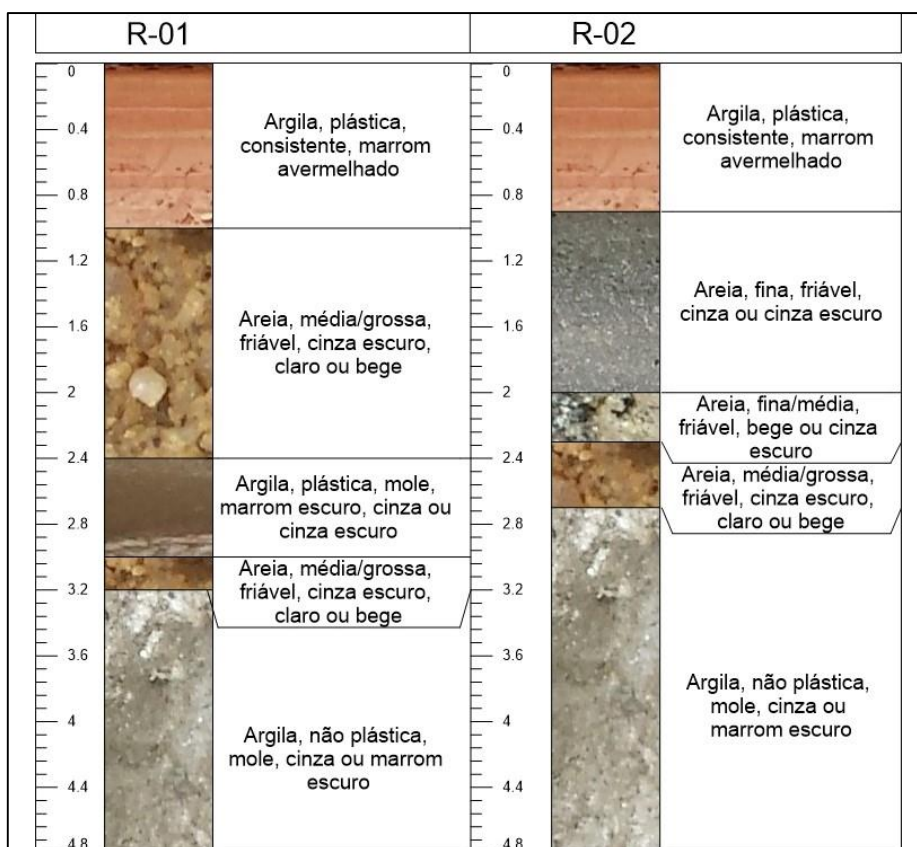


Figura 28 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-01 e R-02

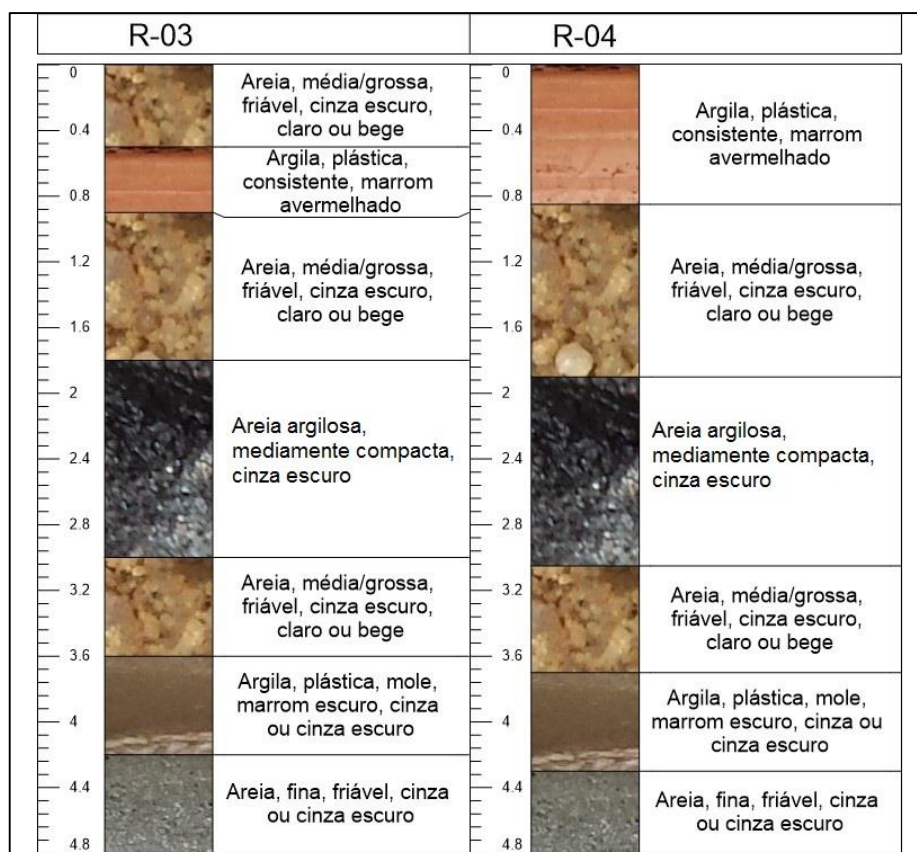


Figura 29 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-03 e R-04



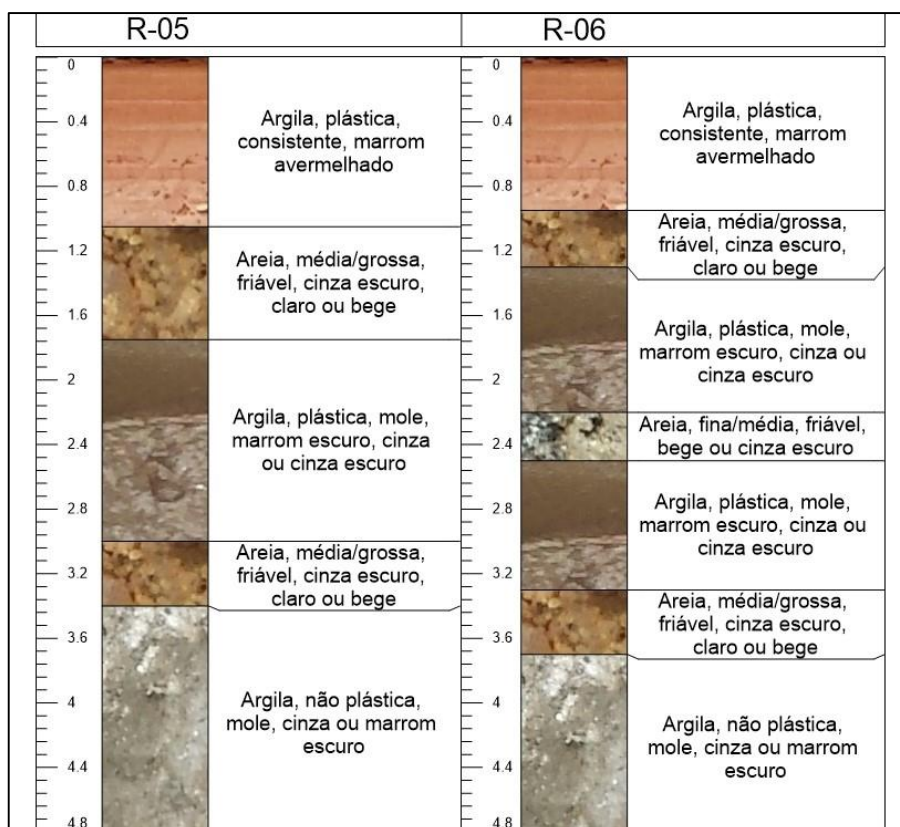


Figura 30 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-05 e R-06

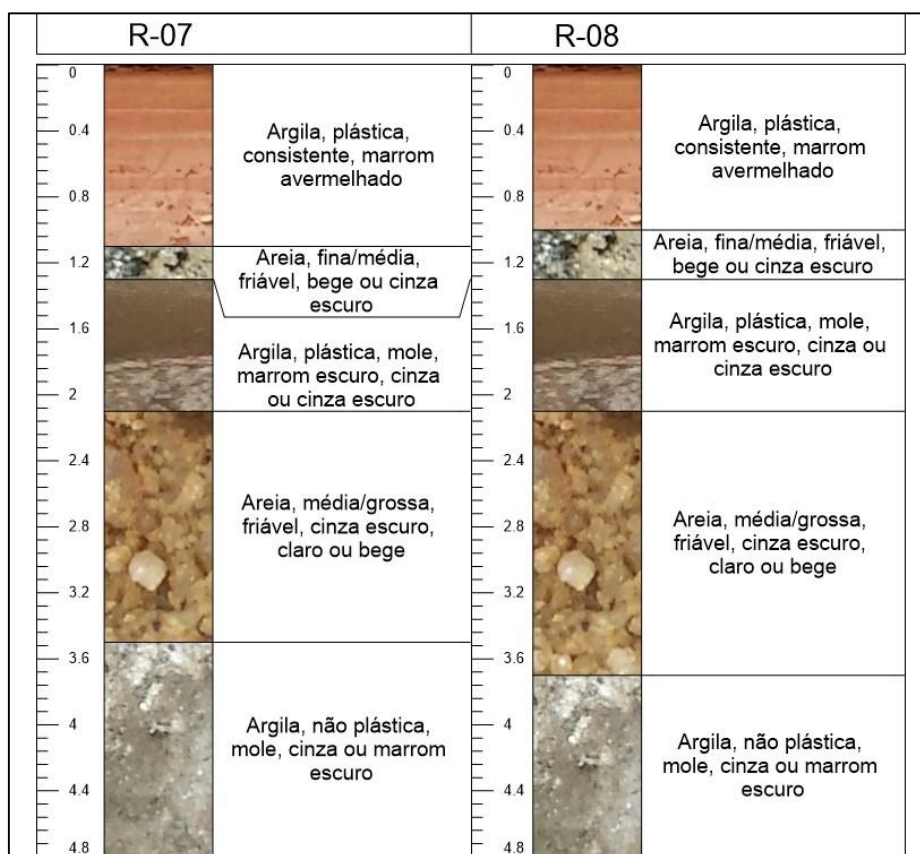


Figura 31 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-07 e R-08

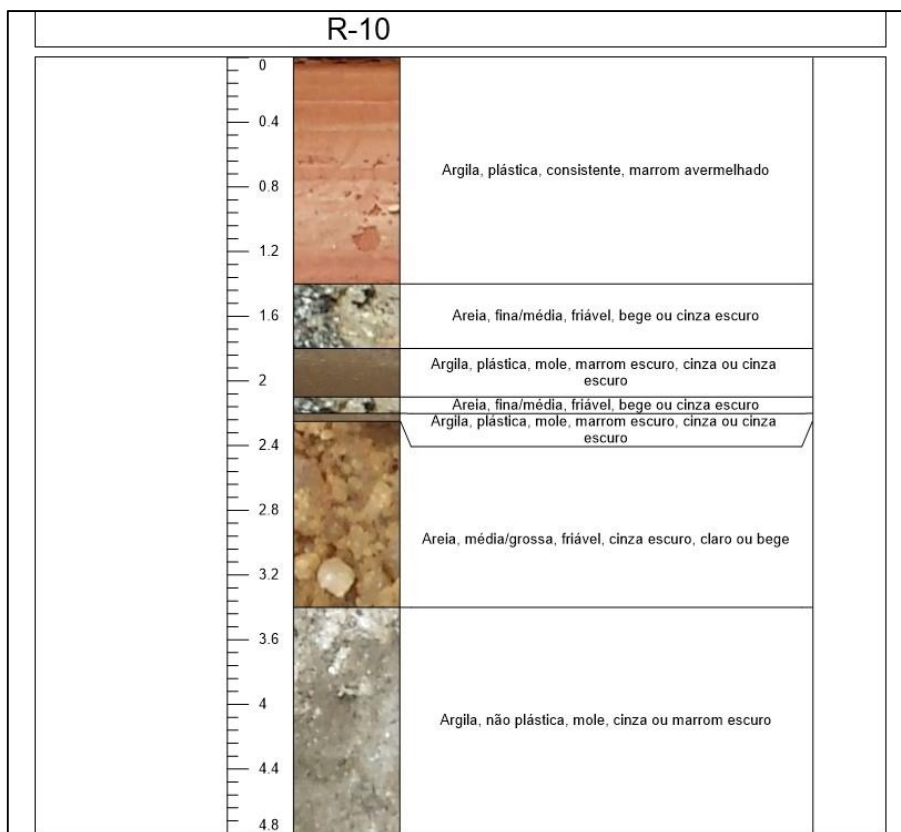


Figura 32 - Perfil estratigráfico (DPDTS) a partir da descrição tátil-visual - R-10

A estratigrafia do solo local é muito heterogênea, como podem ser observadas pelas intercalações da ordem de 5,0 cm, como no ponto R-10, entre variações de areias e argilas, o que está de acordo com as informações levantadas sobre a formação geológica e hidrogeológica do local. Não foi feita uma avaliação mais detalhada da mineralogia dos solos amostrados, pois o foco nesse estudo foi avaliar o comportamento mecânico do solo, com destaque para a variabilidade de condutividade hidráulica, mas, ressalta-se que em quase todos os perfis foi encontrado minerais micáceos nas amostras.

O nível d'água do aquífero poroso livre local encontrava-se em torno de 0,80 m de profundidade. Todas as sondagens DPDTS atingiram a profundidade máxima de 4,80 m. A partir dessa profundidade não foi possível avançar o furo devido a presença de variações de areias compactas e argilas duras, as quais a sonda não conseguiu perfurar.

Salienta-se que levando em conta a profundidade do nível d'água (0,80 m) e a característica dos perfis, solo saturado em grande parte arenoso, friável, a amostragem através da cravação contínua só obteve sucesso até 4,80 m de

profundidade devido ao emprego do método *Direct Push Dual Tube Sampling*, pois provavelmente qualquer outro método de sondagem que não contasse com o revestimento, como no caso o *Single Tube Sampling*, por exemplo, não obteria êxito.

A descrição e identificação do tipo de solo em escala centimétrica são relevantes para investigação de qualquer área contaminada, principalmente quando existem intercalações no perfil, como foi o caso investigado, pois permitem visualizar a localização das principais zonas de fluxo e armazenamento e suas interações.

Em alguns pontos, como R-03, R-04, R-06 e R-10, as principais zonas de fluxo (solos arenosos) aparecem até 3 vezes no mesmo perfil, intercaladas pelas zonas de armazenamento (solos argilosos), em apenas 4,80 m de profundidade do perfil.

Foram elaboradas seções estratigráficas para representar as seções transversais (Linhas 01 e 03). Na Linha 02 foi realizada apenas uma amostragem DPDTS. Além das seções transversais, também foram representadas todas as possíveis seções através da interligação envolvendo todos os pontos, mostrando como os perfis se relacionam.

As Figuras 33 a 38 apresentam essas seções.

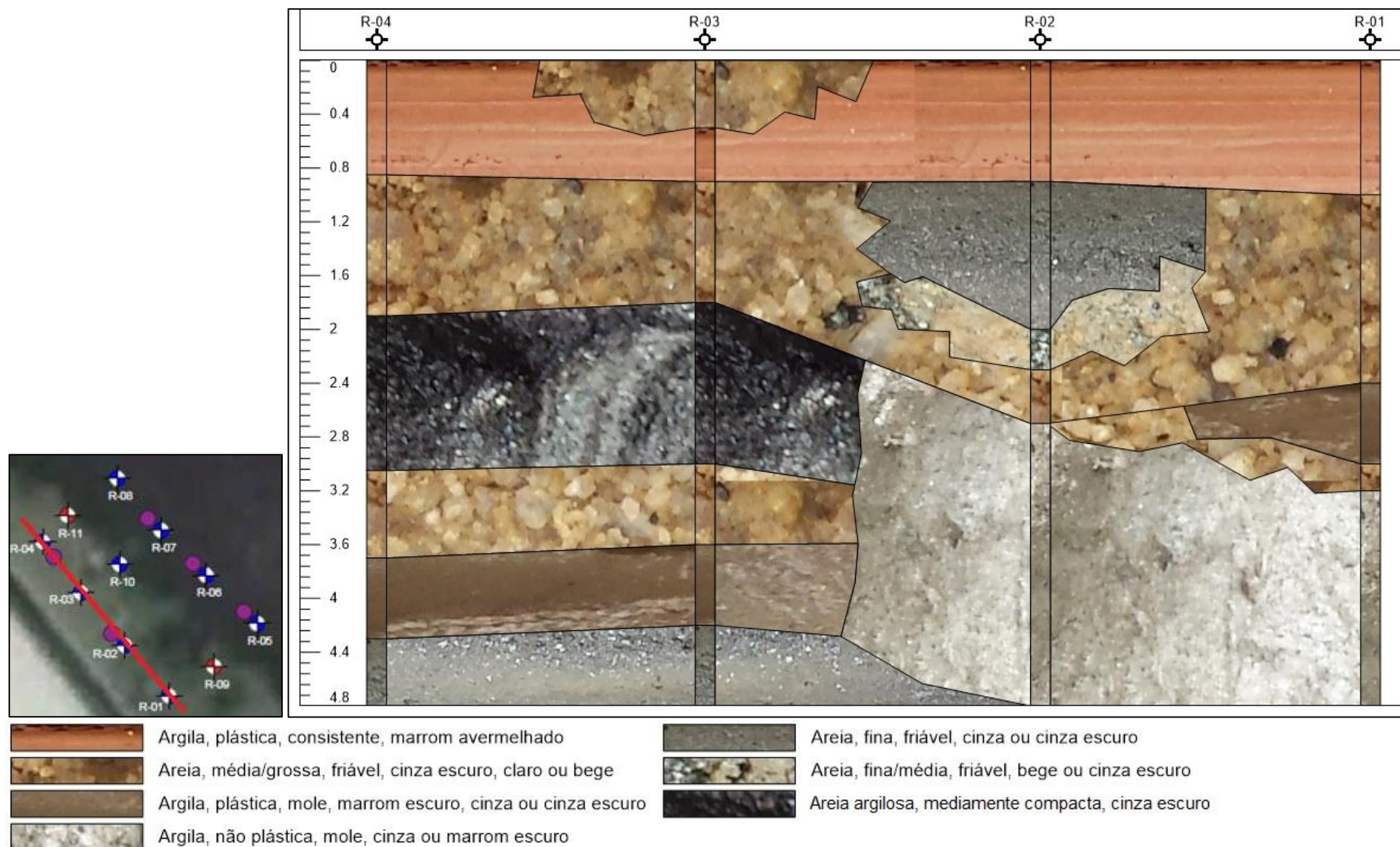


Figura 33 - Seção estratigráfica – Linha 01

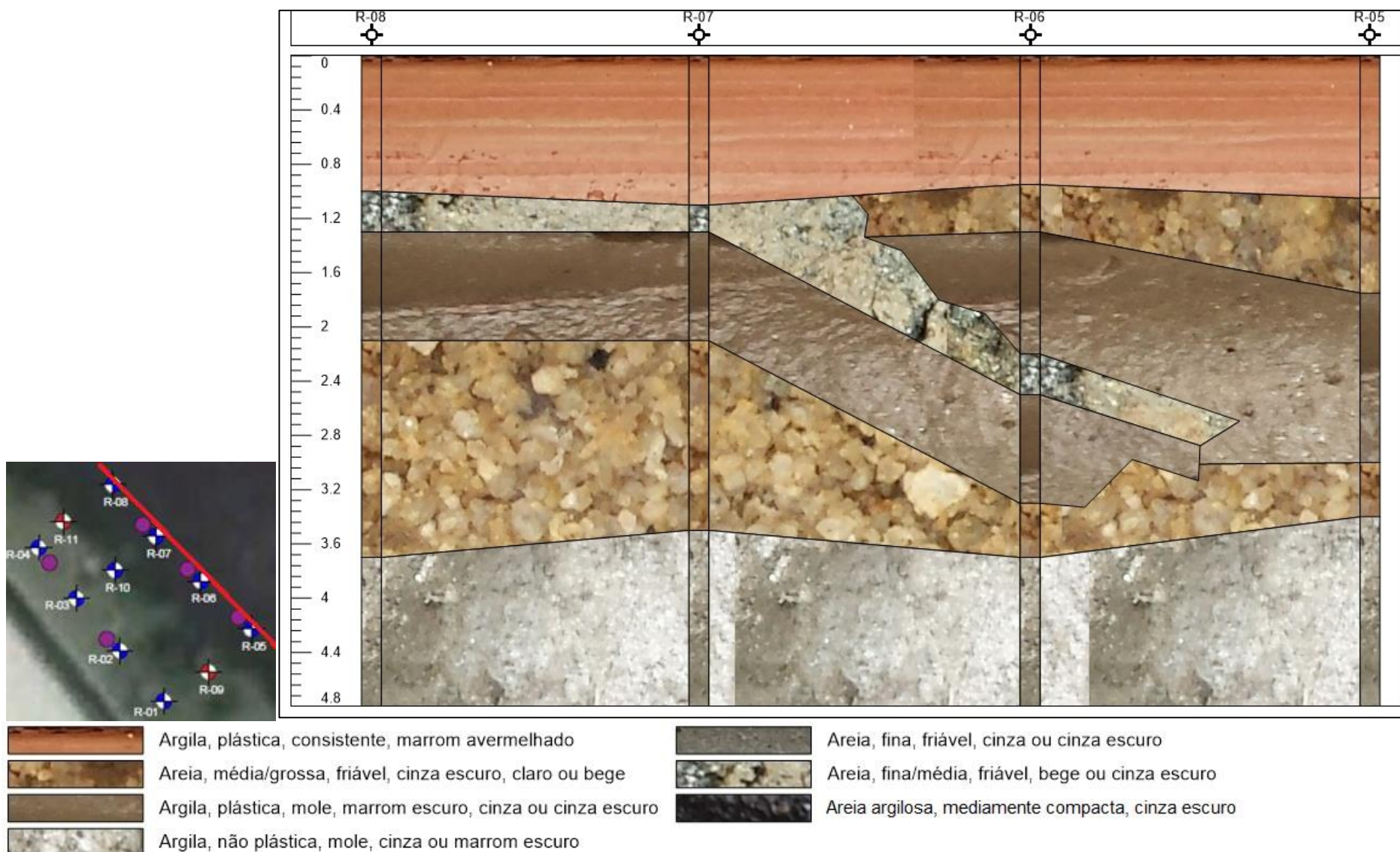


Figura 34 - Seção estratigráfica – Linha 03

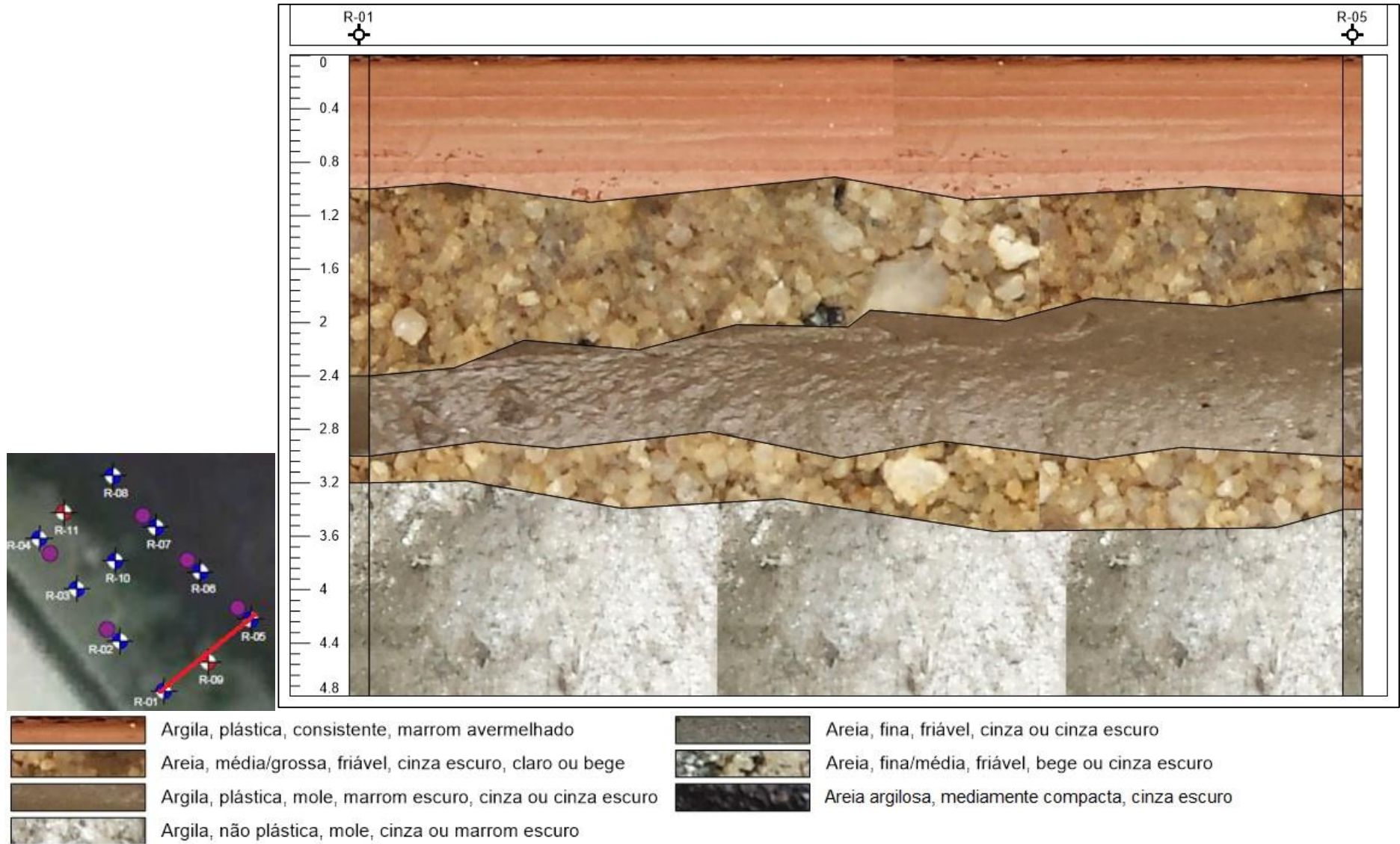


Figura 35 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-01 e R-05

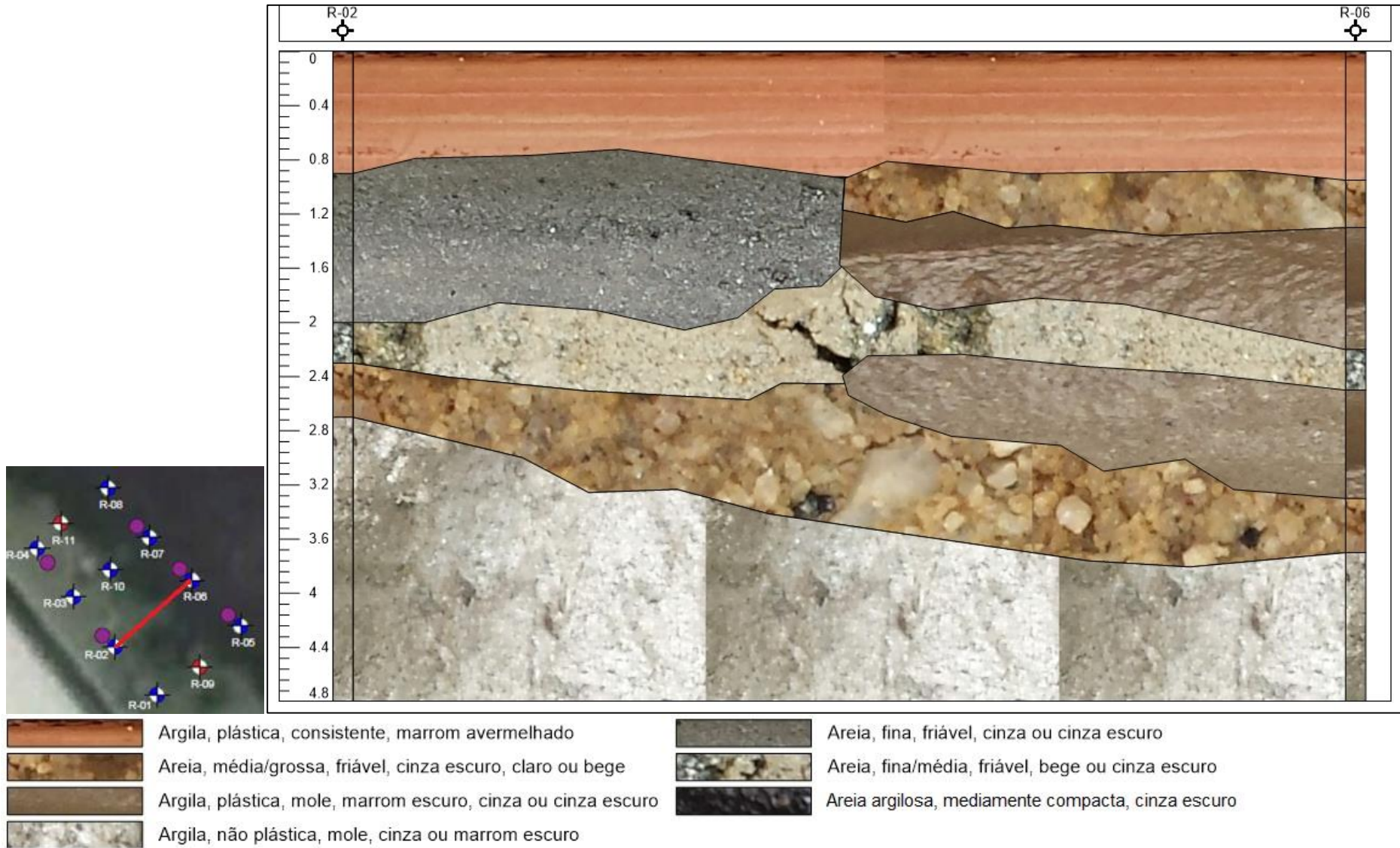


Figura 36 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-02 e R-06

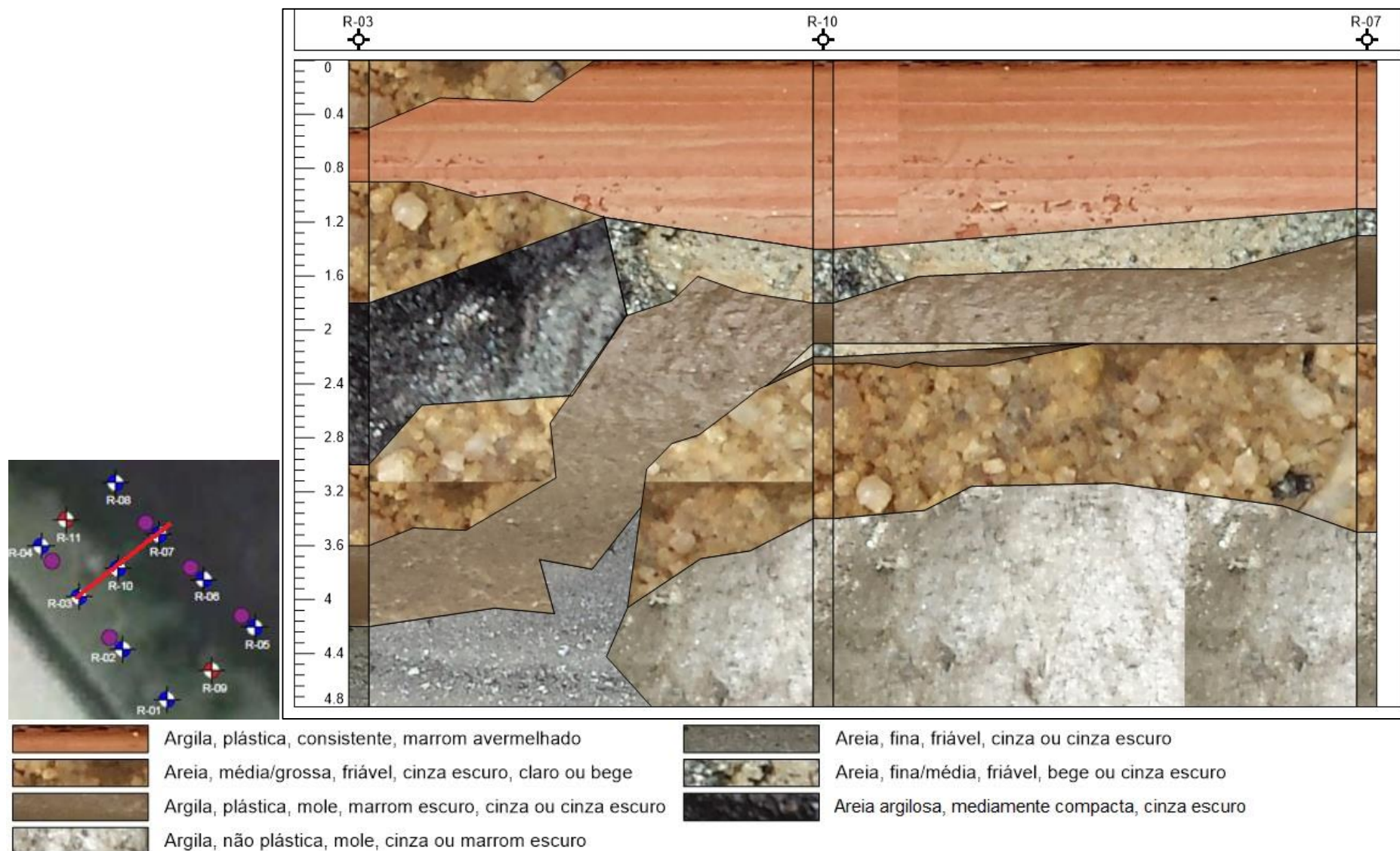


Figura 37 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-03, R-10 e R-07



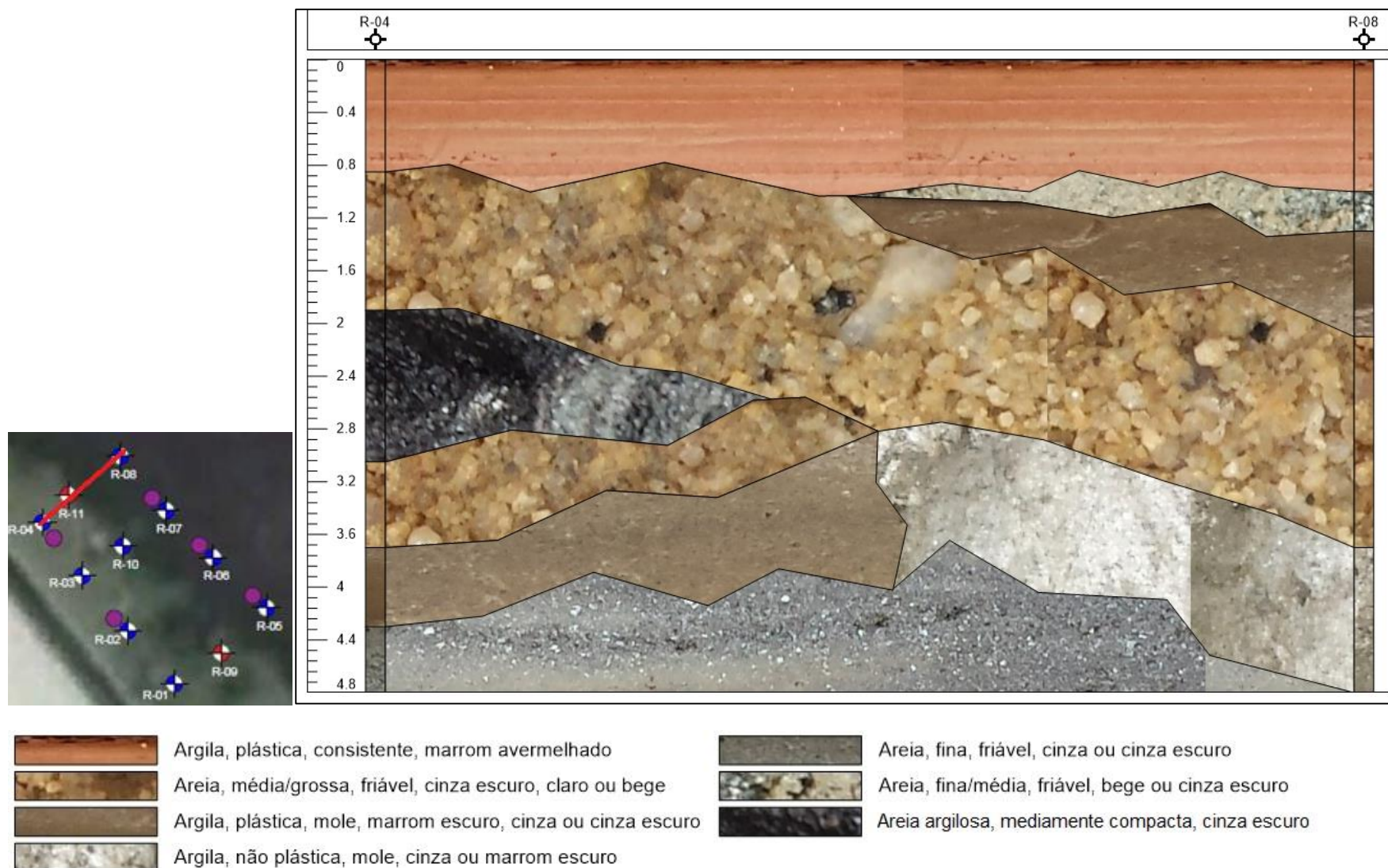


Figura 38 - Seção estratigráfica conectando os pontos R-04 e R-08

Dentre as seções, foi possível estabelecer a continuidade e conectividade de algumas unidades estratigráficas entre os perfis, destacando-se os seguintes pontos e tipos de solo:

- R-04, R-03, R-02 e R-01 (Linha 01), solo: Areia, média/grossa, friável, cinza escuro, claro ou bege;
- R-08, R-07 e R-06 (Linha 03), solo: Areia, fina/média, friável, bege ou cinza escuro;
- R-08, R-07, R-06 e R-05 (Linha 03), solo: Argila, plástica, mole, marrom escuro, cinza ou cinza escuro; Argila, não plástica, mole, cinza ou marrom escuro; Areia, média/grossa, friável, cinza escuro, claro ou bege;
- R-01 e R-05, solo: Argila, plástica, consistente, marrom avermelhado; Areia, média/grossa, friável, cinza escuro, claro ou bege; Argila, plástica, mole, marrom escuro, cinza ou cinza escuro; Argila, não plástica, mole, cinza ou marrom escuro;
- R-03, R-10 e R-07, solo: Argila, plástica, mole, marrom escuro, cinza ou cinza escuro;

Mesmo com o espaçamento entre os pontos inferior a 5,0 m e embora tenham sido apresentadas algumas continuidades, muitas unidades estratigráficas não se conectaram, o que destaca a heterogeneidade da área, típica em planícies aluviais, de intensa estratificação do solo, assim como levantado na caracterização da área, apresentada no item 4.1.

Nas Figuras 39 e 40 são apresentadas as principais amostras DPDTS ainda no *liner*, no momento da descrição tátil-visual realizadas em campo.



a) Argila, plástica, mole, cinza escuro



b) Transição entre a areia fina/média e areia média/grossa



c) Visualização do perfil estratigráfico das amostras no liner do ponto R-01



d) Areia, fina/média, friável, cinza



e) Areia, média/grossa, friável, cinza clara



f) Liners abertos após a descrição tátil visual

Figura 39 - Detalhe das principais amostras coletadas pelo método DPDTS ainda no *liner*, no momento da descrição tátil-visual realizada em campo

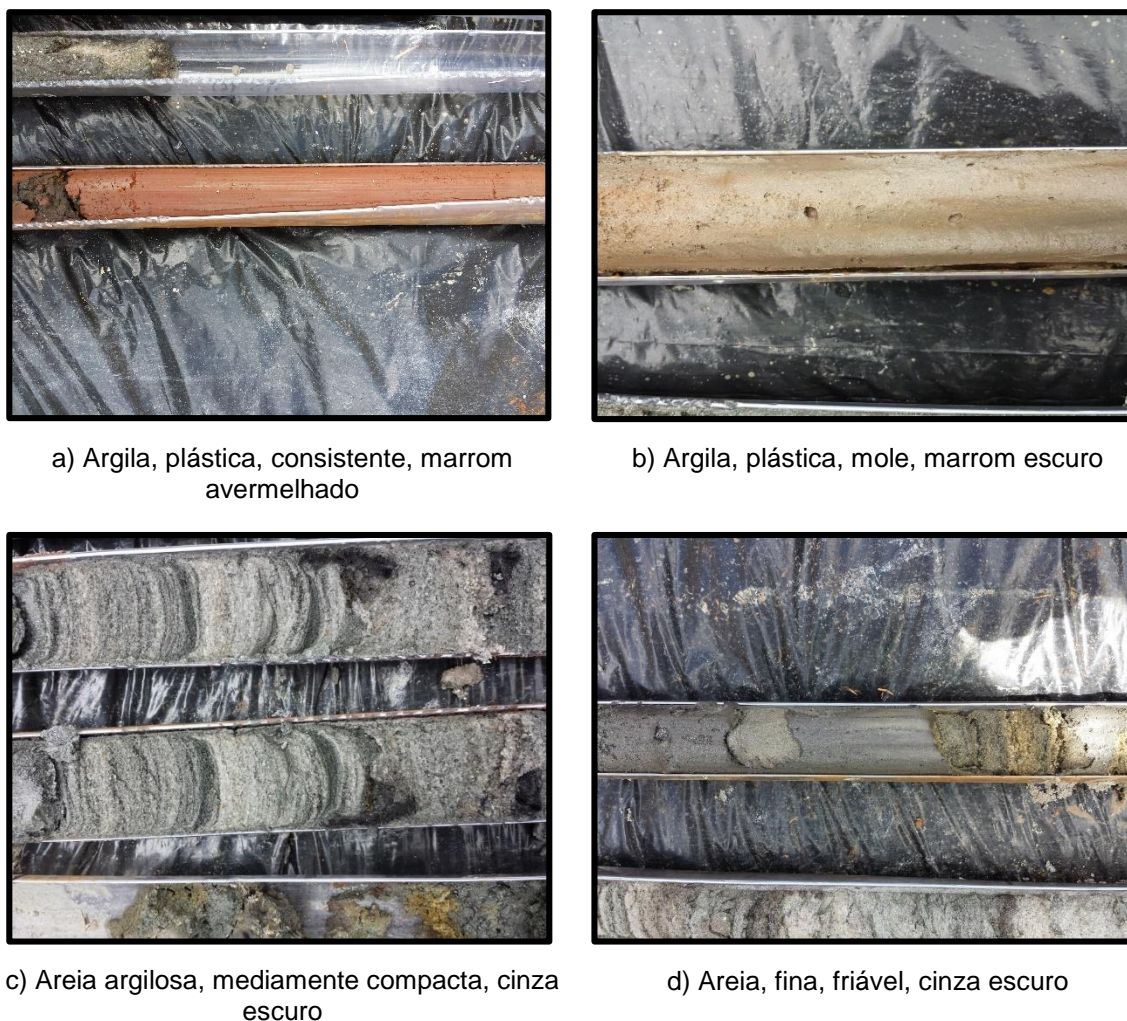


Figura 40 – Alguns dos horizontes encontrados nas amostras coletadas pelo método DPPTS ainda no *liner*, no momento da descrição tátil-visual realizada em campo

### 5.1.1 Ensaios laboratoriais para caracterização do solo

Conforme já descrito, foram selecionadas duas amostras do ponto R-01, três do ponto R-02 e outras três do ponto R-10 para realizar ensaios laboratoriais.

Não foram realizados todos os ensaios em todas as amostras devido a limitação do volume de solo obtido no *liner*. Essa limitação de volume se deu por conta da perturbação causada na amostra pela cravação DPPTS, gerando compactação do solo e preenchimento incompleto no interior do *liner*.

Os ensaios de Granulometria Conjunta foram realizados para todas as amostras, já os ensaios para determinação da Massa Específica dos Sólidos ( $\rho_s$ ) foram realizados em apenas 4 amostras típicas e representativa das demais. Para

as demais amostras arenosas este índice foi considerado igual a 2,65 g/cm<sup>3</sup>, pela presença quase exclusiva de minerais de quartzo na composição desses solos.

Dentre as 4 amostras escolhidas para determinação da massa específica dos sólidos, 3 delas foram selecionadas, também para realização dos ensaios de Limites de Consistência (LL e LP) e Azul de Metileno. São elas uma amostra de cada furo (R-01, R-02 e R-10),

A Tabela 4 apresenta os resultados de Massa Específica dos Sólidos, Limites de Consistência e Azul de Metileno. A Tabela 5 mostra os resultados de granulometria conjunta e a Tabela 6 a classificação granulométrica de cada amostra ensaiada em laboratório.

Tabela 4 - Massa Específica dos Sólidos, Limites de Consistência e Azul de Metileno

Amostra	Profundidade (m)	Massa Específica dos Sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Consistência (%)			Azul de Metileno		
			LL	LP	IP	CTC (m/100g)	Vb (g)	% argila
SD 01	2,00 a 2,20	2,650*						
SD 01	2,40 a 3,00	2,729	51	25	26	12	4,51	14
SD 02	0,90 a 2,00	2,722						
SD 02	2,30 a 2,70	2,650*						
SD 02	3,60 a 4,60	2,775	55	NP	-	5	1,76	11
SD 10	1,40 a 1,80	2,650*						
SD 10	1,80 a 2,10	2,903	54	32	22	10	3,74	30
SD 10	2,25 a 3,40	2,650*						

\* valores estimados

Tabela 5 – Granulometria conjunta

Amostra	Profundidade (m)	Composição Granulométrica (%)							
		Ped grosso	Ped médio	Ped fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
R-01	2,00 a 2,20	0	2,5	3,5	20	31	30	9	4
R-01	2,40 a 3,00	0	0	0	1	1,5	5,5	50	42
R-02	0,90 a 2,00	0	1	5	16	23	31	19	5
R-02	2,30 a 2,70	0	2	8	21	24	29	14	2
R-02	3,60 a 4,60	0	0	0	0	0,5	11	77,5	11
R-10	1,40 a 1,80	0	0	0	5,5	39	40	13,5	2
R-10	1,80 a 2,10	0	0	0	0,5	1,5	23	46	29
R-10	2,25 a 3,40	0	1,5	9,5	17	26	33	11,5	1,5

Tabela 6 – Classificação textural das amostras ensaiadas em laboratório

Amostra	Profundidade (m)	Classificação
R-01	2,00 a 2,20	Areia média a fina cinza escuro
R-01	2,40 a 3,00	Silte argiloso cinza escuro
R-02	0,90 a 2,00	Areia fina a média pouco siltosa cinza escuro com mica
R-02	2,30 a 2,70	Areia fina a média pouco siltosa cinza escuro com mica
R-02	3,60 a 4,60	Silte pouco argiloso cinza escuro com muita mica
R-10	1,40 a 1,80	Areia fina a média pouco siltosa cinza esverdeado com mica
R-10	1,80 a 2,10	Silte argiloso cinza escuro com veios amarelos e mica
R-10	2,25 a 3,40	Areia fina a média pouco siltosa cinza claro com mica

A Tabela 7 permite a comparação entre os métodos para classificação textural dos solos investigados: tátil-visual e a partir de ensaios laboratoriais.

Tabela 7 – Descrição tátil-visual e a partir dos ensaios de laboratório

Amostra	Profundidade		Classificação do Solo	
	De (m)	Até (m)	Tátil-Visual	Ensaio de laboratório
R-01	1,00	2,40	Areia, média/grossa, friável, cinza escuro	Areia média a fina cinza escuro
R-01	2,40	3,00	Argila, plástica, mole, cinza escuro	Silte argiloso cinza escuro
R-02	0,90	2,00	Areia, fina, friável, cinza escuro	Areia fina a média pouco siltosa cinza escuro com mica
R-02	2,30	2,70	Areia, média/grossa, cinza claro	Areia fina a média pouco siltosa cinza escuro com mica
R-02	2,70	4,80	Argila, não plástica, mole, cinza escuro	Silte pouco argiloso cinza escuro com muita mica
R-10	1,40	1,80	Areia, fina/média, friável, cinza escuro	Areia fina a média pouco siltosa cinza esverdeado com mica
R-10	1,80	2,10	Argila, plástica, mole, cinza escuro	Silte argiloso cinza escuro com veios amarelos e mica
R-10	2,25	3,40	Areia, média/grossa, friável, cinza claro	Areia fina a média pouco siltosa cinza claro com mica

Nota-se que as principais diferenças encontradas entre os métodos distintos, tátil—visual e laboratório, dizem respeito as diferenças entre silte e argila e entre areia média e grossa.

Tais diferenças, as quais denotam as distribuições proporcionais dos tamanhos dos grãos, são difíceis de serem sentidas pelo método tátil-visual, por isso, pequenos desvios como esse são comuns, principalmente quando se trata de diferenciar o silte da argila, que possuem grãos de diâmetro entre 0,002 a 0,06 mm. Em estudos de áreas contaminadas ainda há uma dificuldade maior por ser necessária a utilização de luvas, preocupando-se e prevenindo-se do contato dérmico com os contaminantes, dificultando ainda mais o tato nas amostras.

Assim, de um modo geral, a descrição tátil-visual realizada pode ser considerada adequada para os objetivos desse estudo. Destaca-se que na investigação de áreas contaminadas, a descrição tátil-visual tem a função de estabelecer o Modelo Conceitual inicial do meio físico, além de permitir a coleta de amostras para análise física e química do solo.

## 5.2 Ensaio CPTu e de Dissipação de Poro-pressão (PPDT)

Após uma primeira compreensão do meio físico a partir da interpretação dos perfis com a descrição tátil-visual e dos ensaios de caracterização de laboratório,

deu-se início a etapa de tratamento e interpretação dos 16 ensaios CPTu empregando planilhas eletrônicas, as quais possibilitaram o cálculo do Índice do Tipo de Comportamento do Solo Normalizado ( $I_c - SBT_N$ ) e a elaboração de um perfil hidroestratigráfico em alta resolução.

As profundidades atingidas pelos ensaios CPTu variaram entre 5,42 m (R-01) e 9,74 m (R-07G). Atingiu-se uma profundidade muito maior com os ensaios CPTu do que com as sondagens DPDTS. Assim como já mencionado, em ambas as sondagens, DPDTS e CPTu, o critério para a paralisação do avanço foi o alcance máximo da sonda hidráulica mecanizada, limitado principalmente pelo tipo de solo perfurado.

A Tabela 8 mostra a profundidade atingida para cada ensaio CPTu realizado e destaca também a diferença de profundidade entre esses ensaios e os DPDTS.

Tabela 8 - Profundidade dos ensaios CPTu

Identificação	Prof. CPTu (m)	Diferença de prof. entre CPTu e DPDTS (m)
R-01	5,42	0,62
R-02	7,88	3,08
R-02G	5,88	1,08
R-03	7,32	2,52
R-04	5,70	0,90
R-04G	5,68	0,88
R-05	8,32	3,52
R-05G	8,18	3,38
R-06	8,12	3,32
R-06G	8,68	3,88
R-07	8,82	4,02
R-07G	9,74	4,94
R-08	5,66	0,86
R-09	7,62	-
R-10	6,06	1,26
R-11	8,56	-

As Figuras 41 e 42 mostram os perfis de resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), razão de atrito ( $R_f$ ) e poro pressão ( $u_2$ ) medidos respectivamente nos ensaios R-02 e R-07, apenas como exemplo para ilustrar dois resultados típicos dessa etapa de tratamento dos dados.



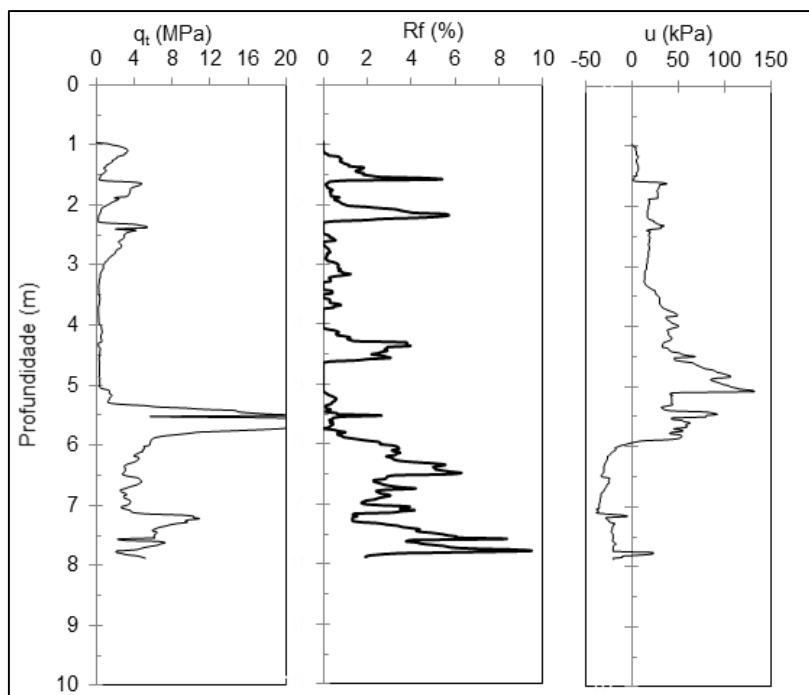


Figura 41 – Perfil CPTu R-02

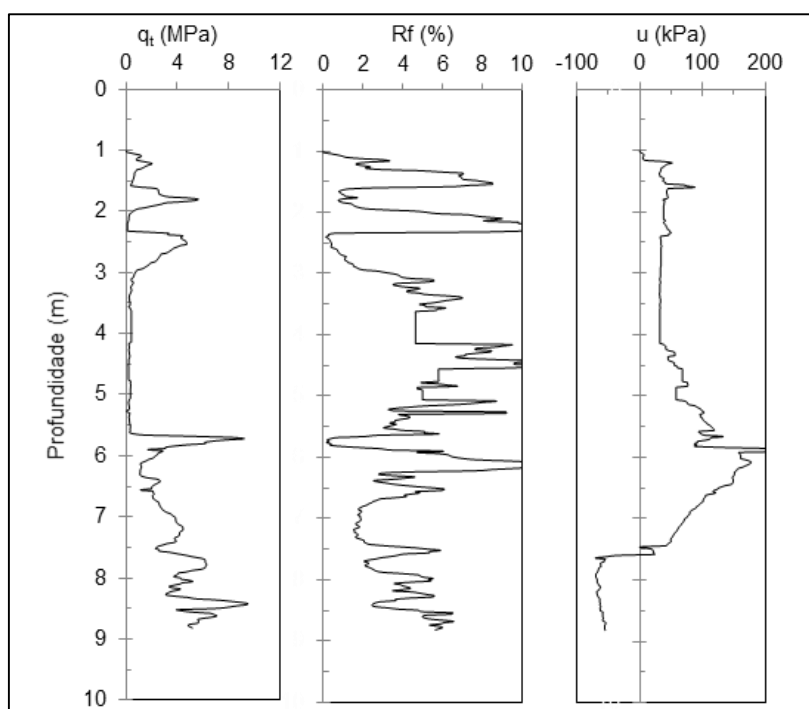


Figura 42 - Perfil CPTu R-07

A classificação detalhada das unidades hidroestratigráficas será apresentada e discutida em um tópico adiante, após cálculo do  $I_c$ . No entanto, já é possível observar nestas figuras, além dos registros de valores em escala

centimétrica, elevada resistência de ponta acompanhada de queda no valor da razão de atrito e poro pressão, próximo aos 5,0 m de profundidade. Isso indica que nesse ponto existe uma camada muito resistente, de textura grossa ou compacta, que é a profundidade em que a sonda DPPTS não conseguiu ultrapassar.

Valores de poro pressão negativos podem ocorrer em variações de solos argilosos a siltosos, de baixa plasticidade e consistência rija, que dilatam quando as rupturas no solo pela cravação da ponteira geram o efeito de sucção no sensor de poro pressão. Por isso, esses registros também servem como indicativos importantes da ocorrência de camadas de solos pouco espessas, e não devem ser desprezados.

### ***5.2.1 O uso de Slot Filter (com graxa) e da Pedra Porosa (com glicerina deaerada) para registro da Poro-Pressão ( $u_2$ )***

A fim de comparar o emprego da graxa e da glicerina para registro de poro pressão ( $u_2$ ) em ensaios CPTu, algumas medidas preliminares foram realizadas para avaliar e calibrar os procedimentos de campo.

Identificação e ajustes de profundidades foram realizados para permitir a comparação dos valores obtidos de  $u_2$  entre os ensaios com graxa e com glicerina, através da avaliação do parâmetro  $R_f$ , a fim de identificar a ocorrência de um horizonte com o mesmo tipo de solo nos pares de ensaios: graxa e glicerina.

Dos 5 ensaios em duplicata realizados, o ponto R-02 ficou fora do procedimento de eliminação de dados discrepantes e definição da população amostral, uma vez que nesse local o ensaio com glicerina, R-02G, não fez o registro do atrito lateral ( $f_s$ ), o que impossibilitou o cálculo da razão de atrito ( $R_f$ ).

Os registros de poro-pressão ( $u_2$ ) no ensaio R-02G foram utilizados normalmente para o cálculo da condutividade hidráulica pontual e para os ensaios de dissipação de poro pressão (PPDT). No item 5.2.4 dessa pesquisa serão mostrados e discutidos os resultados de  $t_{50}$  dos ensaios PPDT, assim como o cálculo da condutividade hidráulica pontual através do mesmo.

A Tabela 9 mostra como foram feitos os ajustes de profundidade.

Tabela 9 - Ajuste de profundidade das duplicatas em relação a seu par

<b>Identificação</b>	<b>Ajuste de Prof. (m)</b>
R-04G	+0,36
R-05G	+0,20
R-06G	+0,10
R-07G	+0,00

Como o ensaio de piezocone registrou dados a intervalos de 2,0 cm, foi possível obter um número elevado de dados ao longo de todos os perfis, ficando o tamanho da população amostral total, sem a retirada dos pontos discrepantes, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Conjunto de dados obtidos em cada ensaio de piezocone

<b>Identificação</b>	<b>Número de dados de cada CPTu</b>
R-04 / R-04G	222
R-05 / R-05G	351
R-06 / R-06G	356
R-07 / R-07G	387

A Figura 43 mostra a razão de atrito ( $R_f$ ) dos ensaios R-04, R-05, R-06 e R-07 e suas respectivas duplicatas após definição da população amostral, seguindo o procedimento anteriormente descrito.

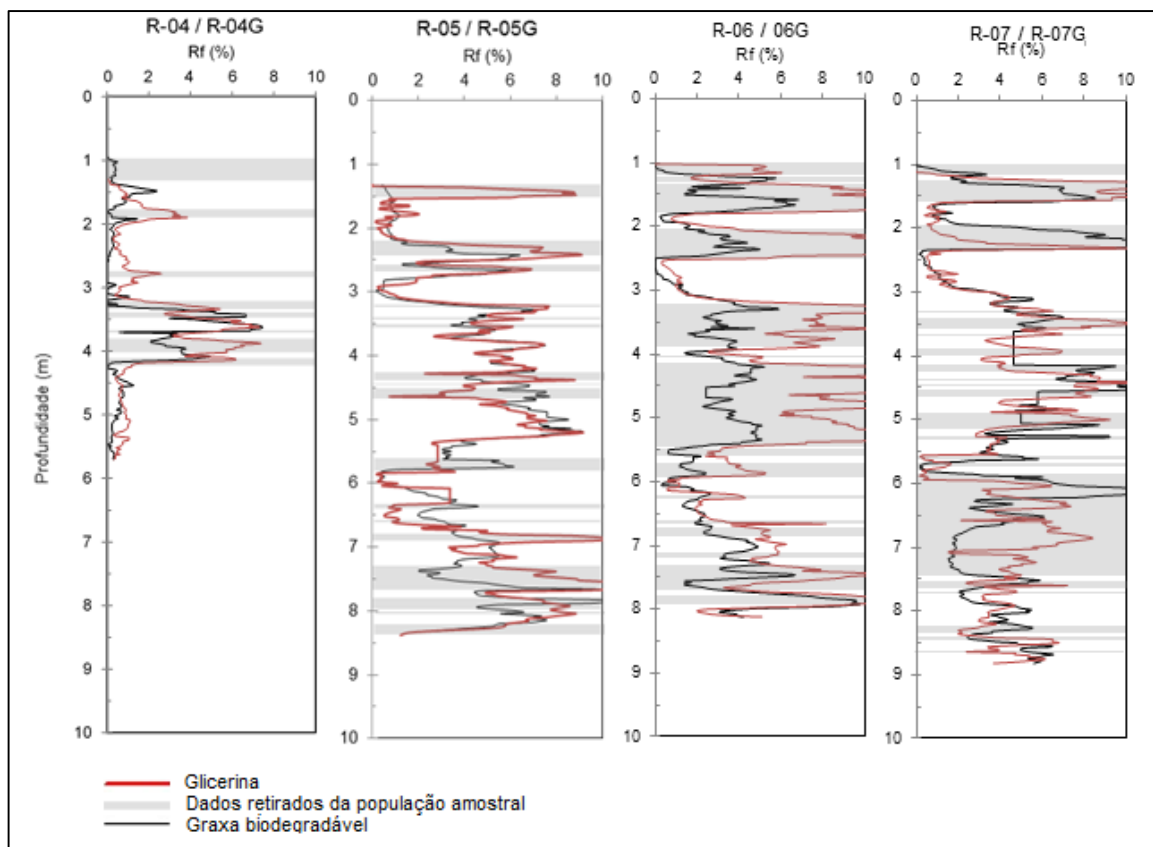


Figura 43 – Ajuste de profundidade dos ensaios com base nos valores de  $R_f$  e intervalo de dados retirados da comparação

A Tabela 11 mostra os resultados da correlação linear de Pearson ( $r$ ), o número de dados da população e o erro amostral devido a retirada dos dados.

Tabela 11 - Resultados da correlação linear de Pearson ( $r$ )

Pontos Comparados	Iterações	$R_f$	$q_t$	$u_2$
R-04 / R-04G	<b>Coefficiente de Pearson (<math>r</math>)</b>	<b>0,92</b>	<b>0,60</b>	<b>0,68</b>
	Nº de dados da população		184	
	Erro amostral (%)		3,05	
R-05 / R-05G	<b>Coefficiente de Pearson (<math>r</math>)</b>	<b>0,94</b>	<b>0,78</b>	<b>0,83</b>
	Nº de dados da população		252	
	Erro amostral (%)		3,35	
R-06 / R-06G	<b>Coefficiente de Pearson (<math>r</math>)</b>	<b>0,91</b>	<b>0,70</b>	<b>0,82</b>
	Nº de dados da população		140	
	Erro amostral (%)		6,6	
R-06 / R-06G	<b>Coefficiente de Pearson (<math>r</math>)</b>	<b>0,91</b>	<b>0,71</b>	<b>0,82</b>
	Nº de dados da população		206	
	Erro amostral (%)		4,76	

Uma correlação de intensidade forte foi considerada para valores de  $r$  maiores que 0,70 e média intensidade para valores entre 0,50 a 0,70.

Como a definição dos dados a serem correlacionados através dos ajustes descritos se pautou pela análise do parâmetro  $R_f$ , na qual este teve a função de estabelecer a comparação do mesmo tipo de solo entre os perfis,  $R_f$  apresentou correlação de intensidade forte em todos os pontos, ou seja, valores de  $r$  sempre acima de 0,90.

A poro pressão também apresentou forte correlação, com os pontos R-05, R-06 e R-07 com valores de  $r$  acima de 0,80 e o ponto R-04 próximo a 0,70, o que indica que é possível obter um dado confiável através do dado do seu par correspondente correlacionado.

Sendo assim, para esta área de estudo, tendo-se os valores de poro pressão de apenas um método, pode-se calcular os valores do outro método, seja com graxa no filtro de cavidade ou glicerina na pedra porosa, pois basta aplicar a equação da reta gerada nesta correlação.

A resistência de ponta obteve um valor de  $r$  inferior ao valor obtido para a poro pressão em todos os pontos, porém, também acima de 0,70 nos pontos R-05, R-06 e R-07, menor apenas no ponto R-04, com 0,60, mostrando para este ponto, correlação de intensidade média.

O sensor que registra  $q_t$  foi o mesmo nos pontos ensaiados e não dependia de outros materiais e preparação específica, como depende o sensor que registra  $u_2$ . Portanto, mesmo com apenas 1,0 m de distância entre os pares de ensaios duplicatas, a diferença do valor do Coeficiente de Pearson encontrada entre  $q_t$  e  $u_2$  está intrinsecamente relacionada à heterogeneidade do meio investigado.

Por outro lado, os resultados obtidos também indicam que, embora os valores absolutos de  $u_2$  utilizando graxa e glicerina apresentem diferenças, estes possuem forte correlação e podem ser avaliados em termos relativos, demonstrando coerência e comportamento equivalente ao longo do perfil, apenas com valores absolutos diferentes.

A Figura 44 ilustra este comportamento relativo e mostra a diferença entre os valores da poro pressão registradas utilizando graxa e glicerina em campo durante os ensaios. Nota-se pela variação dos valores, maior sensibilidade no sensor de poro pressão que utilizou glicerina.

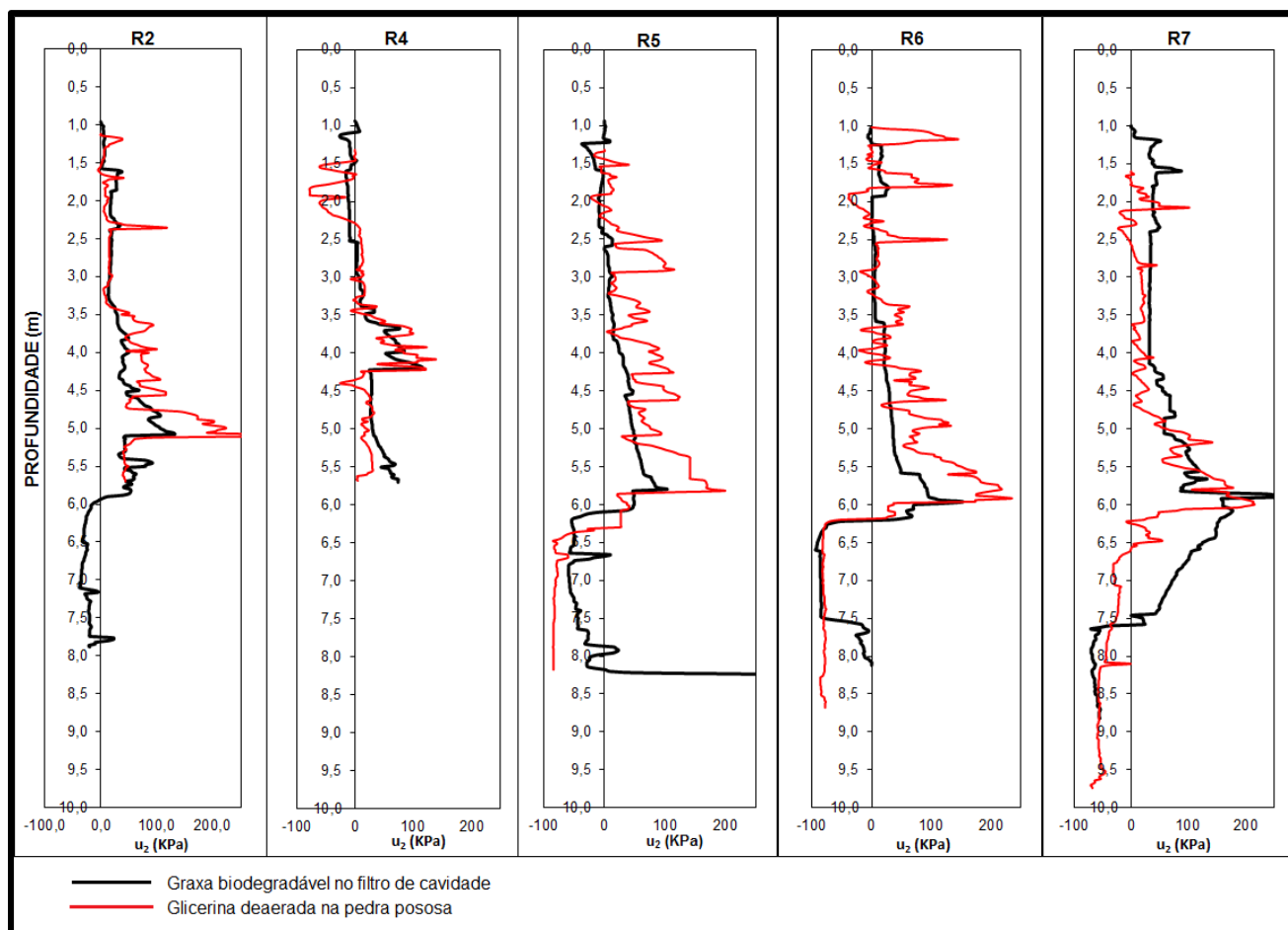


Figura 44 – Perfis de poro pressão medida em ensaios em duplicata utilizando graxa biodegradável no filtro de cavidade e glicerina deaerada na pedra porosa

Sobre os ensaios de dissipação do excesso de poro pressão (PPDT), constatou-se que o tempo para dissipar 50% do excesso de poro pressão ( $t_{50}$ ) utilizando glicerina deaerada na pedra porosa é menor do que o tempo utilizando graxa no filtro de cavidade. Portanto, embora os valores absolutos de poro pressão utilizando glicerina sejam maiores, eles dissipam mais rápidos.

As Figuras 45 e 46 mostram, como exemplo, a dissipação do excesso de poro pressão em relação ao tempo em dois ensaios, R-05G a 5,08 m e R-07 a 5,26 m de profundidade. Os ensaios PPDT eram interrompidos quando se atingia o  $t_{50}$ .

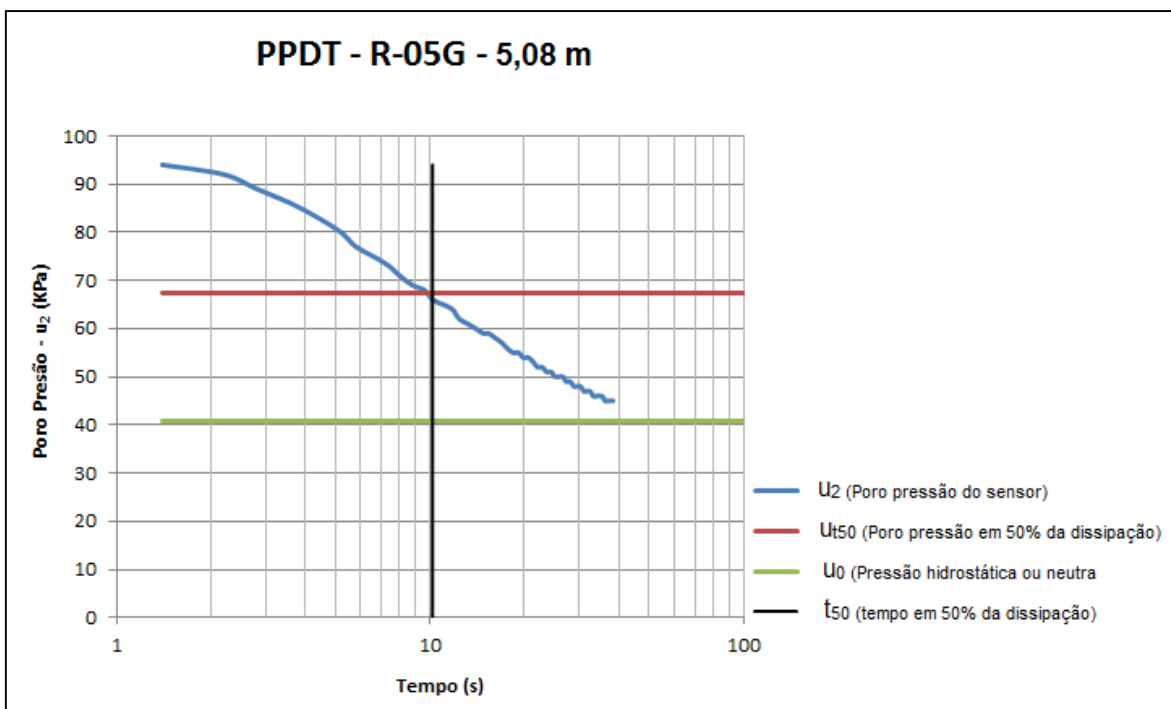


Figura 45 – Dissipação do excesso de poro pressão utilizando glicerina deaerada na pedra porosa (R-05G)

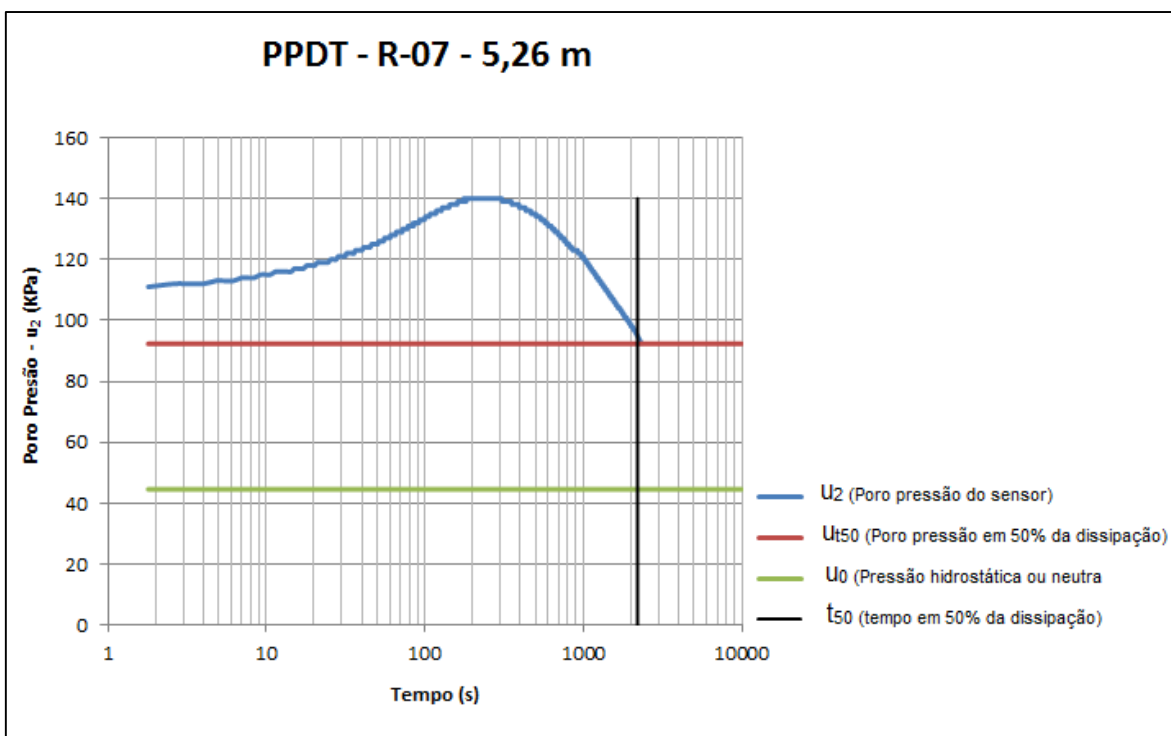


Figura 46 - Dissipação do excesso de poro pressão utilizando graxa no filtro de cavidade (R-07)

Na Figura 45, o PPDT do ponto R-05G com glicerina na pedra porosa teve  $t_{50}$  igual a 10 segundos. Sendo que desde o início do ensaio houve queda dos

valores de poro pressão. Já na Figura 46, para o ponto R-07 com graxa no filtro de cavidade, o  $t_{50}$  foi próximo de 2.000 segundos e antes de iniciar o processo de dissipação, a poro pressão continuou em ascensão.

Este fato, apesar de não ter sido exclusividade da utilização da graxa, pois ocorreu em alguns ensaios com glicerina, pode ter sido influenciado pelo tipo de solo e principalmente pela viscosidade do material utilizado para transmitir a pressão do meio ao sensor, pois quanto maior sua viscosidade, como no caso das graxas, maior será o seu tempo de resposta, produzindo histerese e dissipações mais longas.

### 5.2.2 Definição de perfis do subsolo com base no $CPTu$ ( $I_c$ - $SBT_N$ )

O cálculo de  $I_c$  foi realizado para cada dado registrado no ensaio de piezocone, portanto, foi possível estabelecer um perfil contínuo de classificação do tipo de solo em alta resolução, o que permitiu identificar a intensa heterogeneidade do meio investigado, característica dessa região, conforme os resultados das sondagens DPDTS previamente discutidas nesse trabalho.

As Figuras 49 a 59 apresentam os perfis contínuos de  $I_c$ , dos ensaios R-01 a R-11, e a variabilidade do perfil, como mostra os perfis da descrição tátil-visual das sondagens DPDTS, permitindo compará-los.

Os 5 pontos duplicatas não são apresentados nessas figuras, uma vez que o principal objetivo dessas duplicatas era verificar a correlação entre os resultados de poro pressão obtidos com graxa e glicerina.

As Figuras 47 e 48 mostram, respectivamente, a legenda com os valores de  $I_c$  e sua classificação do tipo de solo e a legenda do tipo de solo pela descrição tátil-visual. Optou-se em apresenta-las apenas uma vez, para que não ficasse redundante e, assim, facilitasse a visualização das figuras que seguem adiante.

$I_c$		Tipo de Solo
0,00	1,31	Areias com cascalho e areias
1,31	2,05	Areias a areias siltosas
2,05	2,60	Misturas arenosas - areias siltosas a siltes arenosos
2,60	2,95	Misturas siltosas - siltes argilosos a argilas siltosas
2,95	3,60	Argilas a argilas siltosas
3,60	> 3,6	Solos Orgânicos

Figura 47 – Valor de  $I_c$  e respectiva classificação do tipo de solo  $SBT_N$





Figura 48 – Tipos de solo segundo a descrição tátil-visual

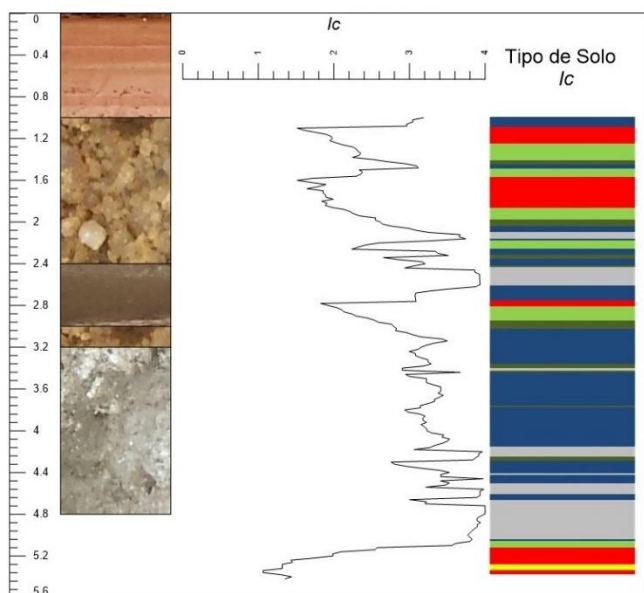


Figura 49 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-01

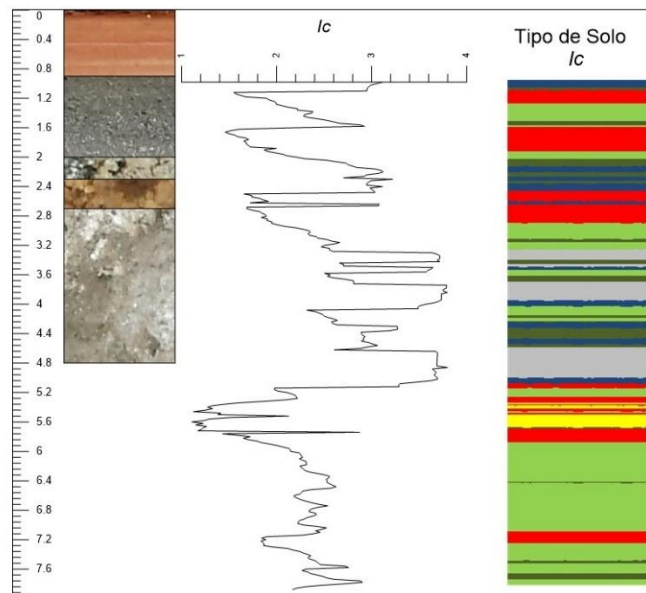


Figura 50 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-02

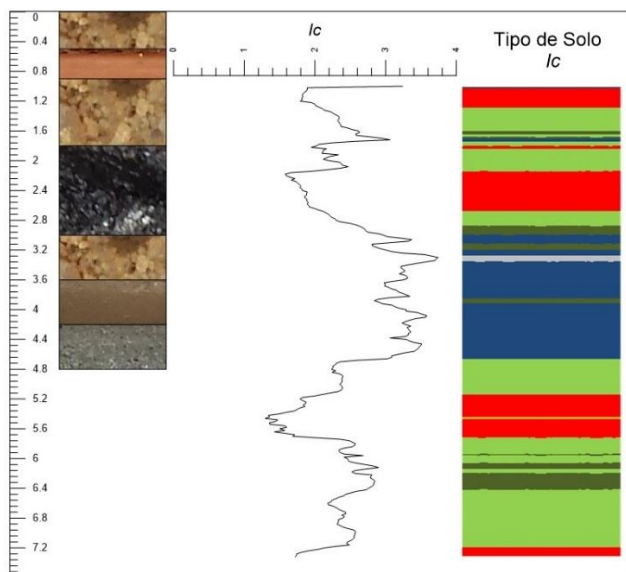


Figura 51 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-03

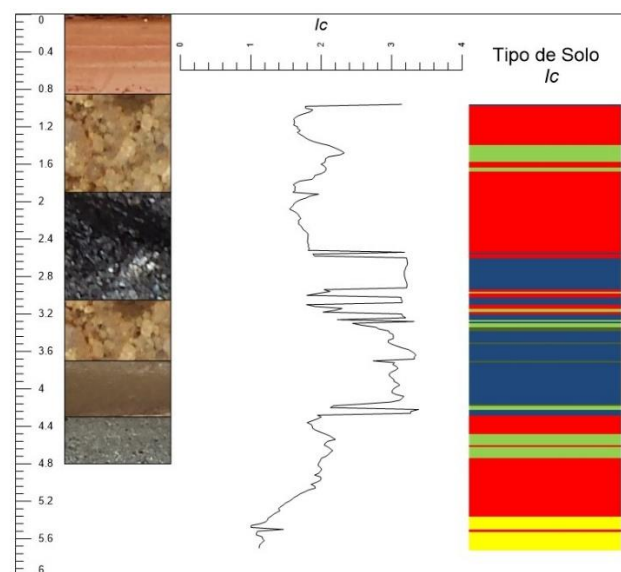


Figura 52 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-04

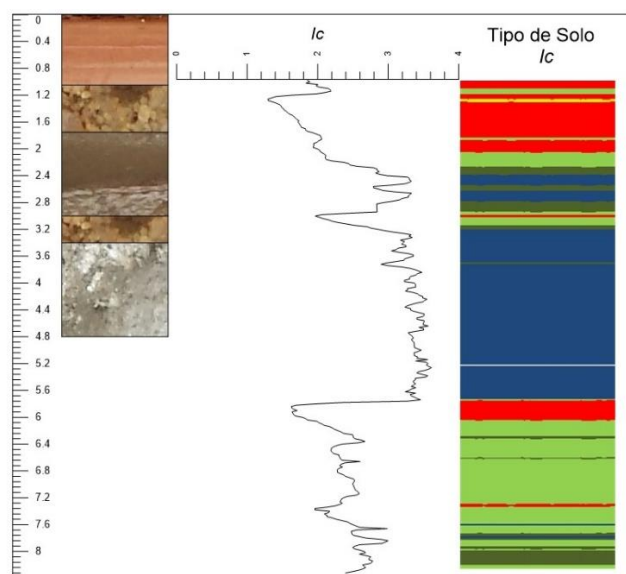


Figura 53 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-05

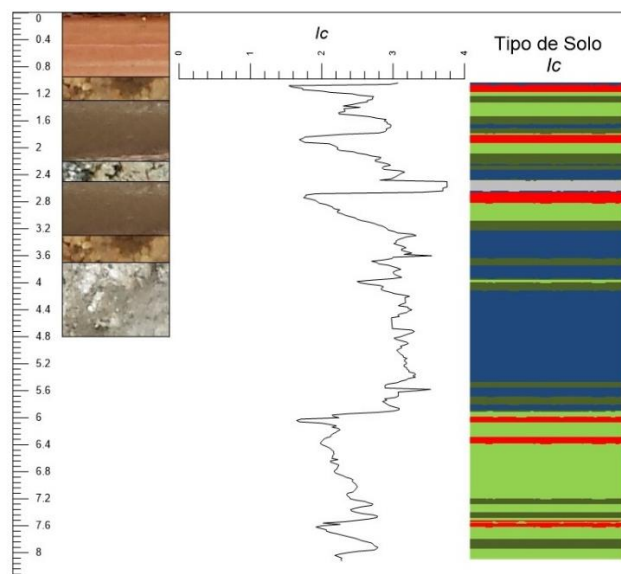


Figura 54 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-06

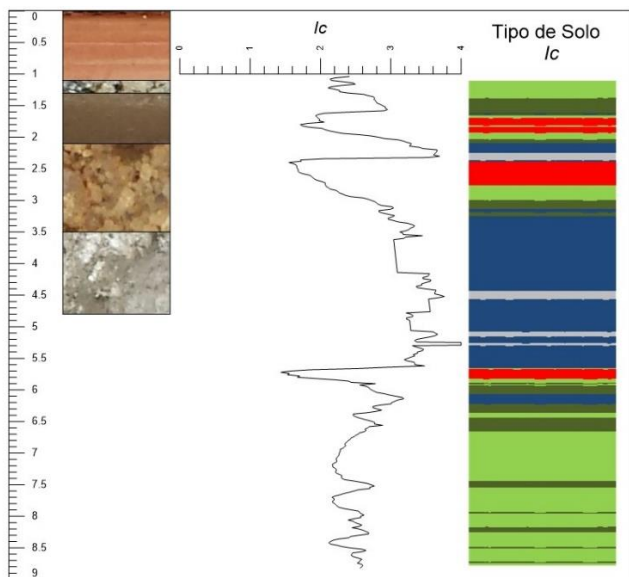


Figura 55 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-07

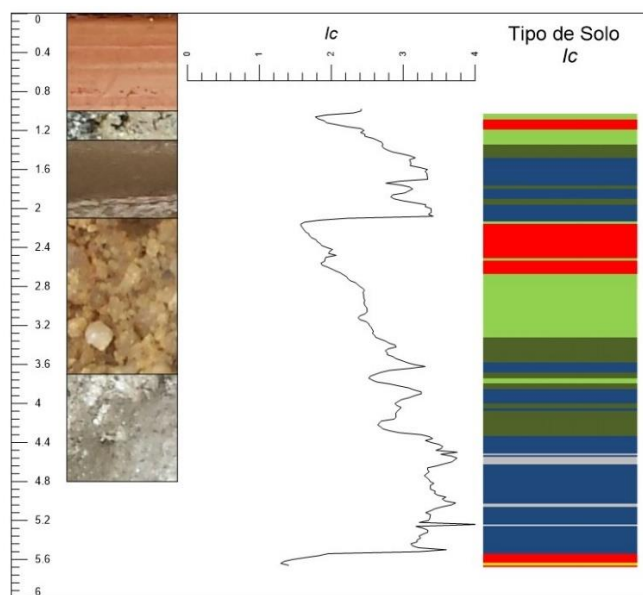


Figura 56 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-08

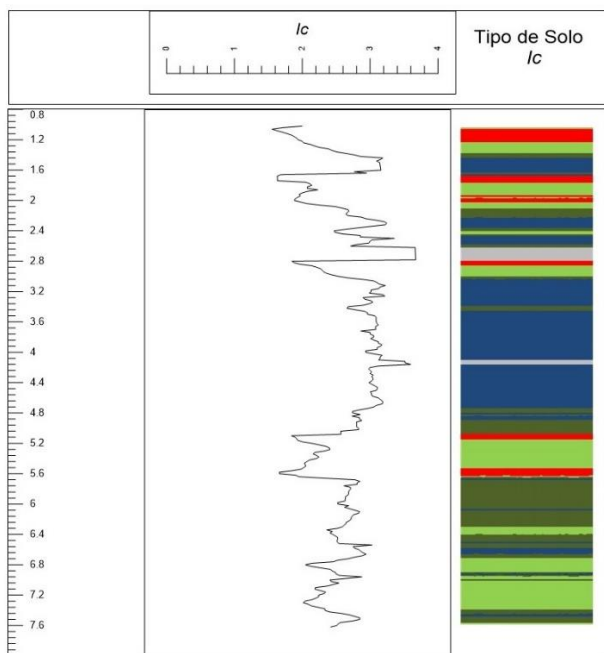


Figura 57 – Perfil do subsolo interpretado pelo  $I_c$  do ponto R-09

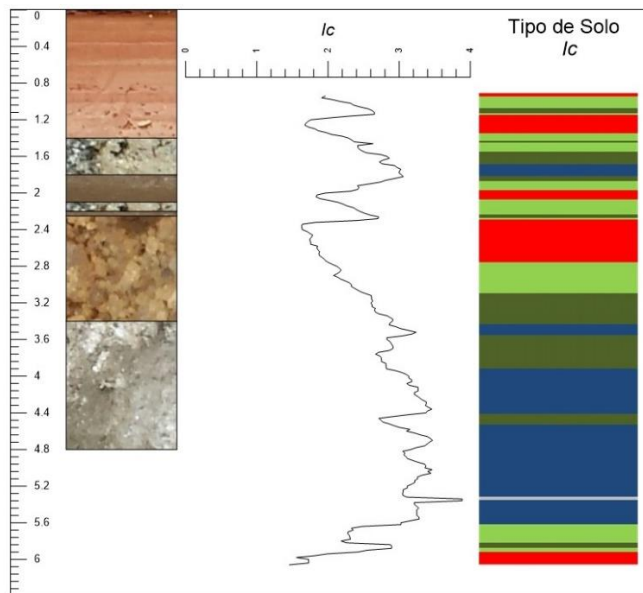


Figura 58 – Perfil do subsolo pelo DPDTS e pelo  $I_c$  do ponto R-10

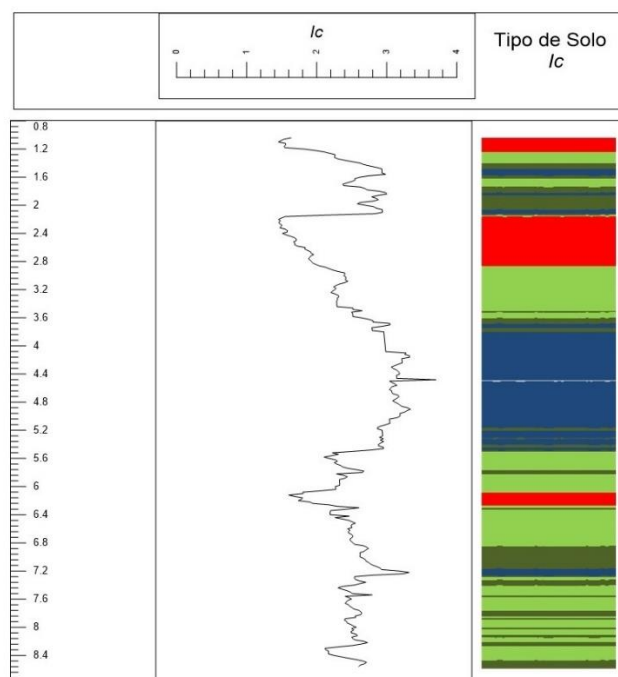


Figura 59 – Perfil do subsolo interpretado pelo  $I_c$  do ponto R-11

Nos pontos R-09 e R-11 não foram realizadas sondagens DPDTS, portanto, só existem os perfis do subsolo interpretados com base nos valores de  $I_c$  calculados a partir dos resultados dos ensaios de piezocone.

É possível observar nos resultados apresentados nas figuras acima, que a classificação do tipo de solo através do índice  $I_c$  varia em escala centimétrica, identificando perfis de solo que a descrição tátil-visual não foi capaz de detectar.

Salienta-se que a descrição tátil-visual indicou um perfil do subsolo heterogêneo e com horizontes de espessura de 5,0 cm, porém, os ensaios CPTu apresentaram um maior detalhamento do mesmo perfil.

Esse tipo de ocorrência pode ser observado, por exemplo, na Figura 53 para o ponto R-07, na qual entre 2,10 m e 3,50 m de profundidade foi identificado a ocorrência do solo “Areia média/grossa, friável, cinza escuro, claro ou bege”, e apenas esta unidade estratigráfica foi classificada nesse intervalo. Já a classificação pelo  $I_c$ , nesse mesmo intervalo de profundidade, encontraram-se cinco horizontes estratigráficos distintos, são eles: solos orgânicos, argilas a argilas siltosas, siltes argilosos a argilas siltosas, areias siltosas a siltes arenosos e areias a areias siltosas.

Além do número maior de horizontes detectados pelos ensaios CPTu, eles ainda aparecem de forma intercalada, como o solo argilas a argilas siltosas, que se

repete 4 vezes, e o solo siltes argilosos a argilas siltosas, que se repete duas vezes, apenas nesse intervalo de 1,40 m, além dos outros horizontes que apareceram uma única vez.

Outro aspecto a ser destacado, é que mesmo quando há uma semelhança na classificação do tipo de solo, a posição dos horizontes é diferente quando se compara os resultados obtidos segundo os dois métodos: DPDTS e CPTu. Além da diferença na resolução da coleta de dados, o método DPDTS provoca o efeito de compactação, deformando as amostras coletadas pela cravação contínua com *liner*. Com isso, a definição de profundidade da unidade estratigráfica descrita pelo método tátil-visual passa a ter uma incerteza importante, carregada de erro.

Como na investigação de áreas contaminadas trabalha-se com variáveis medidas em ordens de grandeza muito pequenas, como ppb, por exemplo, para as concentrações limites dos valores de intervenção estabelecidos pelos órgãos ambientais reguladores, o erro ou incerteza na escala centimétrica a métrica, seja na descrição do tipo de solo ou na posição do horizonte, é suficiente para um projeto de remediação não ter sucesso, pois todo o dimensionamento estaria baseado em dados incertos ou equivocados. Por isso, a resolução da investigação está diretamente relacionada com o nível de detalhamento no dimensionamento do projeto de remediação.

### **5.2.3 Perfis de Condutividade Hidráulica através do CPTu ( $I_c - SBT_N$ )**

Através dos valores de  $I_c$ , foram definidos perfis contínuos de condutividade hidráulica para cada ensaio CPTu realizado.

Assim como já descrito no item Material e Métodos, a condutividade hidráulica para cada horizonte de solo classificado pelo método tátil-visual foi estimada, sendo os valores de K definidos com base na Figura 9, a qual servirá apenas como uma referência de comparação para o perfil de condutividade hidráulica em alta resolução, definido a partir de  $I_c$ , calculados com base nos resultados dos ensaios CPTu, conforme mostram as Figuras 60 a 70.

Os valores de condutividade hidráulica estão apresentados em logaritmo na base 10 para facilitar sua visualização.

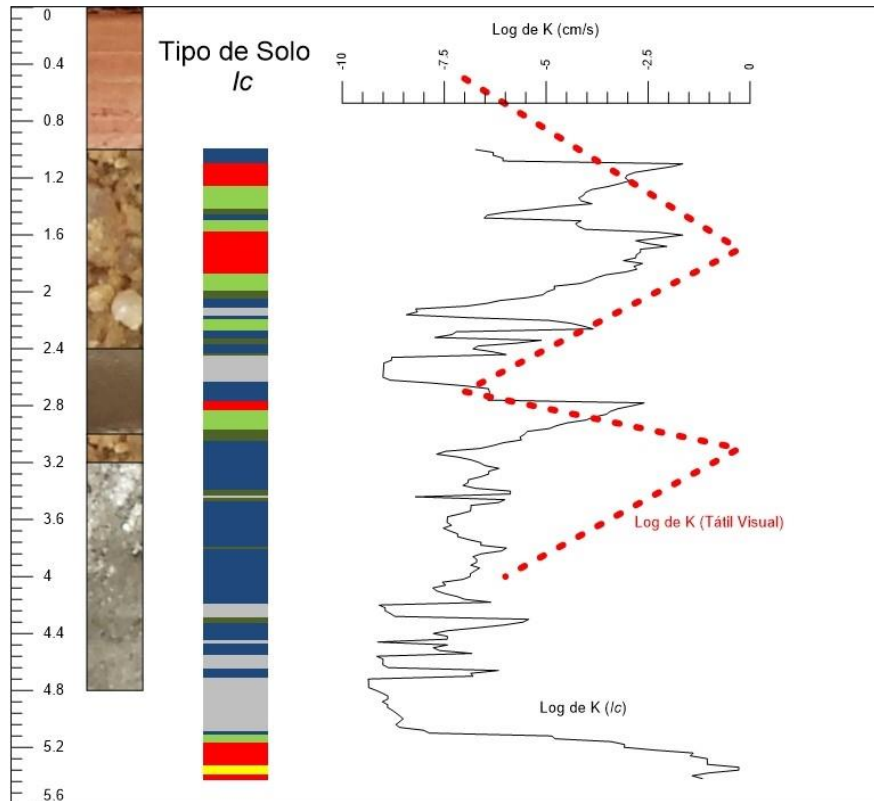


Figura 60 – Perfil de solo DPPTS, de  $l_c$  e de K do ponto R-01

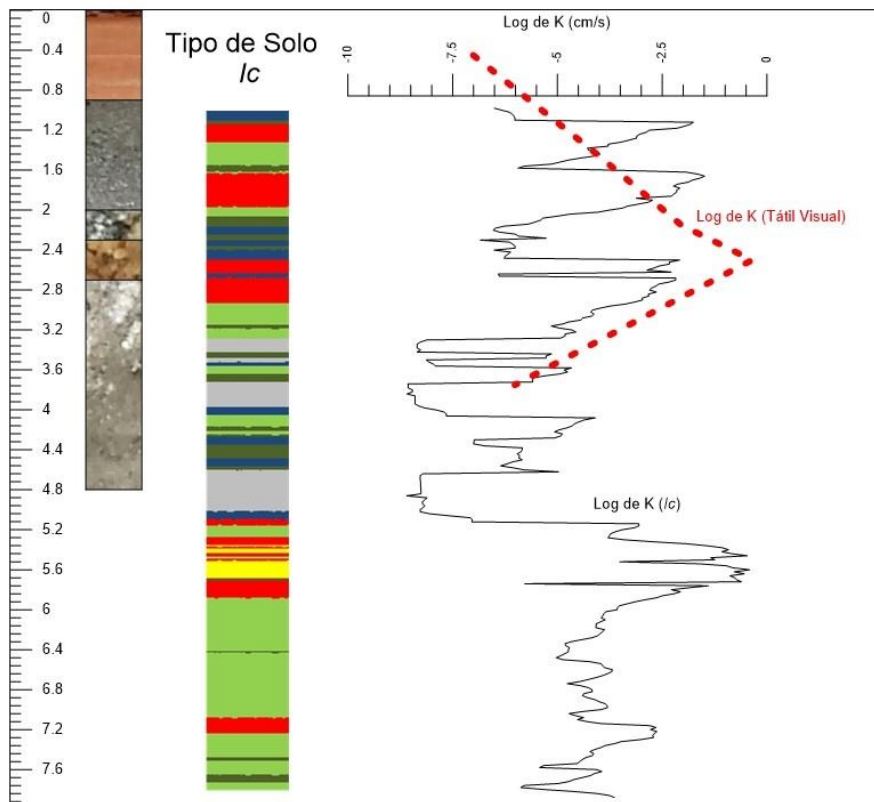


Figura 61 – Perfil de solo DPPTS, de  $l_c$  e de K do ponto R-02

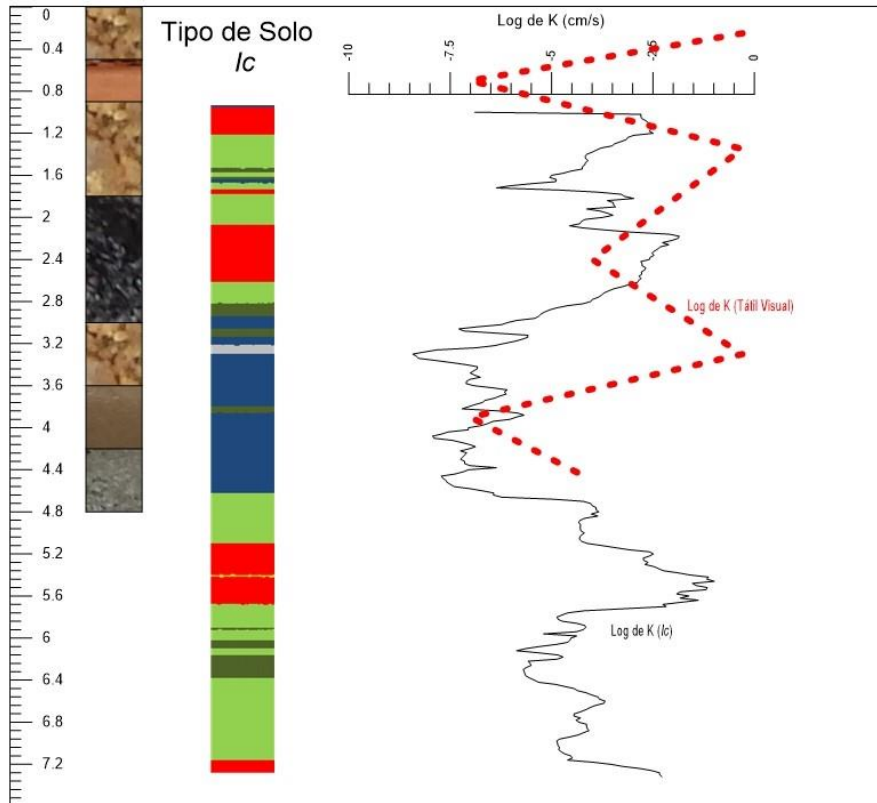


Figura 62 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de K do ponto R-03

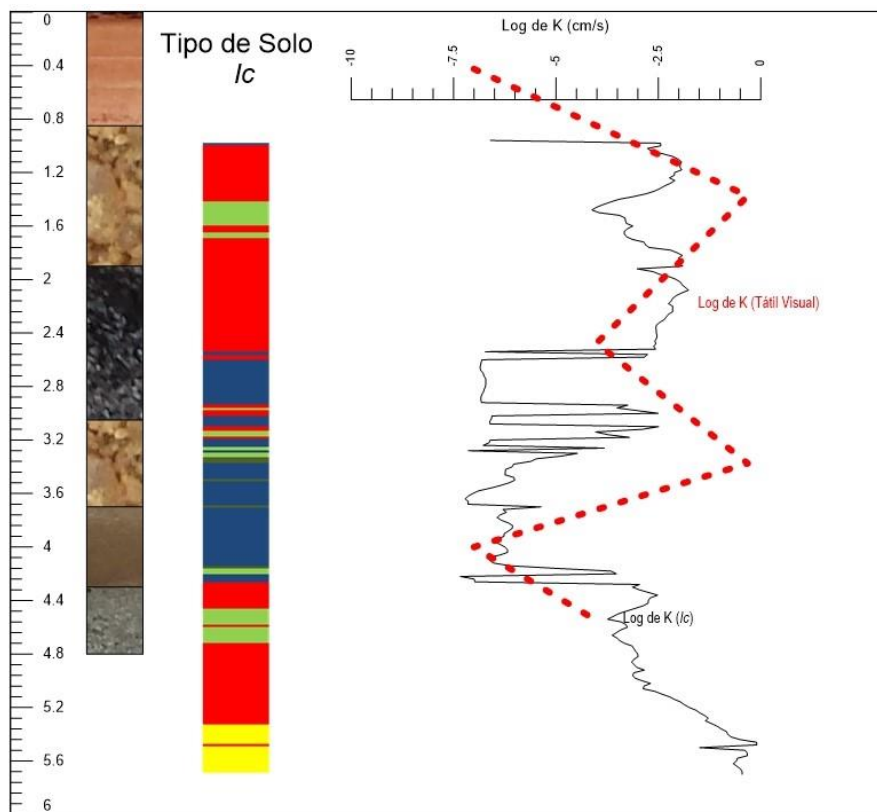


Figura 63 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de K do ponto R-04

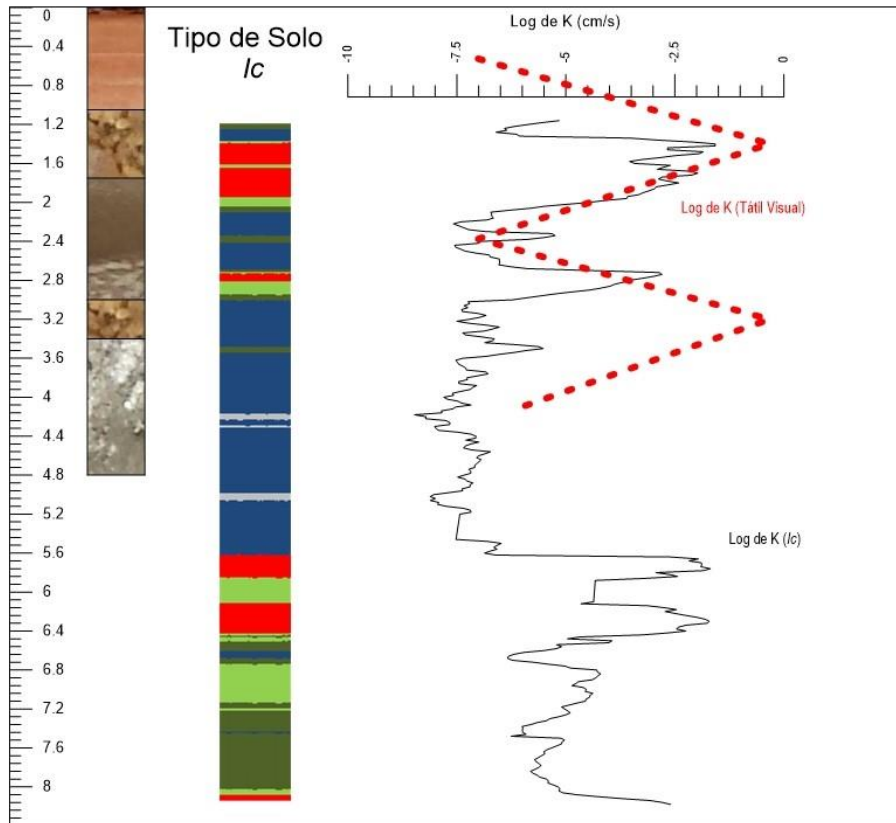


Figura 64 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de K do ponto R-05

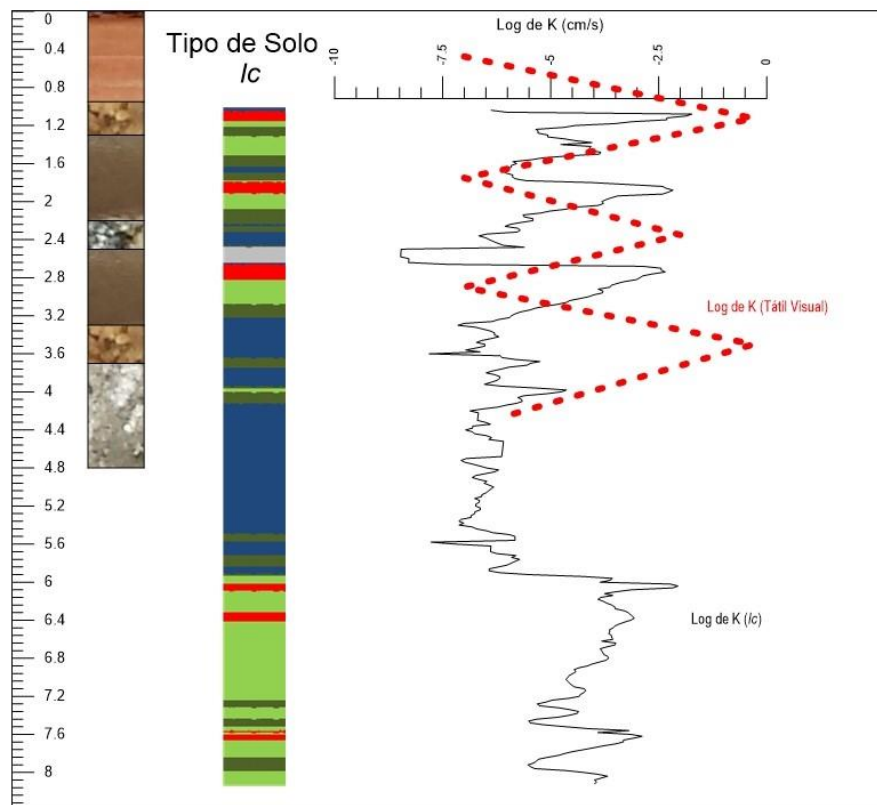


Figura 65 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de K do ponto R-06



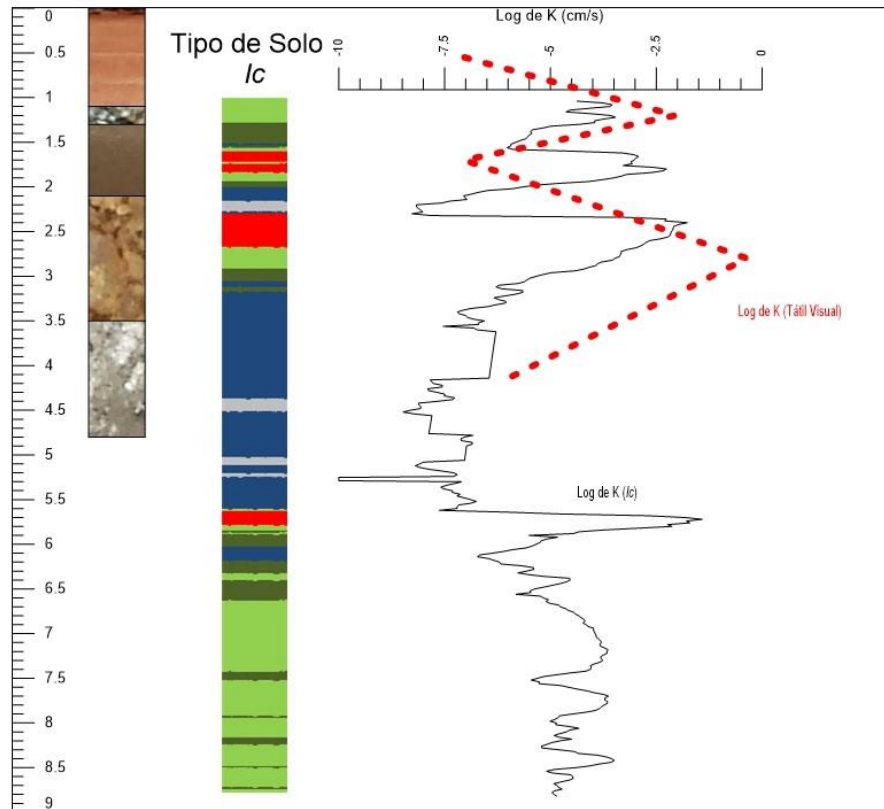


Figura 66 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de K do ponto R-07

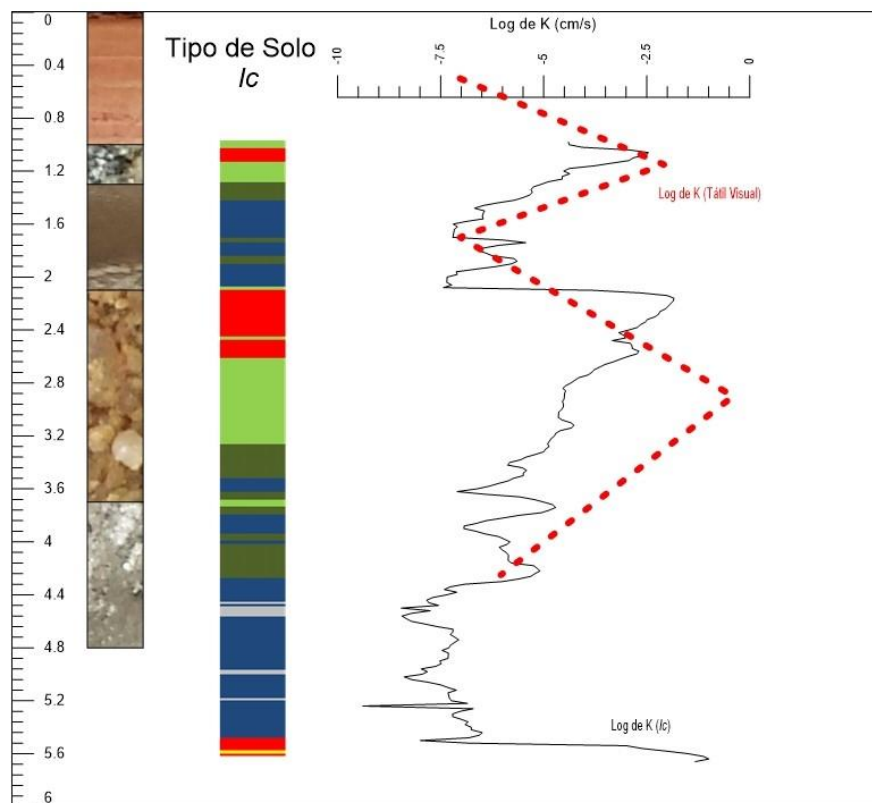


Figura 67 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de K do ponto R-08

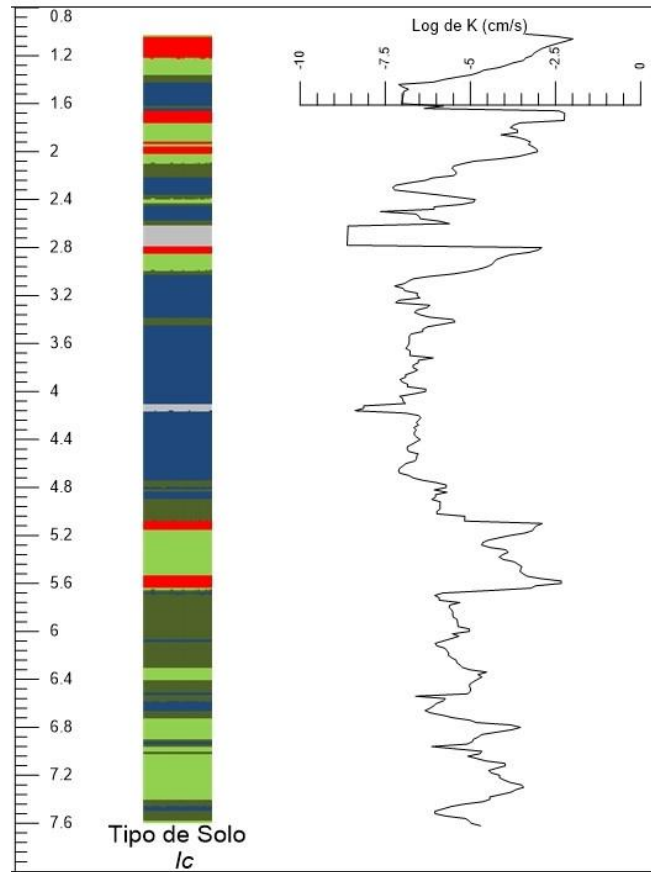


Figura 68 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de  $K$  do ponto R-09

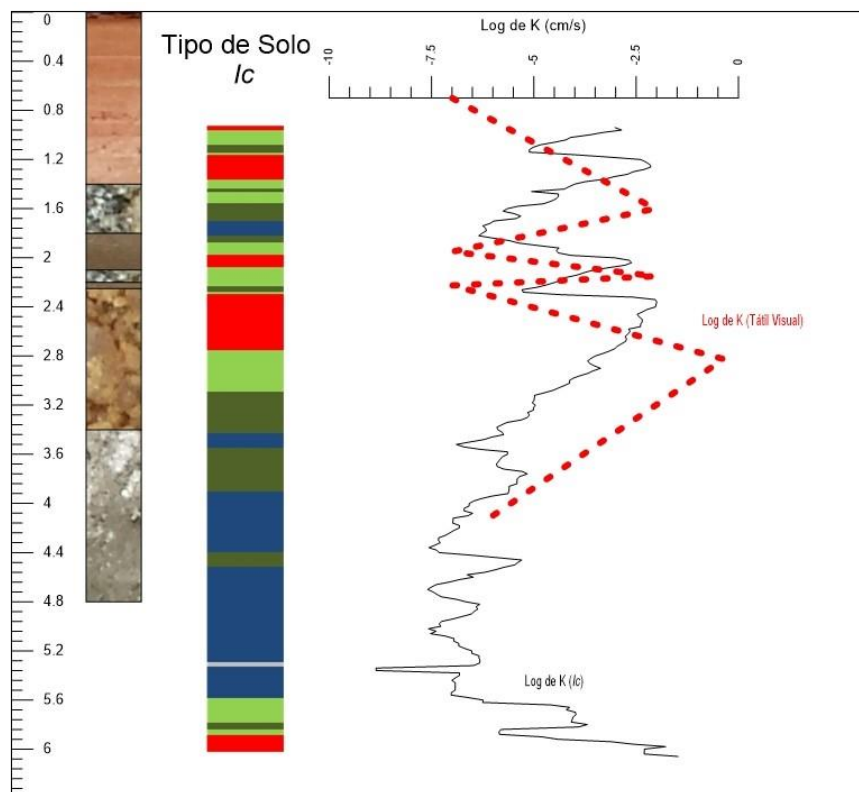


Figura 69 – Perfil de solo DPPTS, de  $I_c$  e de  $K$  do ponto R-10

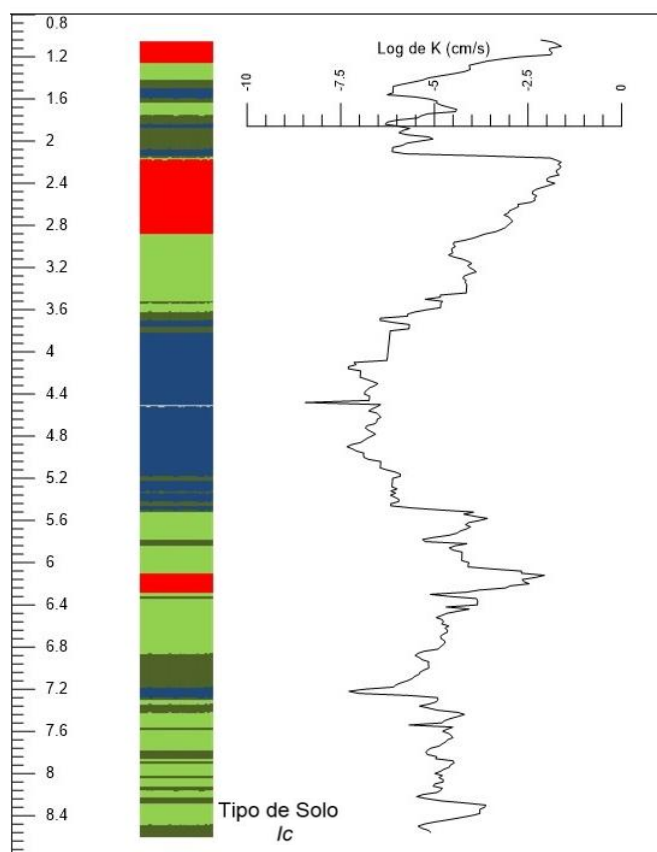


Figura 70 – Perfil de solo DPPTS, de  $l_c$  e de K do ponto R-11

Observando os perfis de  $l_c$  anteriormente discutidos, é possível ver variações elevadas na condutividade hidráulica, de até 7 ordens de grandeza, em intervalos de centímetros.

Essa variabilidade vertical é fundamental para entender onde estão posicionadas as zonas de fluxo, as quais permitem o transporte mais rápido de uma pluma de contaminação, através dos mecanismos advectivo e dispersivo.

A amostragem de solo também tem outras funções importantes na investigação e remediação de áreas contaminadas, que vão além da descrição do tipo de solo. Como exemplo, ela é fundamental para que seja feita a análise química nas etapas de confirmação ou detalhamento de uma contaminação, ensaios de bancada e testes piloto de remediação, além de amostras deformadas e indeformadas para obtenção dos índices físico-químicos do solo.

A Figura 71, mostrando o ponto R-06 como exemplo, procura destacar algumas características importantes que podem ser observadas nos resultados apresentados.

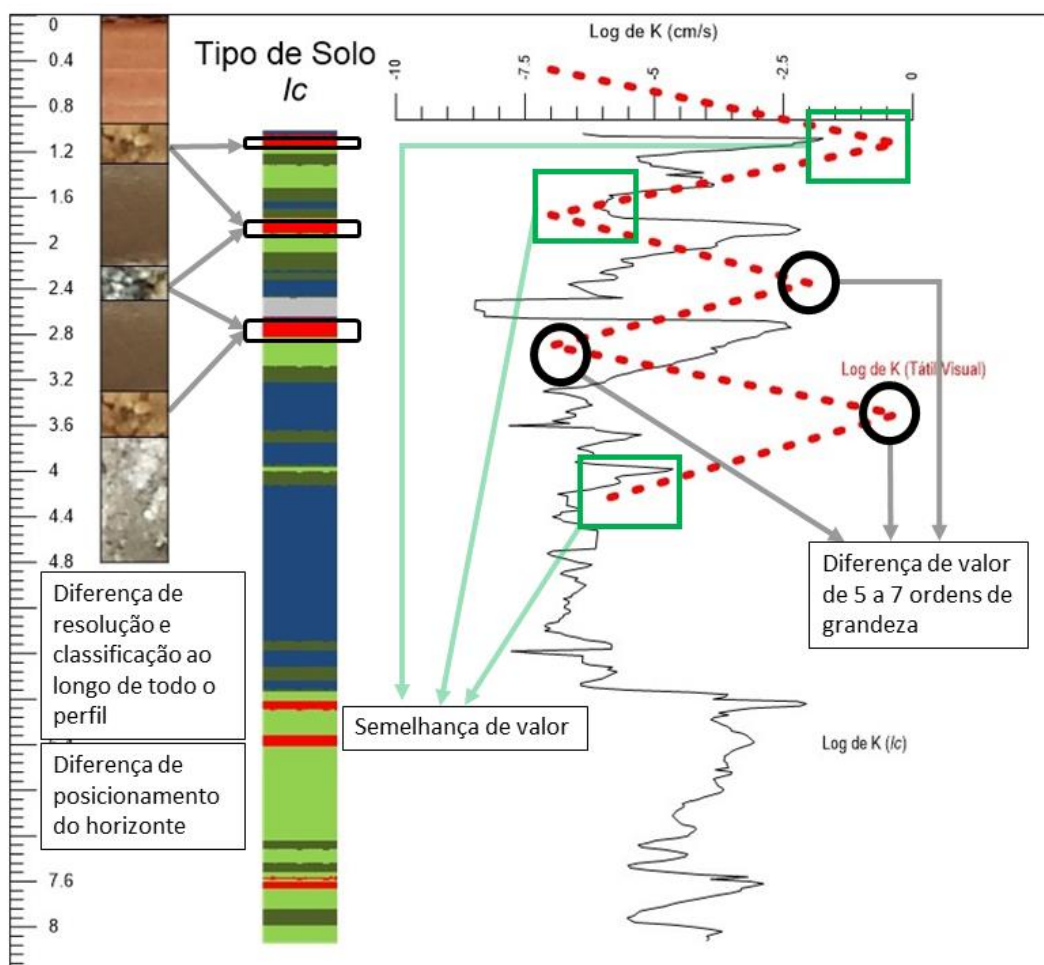


Figura 71 – Comparações entre os perfis DPDTS,  $I_c$  e K para o ponto R-06 investigado

As Figuras 72 e 73 mostram as seções hidroestratigráficas em alta resolução da Linha 01 e Linha 03, respectivamente, com a classificação do tipo de solo e variabilidade vertical da condutividade hidráulica, definidas a partir dos ensaios CPTu.

São apresentadas também, nas mesmas figuras, as seções estratigráficas elaboradas a partir da descrição tátil-visual das amostras de solo coletadas pelas sondagens DPDTS.

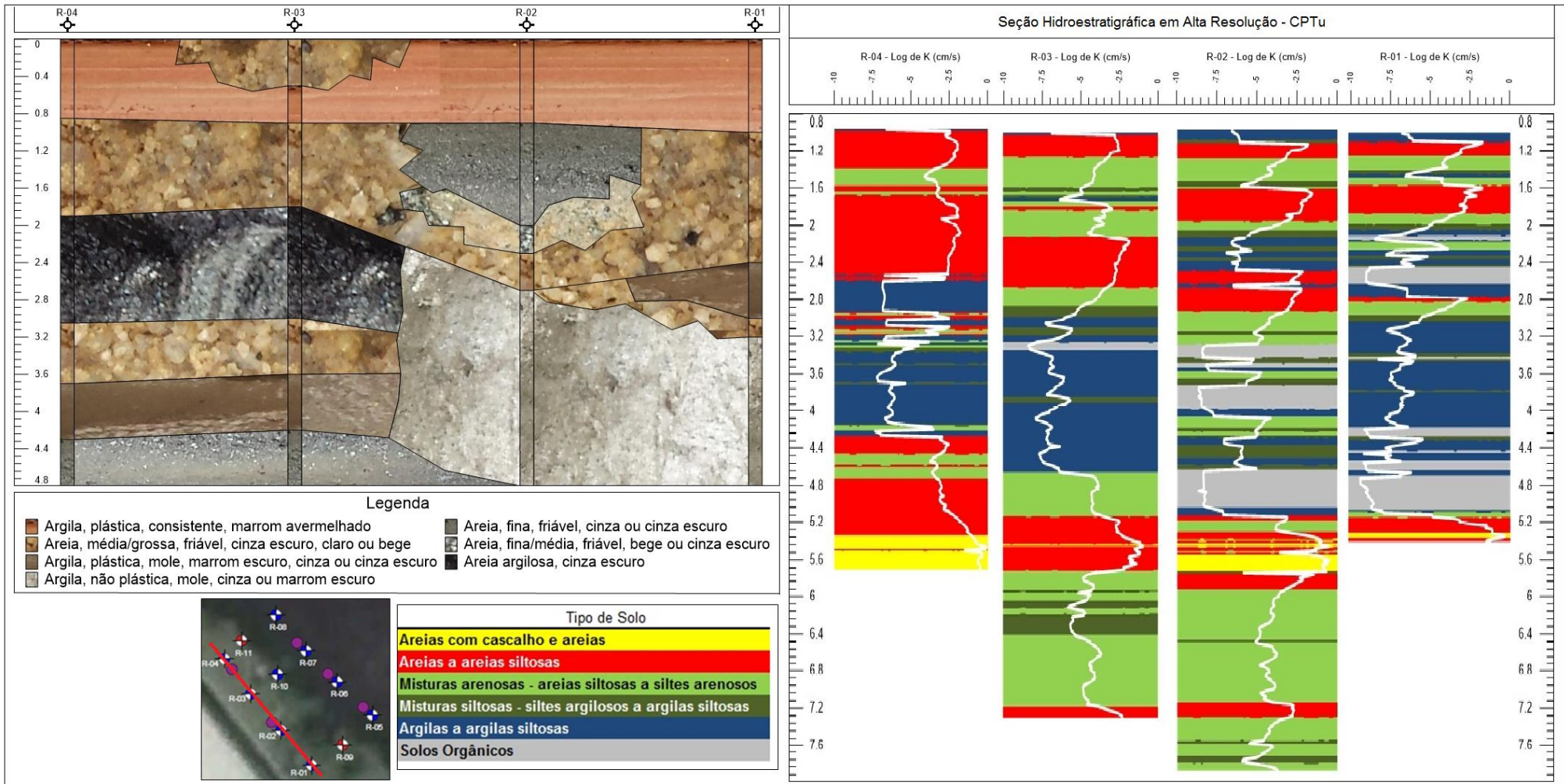


Figura 72 – Seção estratigráfica (Linha 01) obtida a partir da descrição tátil-visual e seção hidroestratigráfica em alta resolução elaborada a partir do CPTu

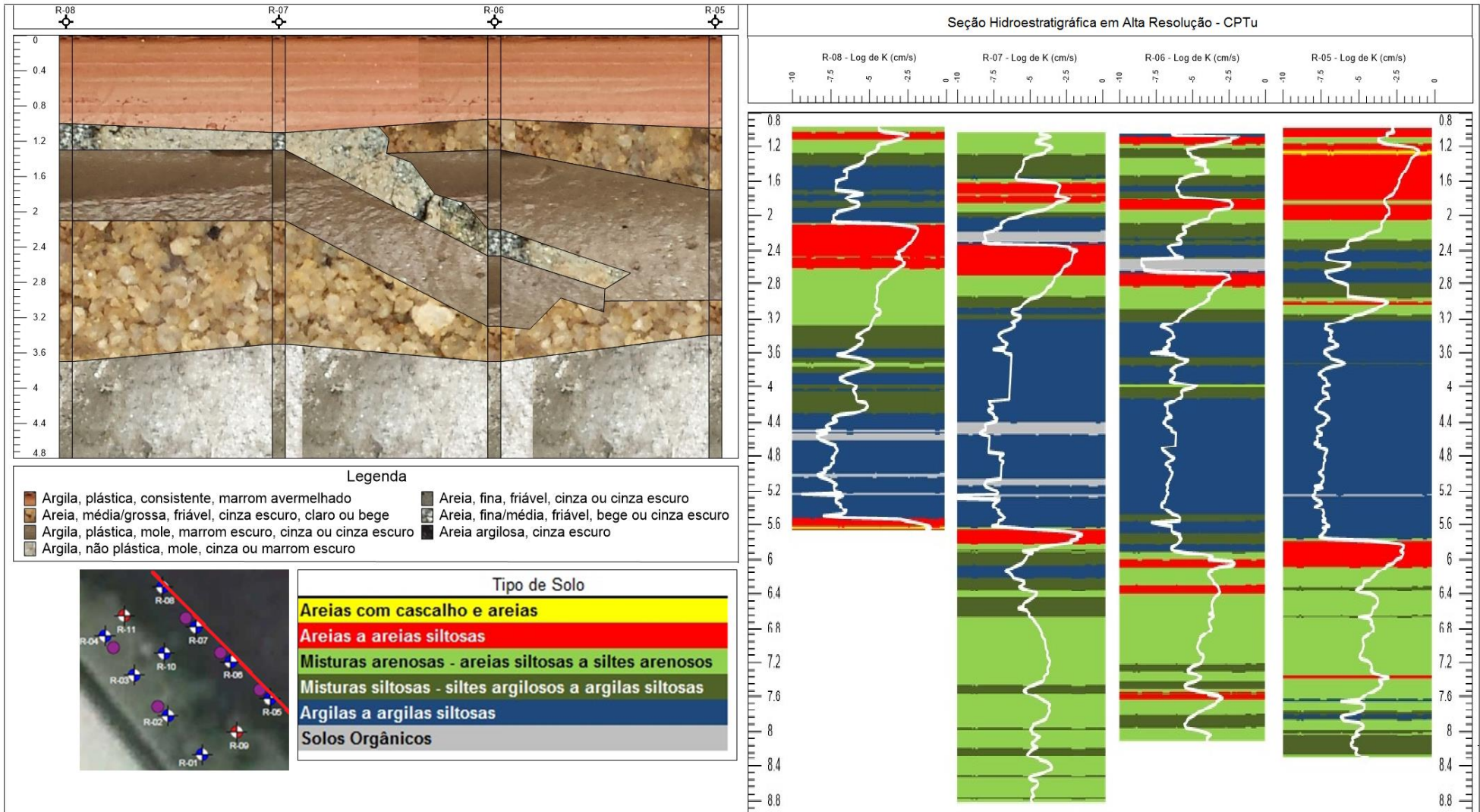


Figura 73 - Seção estratigráfica (Linha 03) obtida a partir da descrição tátil-visual e seção hidroestratigráfica em alta resolução elaborada a partir do CPTu

A identificação em alta resolução das zonas de fluxo, aliada a coleta de dados pontuais de concentrações de contaminantes, permite o cálculo do fluxo e descarga de massa, parâmetros importantes para entender quais as quantidades de massa da contaminação estão sendo transportadas, seja com foco no levantamento dos cenários de riscos à saúde humana ou ecológicos de uma área fonte para um receptor, seja para verificar ou validar a eficiência e eficácia de uma remediação.

A definição do perfil vertical da condutividade hidráulica também mostra quais são as zonas de armazenamento, aquelas de menor condutividade hidráulica, capazes de reter a contaminação, as quais podem se manter como fontes secundárias ao longo do tempo, transportando massa de contaminação de forma gradativa para a zona de fluxo mais próxima, por mecanismo difusivo de transporte, devido ao gradiente de concentração geralmente existente no contato e transição entre estas diferentes unidades hidroestratigráficas.

Para o estudo em questão, seria possível elencar e prever este tipo de comportamento tanto na seção da Linha 01, quanto da Linha 03, próximo aos 5,0 m de profundidade aproximadamente, onde se encontra uma zona de fluxo (cor vermelha) delimitada na sua parte superior por uma zona de armazenamento (cor azul).

Observa-se nos resultados apresentados que, a maioria dos perfis de condutividade hidráulica, obtidos pelo  $I_c$  e pelo DPDTS, tem valores de K discrepantes, assim como já era esperado, devido à diferença de posição dos horizontes estratigráficos e da resolução obtida com cada técnica. Contudo, alguns pontos apresentaram correlação e comportamento coerente entre os perfis de K gerados pelo CPTu e DPDTS.

Nas seções em alta resolução apresentadas, observa-se estratificação acentuada, com intercalações centimétricas entre zonas de fluxo e armazenamento, porém, os contornos principais destas zonas coincidem com a delimitação descrita dos horizontes de solo das seções DPDTS, o que indica que o método aplicado é eficiente e, embora não forneça dados em alta resolução, possibilita identificar relativamente quais são as principais zonas de fluxo e armazenamento.

### 5.2.4 Condutividade Hidráulica Pontual através do Ensaio PPDT

Além das Correlações de Pearson realizadas sobre as medidas de poro pressão do CPTu utilizando graxa e glicerina, foram selecionados 14 pares de ensaios PPDT (graxa e glicerina), portanto 28 do total de 59 ensaios realizados, a fim de correlacionar valores de  $t_{50}$  e de condutividade hidráulica pontual, sendo que para seleção destes ensaios, considerou-se os pares de ensaios em duplicata com profundidades equivalentes, após ajuste feito na seleção da população amostral e definição do mesmo tipo de solo.

Os valores de K foram apresentados em logaritmo de base 10 para facilitar sua interpretação e comparação (Tabela 12).

Tabela 12 – Valores de Log de K e  $t_{50}$  dos pares de ensaios em duplicata utilizando graxa e glicerina.

Ponto	Graxa			Glicerina		
	Prof. (m)	Log K (cm/s)	$t_{50}$ (s)	Prof. (m)	Log K (cm/s)	$t_{50}$ (s)
R-02	2,38	-5,24	62	2,29	-4,02	7
	3,42	-5,57	113	3,43	-5,33	73
	3,82	-5,10	48	3,91	-4,58	18
	4,30	-5,00	40	4,30	-4,50	16
	4,50	-5,17	54	4,50	-4,32	11
	4,84	-6,58	730	4,81	-6,43	560
R-04	3,98	-5,18	56	4,08	-4,32	11
R-05	4,54	-4,99	39	4,46	-4,57	18
	5,13	-5,03	42	5,08	-4,06	7
R-06	5,57	-6,43	551	5,58	-6,11	308
R-07	1,60	-6,05	276	1,53	-6,03	265
	4,33	-5,93	222	4,39	-4,72	24
	4,85	-5,46	94	4,88	-4,34	12
	5,26	-7,08	1.824	5,27	-7,20	2.305
Média	-	-5,63	297	-	-5,04	260

A média dos valores de Log de K e de  $t_{50}$  determinados com utilização de graxa e glicerina possui algumas diferenças, sendo que para a graxa tem-se sempre  $t_{50}$  mais elevados e, portanto, menores valores Log de K. Considerando os resultados apresentados, foi estabelecida uma correlação entre graxa e glicerina, avaliando-se o grau de relacionamento, conforme mostrado nas Figuras 74 ( $t_{50}$ ) e 75 (Log de K).



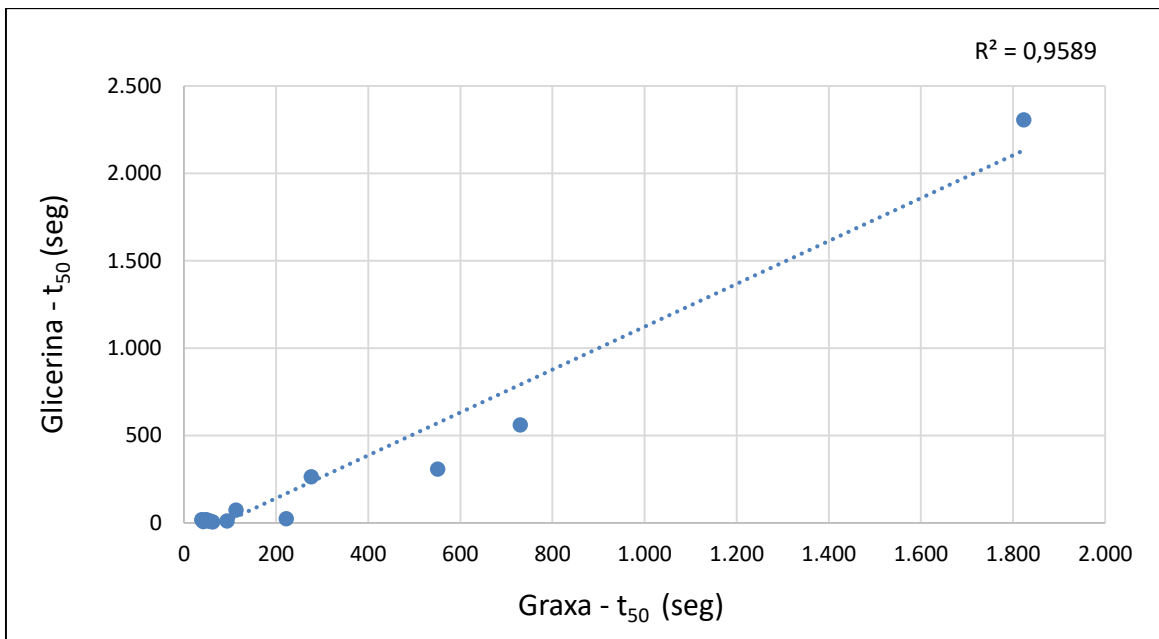


Figura 74 – Correlação para  $t_{50}$  entre graxa e glicerina.

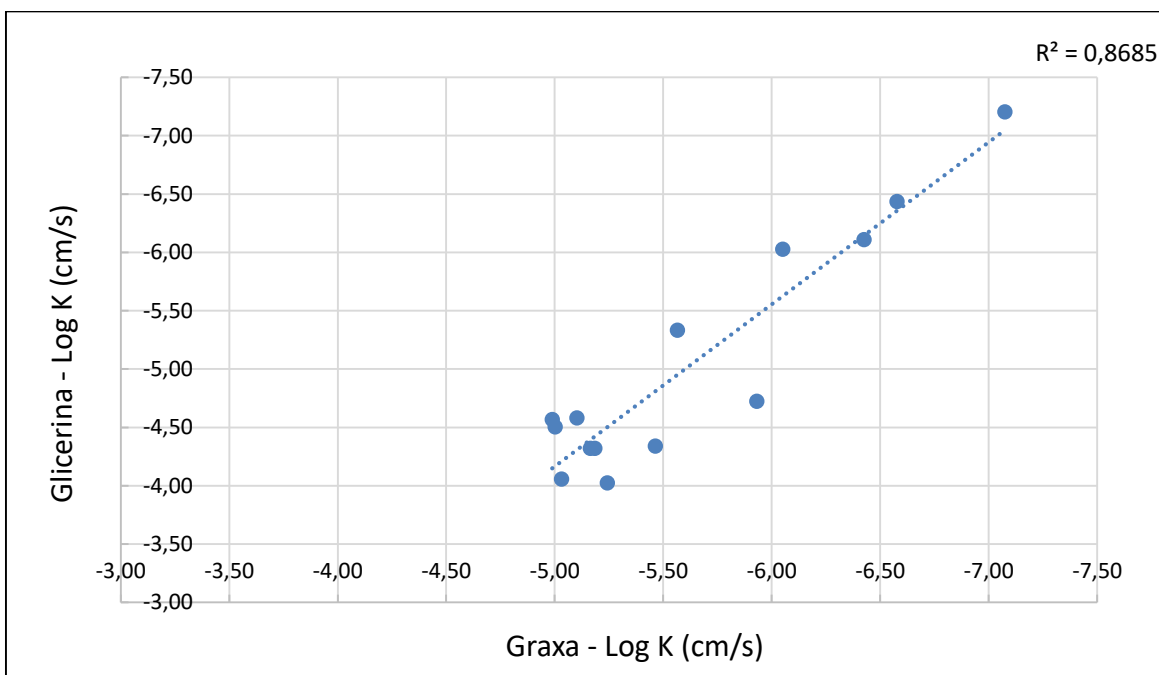


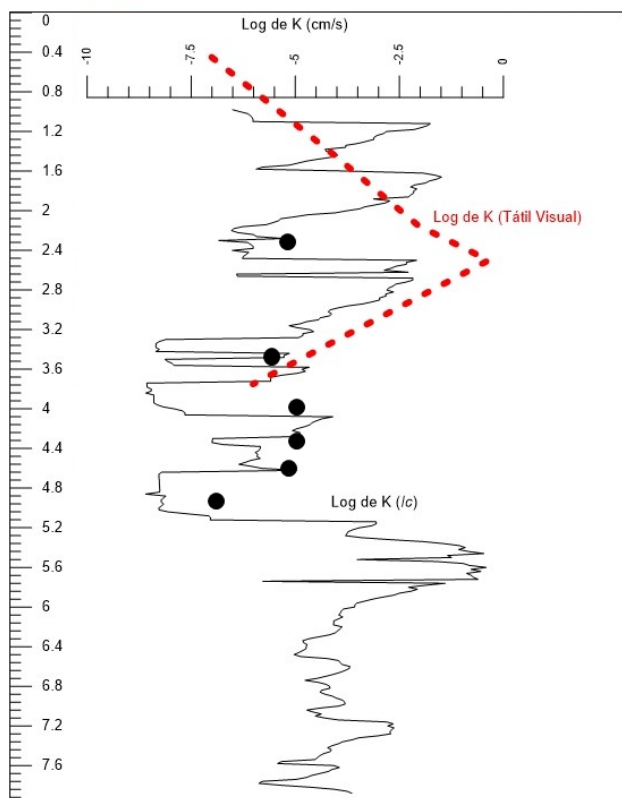
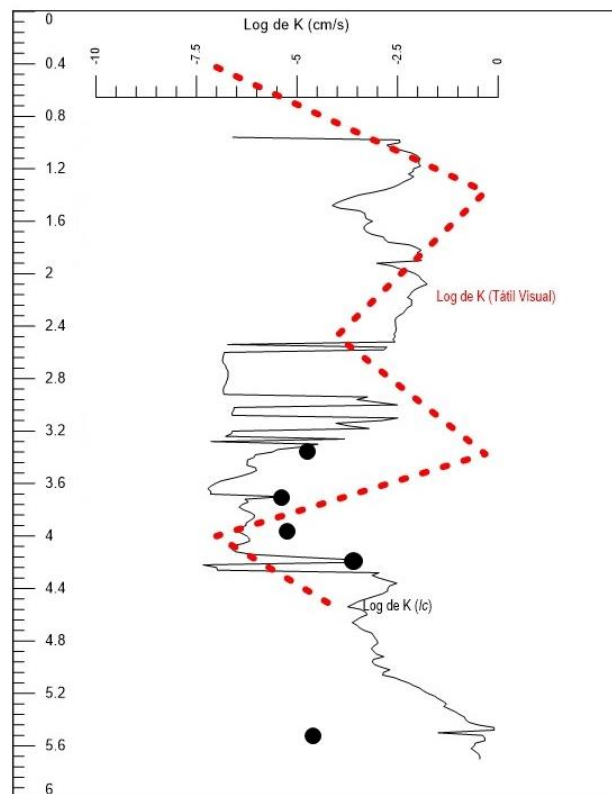
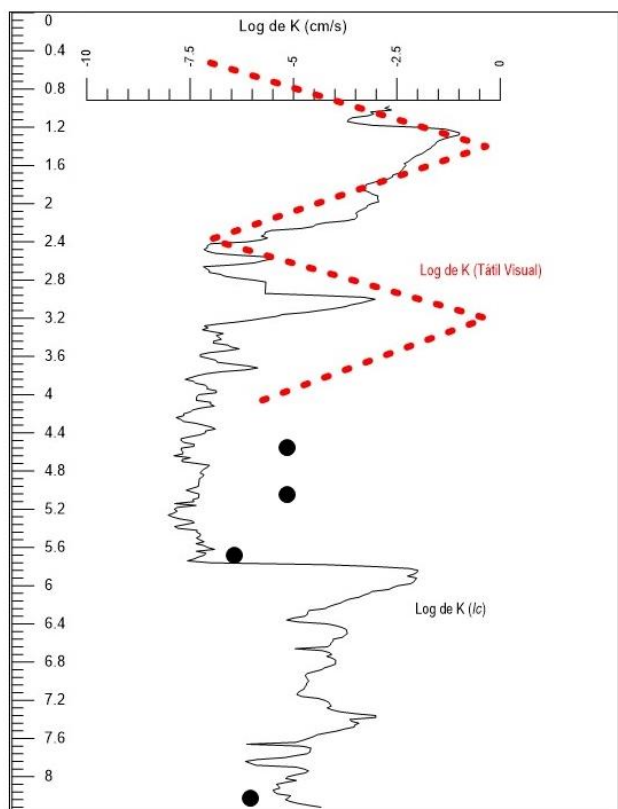
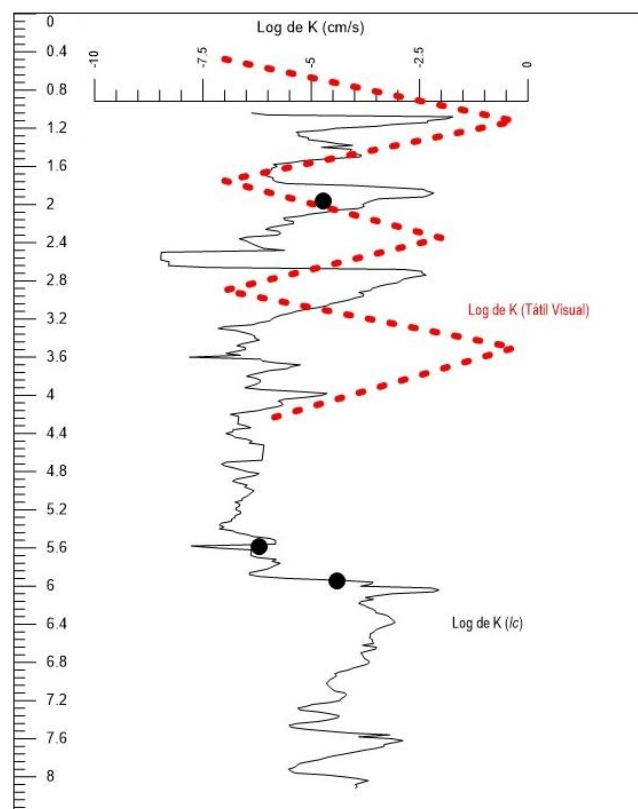
Figura 75 – Correlação para Log de K (cm/s) entre graxa e glicerina

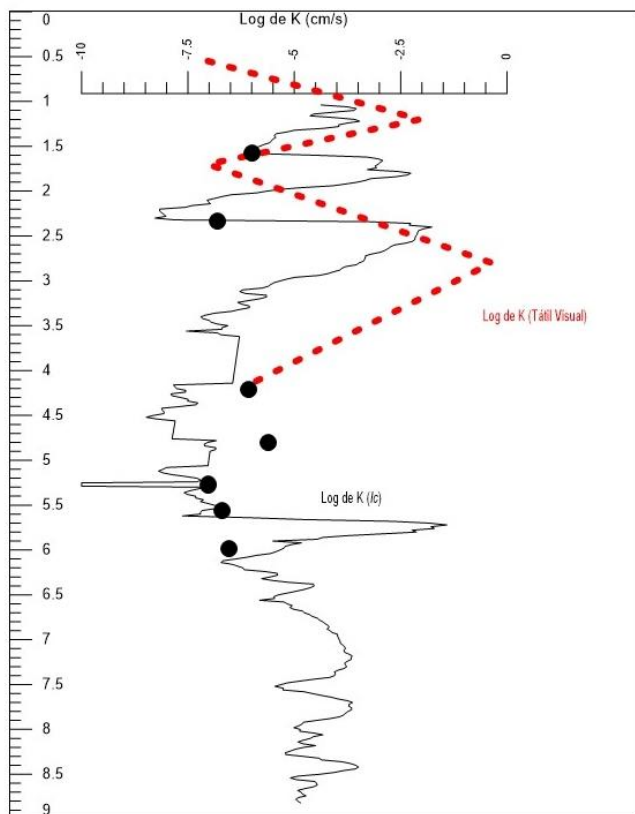
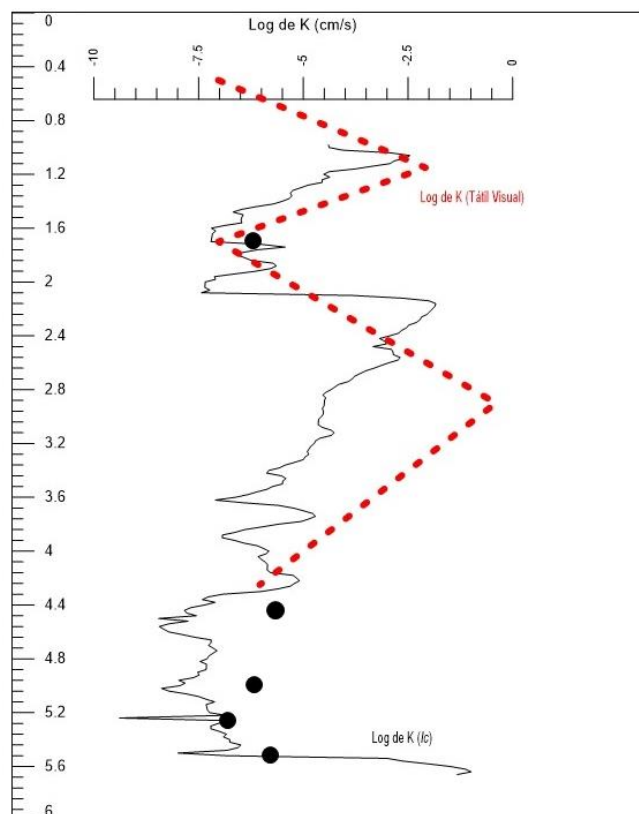
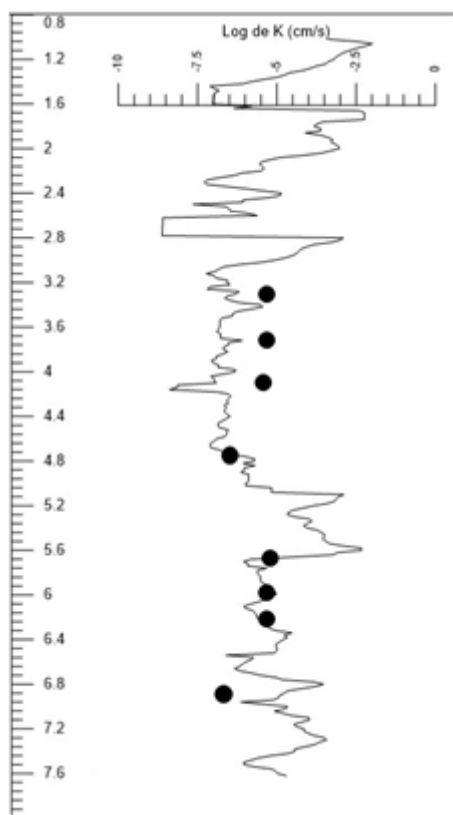
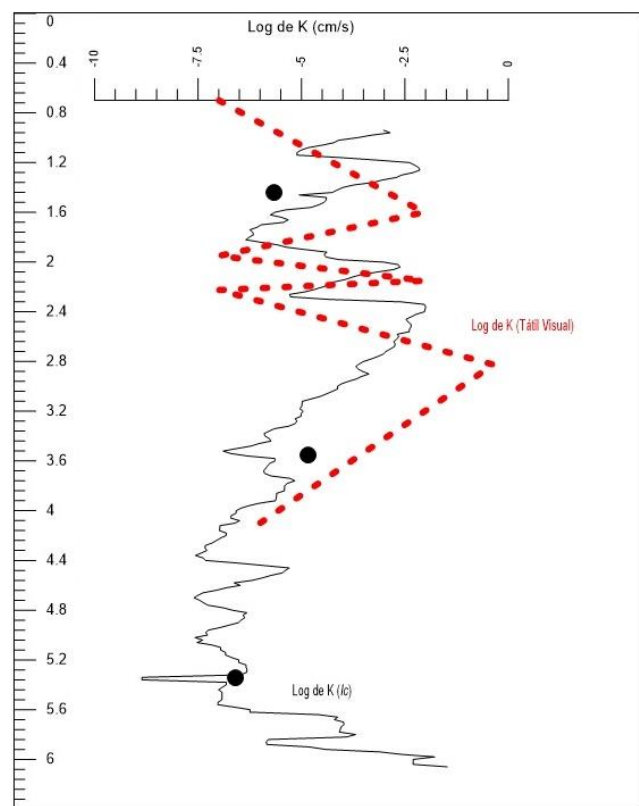
Observa-se uma forte correlação entre os valores de  $t_{50}$ , bem como uma correlação também elevada para o Log de K, porém, como essa última se trata de uma variável obtida através de outra ( $t_{50}$ ), é natural que se tenha uma menor correlação.

Os resultados apresentados indicam que ambas as técnicas, com graxa e com glicerina, responderam de forma equivalente para os ensaios comparados, conforme o tipo de solo encontrado no momento da dissipação de poro pressão. Ressalta-se ainda que, assim como previamente apresentado, há uma influência direta da heterogeneidade do meio nesse tipo de análise, pela distância entre os pares de ensaios comparados, porém, mesmo assim, foi possível constatar uma excelente correlação entre os dados obtidos.

Foram realizados 42 ensaios PPDT, e cada um deles forneceu um valor de condutividade hidráulica pontual, calculada a partir do valor de  $t_{50}$ , conforme Equação 7.

As Figuras 76 a 78 mostram a condutividade hidráulica pontual em conjunto com os perfis contínuos de K definidos a partir do perfil de  $l_c$ , representada pelos pontos pretos, a fim de se fazer uma comparação entre ambos.

a) R-02 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tátil-visual e K pontualb) R-04 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tátil-visual e K pontualc) R-05 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tátil-visual e K pontuald) R-06 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tátil-visual e K pontualFigura 76 – Comparação entre K pontual obtido pelos PPDT e perfil de K contínuo pelo  $I_c$

a) R-07 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tático-visual e K pontualb) R-08 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tático-visual e K pontualc) R-09 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tático-visual e K pontuald) R-10 - Perfil de K pelo  $I_c$  e tático-visual e K pontualFigura 77 - Comparação entre K pontual obtido pelos PPDT e perfil de K contínuo pelo  $I_c$

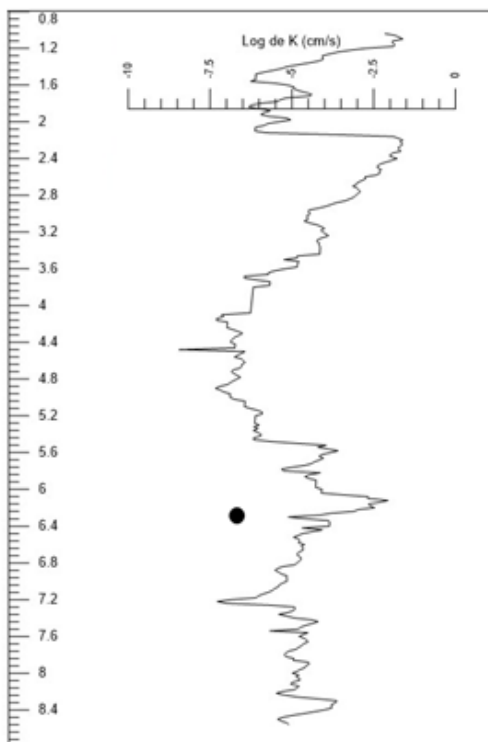


Figura 78 – R-11 - Comparação entre K pontual determinado pelo PPDT e perfil de K contínuo pelo  $l_c$

Através dos resultados apresentados é possível notar que as condutividades hidráulicas pontuais, calculadas empregando o método de Parez e Fauriel (1988), em quase sua totalidade, encontram-se entre  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$  cm/s, denotado pelo posicionamento dos pontos pretos, agrupados ao centro de cada figura, portanto, apresentaram pouca variação.

O perfil do subsolo local possui elevada heterogeneidade, conforme demonstrado pelas amostras DPDTs, classificação do tipo de solo através do  $l_c$  e estimativa de K, também através do  $l_c$ .

No método de Parez e Fauriel (1988), através do ensaio PPDT, K é calculado a partir de  $t_{50}$ , por isso, é necessário que haja excesso de poro pressão para que se tenha um valor para  $t_{50}$  e, conseqüentemente, para a condutividade hidráulica.

A penetração da ponteira do piezocone em solos arenosos geram pouco ou praticamente nenhum excesso de poro pressão, devido sua elevada permeabilidade, tendo então uma dissipação mais rápida do que siltes e argilas, portanto, a aplicação deste método para areias não é representativo.

Valores de  $t_{50}$  entre 35 e 15 segundos, pela Equação 7, levam a valores de K na ordem de  $10^{-5}$  cm/s, ou seja, este método de fato não se aplica a solos de

elevada permeabilidade, como areais e cascalhos, cujos valores de  $K$  estão entre  $10^{-3}$  a  $10^2$  cm/s.

Perfis hidroestratigráficos com grande variabilidade no tipo de solo, assim como encontrado na área investigada, dificultam a identificação do momento ideal para iniciar o PPDT, pois a heterogeneidade às vezes é centimétrica, dificultando definir exatamente o início do ensaio em um horizonte adequado, onde se tem um bom registro do excesso de poro pressão.

De modo geral, as condutividades hidráulicas pontuais tiveram uma boa correlação com os valores estimados de  $K$  a partir do perfil de  $l_c$ . O local investigado não apresentou poro pressão elevada, com valores máximos próximos de 150 KPa, conseqüentemente, pouco excesso de poro pressão, com valores de  $t_{50}$  baixos, média de 300 segundos para os ensaios com graxa e 200 segundos para glicerina.

O principal benefício em calcular a condutividade hidráulica pontual através da Equação 7 é obter de fato um dado quantitativo pontual, e não uma média ponderada dos valores de  $K$  como ocorre nos ensaios tipo *Slug* ou *Bail Tests*, os quais dependem do tamanho da seção filtrante do poço de monitoramento, que em geral varia de 1,0 m a 3,0 m, comunicando várias unidades estratigráficas.

Ressalta-se que o modelo aplicado possui maior representatividade quanto maior for o excesso de poro pressão.

Já o perfil contínuo de condutividade hidráulica através de  $l_c$  permite mapear verticalmente as variações de  $K$  em microescala (cm), acompanhando o comportamento da heterogeneidade hidrogeológica. A utilização dos dois modelos, por possuírem métodos e objetivos totalmente diferentes, ajuda a identificar anomalias e evitar interpretação equivocada.

## 6 CONCLUSÕES

- Devido à heterogeneidade do meio investigado, característico de planícies aluvionares, com nível d'água do aquífero poroso livre em torno de 0,80 m de profundidade, a execução de sondagens DPDTS foi fundamental para coletar as amostras de solo, uma vez que permitiu que a parede do furo de sondagem permanecesse revestida durante sua execução, impedindo o seu colapso e garantindo a coleta de amostras representativas, sem a mistura de diversos horizontes;
- Foi possível definir o perfil estratigráfico inicial da área através da descrição tátil-visual das amostras DPDTS, sendo apresentados 07 horizontes principais de solo distintos, os quais variaram entre zonas de fluxo e armazenamento até os 4,80 m, que foi a profundidade máxima alcançada;
- Os ensaios de caracterização dos solos em laboratório serviram para verificar se a descrição tátil-visual de campo estava coerente. Constatou-se que algumas das pequenas diferenças observadas se referiram às classificações texturais entre areia fina e média e entre argila e silte, mas que de um modo geral, os resultados convergiram, validando a descrição tátil-visual do solo realizada em campo;
- A profundidade de avanço dos ensaios CPTu foi maior do que a das sondagens DPDTS, e em alguns pontos chegou a uma diferença de 4,0 m;
- Os ensaios CPTu permitiram a identificação de perfis e seções hidroestratigráficas em alta resolução, através do índice  $I_c$ , mostrando a posição exata das zonas de fluxo e armazenamento presentes no subsolo;
- As principais diferenças entre o CPTu e DPDTS para identificação da hidroestratigrafia estão relacionadas à resolução. O ensaio CPTu identificou horizontes em escala centimétrica, o que não foi possível de ser realizado por meio da descrição tátil-visual das amostras coletadas pelas sondagens DPDTS, com grande intercalação desses horizontes, às vezes, dentro de uma única classificação de solo definida pela descrição tátil-visual;
- A comparação entre os registros de poro-pressão do piezocone por meio de graxa e glicerina mostrou que existe uma correlação de intensidade forte entre essas duas técnicas de medida, da mesma maneira foi constatada forte

correlação entre os valores de  $t_{50}$  e de condutividade hidráulica (K) pontual para a utilização de graxa e glicerina, determinados por meio dos ensaios de dissipação de poro pressão (PPDT). Sendo assim, a correlação mostrou que os valores de poro pressão,  $t_{50}$  e K podem ser obtidos e ajustados tanto pela utilização de graxa, quanto de glicerina, um a partir do outro.

- Os perfis contínuos de condutividade hidráulica elaborados a partir do  $I_c$ , indicaram a elevada variabilidade vertical de K, com diferenças de até 7 ordens de grandeza, em escala centimétrica;
- Os perfis contínuos de K possibilitaram elaborar seções hidroestratigráficas, com heterogeneidades hidrogeológicas em nível de detalhe, indicando a posição das zonas de fluxo e armazenamento;
- Na área investigada o excesso de poro pressão gerado com a cravação do piezocone não foi elevado, e os valores de  $t_{50}$  dos ensaios PPDT foram baixos, com valor médio de 300 segundos para os ensaios com graxa e 200 segundos para glicerina.
- De uma maneira geral, as condutividades hidráulicas pontuais determinadas a partir dos ensaios PPDT foram da mesma ordem de grandeza que os valores estimados de K através do  $I_c$ .
- Como os modelos para estimativa da condutividade hidráulica, pontual (PPDT) e contínua ( $I_c$ ), são diferentes, e tem finalidades distintas, podem ser empregados de forma integrada, auxiliando na identificação de heterogeneidades hidrogeológicas.



## 7 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Em continuidade a este estudo, sugere-se empregar outras formas de medida da condutividade hidráulica, a fim de avaliar a aplicabilidade dos métodos de investigação do meio físico. Alguns exemplos de métodos que poderiam ser utilizados são:

- *Direct Push Slug Test* (DPST) nas zonas de fluxo identificadas, para obtenção dos valores de K e posterior comparação aos perfis obtidos pelo  $l_c$ ;
- *Slug* ou *Bail tests* em poços pré-montados ou tradicionais, porém, de seções filtrantes discretas, com zona alvo de monitoramento pontual (máximo de 5,0 cm), para obtenção e comparação dos valores de K;
- Métodos de injeção de fluido sob pressão para obtenção dos perfis de K, como: *Hydraulic Profile Tool* (HPT), *Direct Push Injection Logging* (DPIL) e *Waterloo APS*;
- Com intenção de medir e comparar as incertezas, realizar *Slug* ou *Bail Tests* em poços tradicionais, com seções filtrantes longas (1,0 a 3,0 m), instaladas em posições variadas, interceptando diversas unidades estratigráficas identificadas nesse estudo e também posicionadas em apenas um único horizonte, caso isso seja possível.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D3441**: Standard test method for mechanical cone penetration tests of soil. West Conshohocken, 1998. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D6067**: Standard practice for using the electronic piezocone penetrometer tests for environmental site characterization. West Conshohocken, 2010. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D6282/ D6282M**: Standard guide for direct push soil sampling for environmental site characterizations. West Conshohocken, 2014. 20 p.

AQUINO NETO, V. **Técnicas de Investigação Ambiental**. Apresentação da disciplina “Técnicas de investigação” do curso de pós-graduação em Gerenciamento de Áreas Contaminadas do SENAC-SP. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: 2016: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: 2016: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: 1995: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: 2016: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: 2016: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: 2016: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250**: 1982: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15495**: 2007: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - Parte 1: Projeto e construção. Rio de Janeiro, 2007. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16210**: 2013: Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas. Rio de Janeiro, 2013. 4 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: CETESB, 1999.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decisão de Diretoria DD 038/2017/C**. São Paulo: CETESB, 2017.

CLEARY, R. **Águas Subterrâneas**. Porto Alegre: ABRH, 1989. 117 p. Disponível em <[http://www.clean.com.br/Menu\\_Artigos/cleary.pdf](http://www.clean.com.br/Menu_Artigos/cleary.pdf)>. Acesso em 16 jan. 2017.

CLEARY, R. Por que a maioria dos sistemas de remediação falha? In: **Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo (CIMAS), I**. São Paulo, 2009.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale: Erlbaum, 1988. p. 20-26.

CRUMBLING, D. 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>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

MONDELLI, G.; De MIO, G.; GIACHETI, H. L.; HOWIE, J. A. The use of slot filter in piezocone tests for site characterization of tropical soils. In: 17 th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, IOS Press - Milpress, 2009. v. 2. p. 973-976.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; INSTITUTO GEOLÓGICO. **Projeto Jurubatuba: restrição e controle de uso de água subterrânea.** São Paulo: DAEE/IG, 2009.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows.** Porto Alegre: Artmed, 2006.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology.** 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 598 p.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; JUNIOR, J. A. S. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje-ISSN: 0104-7094,** v. 18, n. 1, 2010.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J.A. **Groundwater.** New Jersey: Prentice-Hall, 1979. 604 p.

FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Plano de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.** São Paulo: FUSP. Caderno Técnico Institucional, 2002.

GIACHETI, H. L.; PEIXOTO, A. S. P.; De MIO, G.; HAMADA, J.; ELIS, V. R. Investigação geoambiental Utilizando a Tecnologia do Piezocone: Primeiros Resultados de sua Aplicação no Brasil. In: XXVIII In: **Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,** AIDIS, Cancun. 2002. p. 1-10.

GIACHETI, H. L. **Os ensaios de campo na investigação do subsolo**: estudos e considerações quanto à aplicação em solos tropicais. 2001. 299 p. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2001.

GILLHAM, R. W. et al. An advection-diffusion concept for solute transport in heterogeneous unconsolidated geological deposits. **Water Resources Research** **20**, n. 3, 369-378, Jan. 1984.

GOOGLE. Google Earth Pro. Version 7.1.7.2606. 2017. Centro Universitário SENAC - Santo Amaro. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

GUILBEAULT, M. A.; PARKER, B. L.; CHERRY, J. A. Mass and flux distributions from DNAPL zones in sandy aquifers. **Ground Water**, v. 43, n. 1, p. 70-86, 2005.

HADLEY, P. W.; NEWELL, C. J. Groundwater remediation: The next 30 years. **Ground Water**, v. 50, n. 5, p. 669-678, 2012.

JEFFERIES, M.G., DAVIES, M.P., Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, v. 16, n. 4, pp. 458-468, 1993.

KAYO, A. **Impactos gerados pela ocupação no leito antigo do Rio Pinheiros em áreas de Operações Urbanas Consorciadas Faria Lima e Águas Espraiadas**. 2013. 154f. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2013.

KRAM, M. L. et al. **Detailed hydraulic assessment using a high-resolution piezocone coupled to the GeoVIS**: Technical Report TR2291-ENV. NAVFAC: Port Hueneme, 2008. 70 p.

LARSON, R . Use of a thin slot as filter in piezocone tests. **Proceedings CPT'95**, V. 2, pp.35-40, 1995.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K.; POWELL, J. **Cone penetration test in geotechnical practice**. London: Blackie Academic Professional, 1997, 311 p.

MCCALL, W.; CHRISTY, T. M.; EVALD, M. K. Applying the HPT-GWS for hydrostratigraphy, water quality and aquifer recharge investigations. **Groundwater Monitoring & Remediation**, 2016.

MCGUIRE, T. M. et al. Evaluation of long-term performance and sustained treatment at enhanced anaerobic bioremediation sites. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 36, n. 2, p. 32-44, 2016.

MEIGH, A.C. **Cone penetration testing: methods and interpretation**, London: Butterworth-Heinemann, 1987. 156 p.

MONTEIRO, M.D.; GURGUEIRA, M.D.; ROCHA, H.C. Geologia da região metropolitana de São Paulo. In: **Seminário Twin Cities: Solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba**, 1. ABMS: São Paulo, 2012. p. 15-43.

MOREIRA, D. A. **Levantamentos amostrais**. São Paulo: FECAP, 2001.

PAREZ, L.; R. FAURIEL. Le piezocone ameliorations apportees a la reconnaissance de sols. **Revue Francaise de Geotech**, Paris, n. 44, p. 13-27, 1988.

PARKER, B.L; CHAPMAN, S.W.; GUILBEAU, M.A. Plume persistence caused by back diffusion from thin clay layers in a sand aquifer following TCE source-zone hydraulic isolation. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 102, n. 1, p. 86-104, 2008.

PARKER, J.C.; PARK, E.; TANG, G. Dissolved plume attenuation with DNAPL source remediation, aqueous decay and volatilization—Analytical solution, model calibration and prediction uncertainty. **Journal of contaminant hydrology**, v. 102, n. 1, p. 61-71, 2008.

PAYNE, F.; QUINNAN, J.; POTTER, S. **Remediation hydraulics**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2008. 416 p.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba – SP (Escala 1:100.000)**: Estudos de Aspectos Metodológicos de Caracterização e de Apresentação de Atributos. 1992. v. 1. p. 1-224. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; São Carlos, 1992.

PITKIN, S. et al. Field demonstrations using the Waterloo ground water profiler. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 19, n. 2, p. 122-131, 1999.

PITKIN, S. et al. Reduction of thermal treatment volume through the application of HRSC at superfund site. In: **9th International Conference on Remediation of Recalcitrant Compounds**. Monterey, 2014.

QUINNAN, J.A.; WELTY, N.R.H.; KILLEMBECK, E. Hydrostratigraphic and permeability profiling for groundwater remediation projects. In: **2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10)**. Huntington Beach: 2010. p. 9-11.

RIYIS, M. T. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução**. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

RIYIS, M. T. **Investigação geoambiental e instalação de poços de monitoramento**. Nazaré Paulista: ABAS, 2015.

RIYIS, M. T. et al. Investigação geoambiental de áreas contaminadas com elaboração do modelo conceitual em campo utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC). **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**, v. 3, p. 125-137, 2013.

ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, n. 1, p. 151-158, 1990.

ROBERTSON, P.K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 6, p. 842-853, 2009.

ROBERTSON, P.K. Soil behaviour type from the CPT: an update. In: **2<sup>nd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10)**. Huntington Beach: 2010.

ROBERTSON, P. K. et al. Use of piezometer cone data. In: **Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering**. ASCE, 1986. p. 1263-1280.

ROBERTSON, P.K.; CABAL, K.L. **Guide to cone penetration testing for geoenvironmental engineering**. 6. ed. Signal Hill: Gregg Drilling & Testing, 2015. 84 p.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. Interpretation of cone penetration tests: sands and clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 20, n.4, p. 719-745, 1983.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. **Guidelines for use, interpretation and application of the CPT and CPTU**. 3. ed. Vancouver: University of British Columbia. Department of Civil Engineering, 1986. 197 p.

ROBERTSON, P. K.; WRIDE, C. E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 35, n. 3, p. 442-459, 1998.



SAINT-GERMAIN, R. et al. Dye based laser-induced fluorescence sensing of chlorinated solvent DNAPLs. In: **3rd International Symposium on Cone Penetration Testing**. Las Vegas: 2014. Paper 1-14.

SALE, T. C.; MCWHORTER, D. B. Steady state mass transfer from single-component dense nonaqueous phase liquids in uniform flow fields. **Water Resources Research**, v. 37, n. 2, p. 393-404, 2001.

SCHNAID, F. **In situ testing in geomechanics: the main tests**. Abingdon: Taylor & Francis, 2009. 352 p.

SCHULMEISTER, M.K. et al. Direct-push electrical conductivity logging for high-resolution hydrostratigraphic characterization. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 23, n. 3, p. 52-62, 2003.

SHIELDS, T. H. Introduction to 3D maps techniques. In: **National Site Assessment Symposium**. San Diego, 2004. Disponível em: <[https://triadcentral.clu-in.org/ref/doc/5\\_Intro\\_to\\_3-D\\_Mapping\\_Tech.pdf](https://triadcentral.clu-in.org/ref/doc/5_Intro_to_3-D_Mapping_Tech.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2017.

SUTHERSAN, S. et al. Flux-informed remediation decision making. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 30, n. 1, p. 36-45, 2010.

SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J. A.; WELTY, N. R. H. The new ROI: Return on investigations by utilizing smart characterization methods. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 35, n. 3, p. 25-33, 2015.

UNITED STATE DEPARTMENT OF DEFENSE STRATEGIC ENVIRONMENTAL RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM – SERDP; UNITED STATE DEPARTMENT OF DEFENSE ENVIRONMENTAL SECURITY TECHNOLOGY CERTIFICATION PROGRAM – ESTCP. **Chlorinated Solvent Source Zone Remediation**. SERDP; ESTCP, Springer Science, 2014. 713 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **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.** Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Office of Superfund Remediation and Technology Innovation (OSRTI), 2006. 144 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **High resolution site characterization.** Washington, 2013. Disponível em: <<https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

VIENKEN, T.; LEVEN, C.; DIETRICH, P. Use of CPT and other direct push methods for (hydro-) stratigraphic aquifer characterization—a field study. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 49, n. 2, p. 197-206, 2012.

WELTY, N. Permeability mapping: strategies and methods. In: **North American Environmental Field Conference.** Tampa, 2012.

WELTY, N.; CURRY, P.; QUINNAN, J. Smart characterization and return of investigation. In: **Advances in remediation: a new way to thinking.** Highlands Ranch: Arcadis, 2016. p. 13-18.