

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus Rio Claro

**“CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA APLICADA À
INSTALAÇÃO DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS EM RIO CLARO (SP)”**

Debora Takie Yamada

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Zaine

Dissertação de Mestrado elaborada junto
ao Curso de Pós-Graduação em
Geociências – Área de Concentração em
Geociências e Meio Ambiente para a
obtenção do Título de Mestre em
Geociências.

Rio Claro (SP)

2004

624.151 Yamada, Débora Takie
Y19c Caracterização geológico-geotécnica aplicada à instalação
de postos de combustíveis em Rio Claro (SP) / Débora Takie
Yamada. – Rio Claro : [s.n.], 2004
122 f. : il., quadros, fots., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: José Eduardo Zaine

1. Geologia de engenharia. 2. Geologia ambiental. 3.
Tanque de armazenamento subterrâneo. 4. Caracterização
geotécnica. 5. Contaminação por hidrocarbonetos. I. Título

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Eduardo Zaine (orientador)

Prof. Dr. José Augusto de Lollo

Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

Rio Claro, 06 de maio de 2004

Aos meus pais, Mário e Marilda

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Eduardo Zaine, por sua amizade, constante estímulo e contribuição como orientador.

À Agência Nacional do Petróleo - ANP, Programa de Recursos Humanos PRH-05, pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro para este trabalho.

Aos professores, Dr. Carlos de Almeida Nóbrega e Dr. Leandro Cerri pelas sugestões e correções realizadas no exame de qualificação, além dos professores Antenor Zanardo, Antônio Celso de Oliveira Braga e Edson Gomes de Oliveira pelas sugestões.

Aos coordenadores do PRH-05 Prof. Dr. Dimas Dias Brito e Prof. Dr. Joel Carneiro de Castro, pelo incentivo e constante apoio no desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos amigos César A. de Oliveira e Tiago Bueno pelo grande apoio, discussões e sugestões concedidas durante os trabalhos de campo, além de Andresa Oliva e Francisco M. Garcia Barrera pelo auxílio na coleta e análise de água.

Às grandes amigas Angélica Álida Zacharias e Cláudia Kuen Chow, pelo grande carinho e apoio;

À Maíra Rosa A. P. Scarance, pela prestimosa revisão das referências bibliográficas.

Aos funcionários Alan de Oliveira, Wladimir Barbosa Júnior, José Maria Cazonatto, Elaine Brigatto e Márcia Regina Tavolari do Amaral, pelas ajudas concedidas no desenvolvimento da Dissertação.

Ao Rafael, amigo e companheiro de todas as horas, pelo grande amor e incentivo na realização deste trabalho.

Aos meus pais Mário e Marilda, e minha irmã Thais pelo amor, carinho e apoio dados durante todos os anos de minha vida.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| ÍNDICE | i |
| ÍNDICE DE FIGURAS | iv |
| ÍNDICE DE FOTOS..... | v |
| ÍNDICE DE TABELAS | v |
| ÍNDICE DE QUADROS | vi |
| ÍNDICE DE ANEXOS | viii |
| RELAÇÕES DE SIGLAS..... | ix |
| RESUMO..... | x |
| ABSTRACT | xi |
| CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 2. MÉTODO DE TRABALHO..... | 5 |
| CAPÍTULO 3. SITUAÇÃO LEGAL..... | 10 |
| CAPÍTULO 4. BASE TEÓRICA..... | 13 |
| CAPÍTULO 5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 59 |
| CAPÍTULO 6. RESULTADOS DAS INVESTIGAÇÕES E ANÁLISES..... | 72 |
| CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES | 107 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 115 |

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. _INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Premissa, Hipótese e Objetivos da Pesquisa | 2 |
| 2. MÉTODO DE TRABALHO..... | 5 |
| 3. SITUAÇÃO LEGAL..... | 10 |
| 4. BASE TEÓRICA | 13 |
| 4.1. Propriedades físicas do meio..... | 13 |
| 4.1.1. Índices físicos..... | 13 |
| 4.1.2. Condutividade hidráulica..... | 15 |
| 4.1.3. Textura e Granulometria | 18 |
| 4.1.4. Limites de consistência | 19 |
| 4.1.5. Propriedades da fração argilosa do solos | 21 |
| 4.1.5.1. Capacidade de troca de cátions | 22 |
| 4.1.5.2. Atividade | 24 |
| 4.1.5.3. Coesão | 25 |
| 4.2. Água Subterrânea | 26 |
| 4.2.1. Ciclo Hidrológico | 26 |
| 4.2.2. Zonas de umidade do solo..... | 27 |
| 4.3. Característica dos combustíveis derivados de petróleo | 29 |
| 4.3.1. Fases dos hidrocarbonetos no solo | 31 |
| 4.4. Processos no meio físico de interesse à pesquisa | 35 |
| 4.4.1. Corrosão..... | 35 |
| 4.4.1.1. Mecanismos de corrosão | 35 |
| 4.4.1.2. Solo: meio corrosivo | 36 |
| 4.4.1.3. Água: meio corrosivo..... | 42 |
| 4.4.2. Compressão | 43 |
| 4.4.2.1. Capacidade de carga | 43 |
| 4.4.2.2. Determinação da compressibilidade | 46 |
| 4.4.2.3. Tensão devido à sobrecarga..... | 48 |
| 4.4.3. Expansão | 49 |
| 4.4.4. Colapso do solo | 52 |

| | | |
|----------|---|----|
| 4.4.4.1. | Aspectos gerais | 52 |
| 4.4.4.2. | Formas de colapso | 53 |
| 4.4.4.3. | Critérios de identificação | 54 |
| 4.5. | Interação entre Instalações enterradas, propriedades e processos atuantes no meio físico relevantes frente a vazamentos de hidrocarbonetos..... | 56 |
| 5. | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 59 |
| 5.1. | Localização | 59 |
| 5.2. | Aspectos climáticos e hidrográficos | 59 |
| 5.3. | Contexto geomorfológico | 62 |
| 5.4. | Contexto pedológico | 63 |
| 5.5. | Geologia Local | 64 |
| 5.5.1. | Formação Corumbataí | 64 |
| 5.5.2. | Formação Serra Geral | 65 |
| 5.5.3. | Formação Rio Claro | 65 |
| 5.5.4. | Depósitos Quaternários | 66 |
| 5.6. | Contexto Geológico-geotécnico | 66 |
| 6. | RESULTADOS DAS INVESTIGAÇÕES E ANÁLISES..... | 72 |
| 6.1. | Definição das unidades de análise | 72 |
| 6.2. | Descrição geológica, geomorfológica e hidrogeológica das unidade de análise | 76 |
| 6.2.1. | Unidade de Análise 1 – Formação Corumbataí | 76 |
| 6.2.2. | Unidade de Análise 2 – Diabásio | 77 |
| 6.2.3. | Unidade de Análise 3 – Formação Rio Claro..... | 78 |
| 6.2.4. | Unidade de Análise 4 – Aluviões | 80 |
| 6.3. | Caracterização Geotécnica das unidades de análise..... | 81 |
| 6.3.1. | Unidade de Análise 1 – Formação Corumbataí | 81 |
| 6.3.1.1. | Análise da Unidade 1 quanto à compressão e a capacidade de carga | 83 |
| 6.3.1.2. | Análise da Unidade 1 quanto à expansão..... | 84 |
| 6.3.1.3. | Análise da Unidade 1 quanto à dificuldade de escavação..... | 85 |
| 6.3.1.4. | Análise da Unidade 1 quanto à corrosão | 85 |
| 6.3.1.5. | Análise da Unidade 1 quanto ao fraturamento estrutural..... | 86 |
| 6.3.2. | Unidade de Análise 2 – Diabásio | 86 |
| 6.3.2.1. | Análise da Unidade 2 quanto à compressão e capacidade de carga | 87 |
| 6.3.2.2. | Análise da Unidade 2 quanto à expansão..... | 88 |
| 6.3.2.3. | Análise da Unidade 2 quanto à dificuldade de escavação..... | 88 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 6.3.2.4. | Análise da Unidade 2 quanto à corrosão | 89 |
| 6.3.2.5. | Análise da Unidade 2 quanto ao fraturamento estrutural..... | 90 |
| 6.3.3. | Unidade de Análise 3 – Formação Rio Claro..... | 90 |
| 6.3.3.1. | Análise da Unidade 3 quanto à compressão..... | 92 |
| 6.3.3.2. | Análise da Unidade 3 quanto ao colapso do solo e a capacidade de carga | 92 |
| 6.3.3.3. | Análise da Unidade 3 quanto à corrosão | 94 |
| 6.3.4. | Unidade de Análise 4 –Aluviões | 95 |
| 6.3.4.1. | Análise da Unidade 4 quanto à compressão e capacidade de carga | 97 |
| 6.3.4.2. | Análise da Unidade 4 quanto à expansão..... | 98 |
| 6.3.4.3. | Análise da Unidade 4 quanto à dificuldade de escavação..... | 98 |
| 6.3.4.4. | Análise da Unidade 4 quanto à corrosão | 98 |
| 6.4. | Avaliação das unidades de análise quanto à instalação de postos de combustíveis | 101 |
| 6.4.1. | Avaliação da Unidade de Análise 1 – Formação Corumbataí | 101 |
| 6.4.2. | Avaliação da Unidade de Análise 2 – Diabásio | 103 |
| 6.4.3. | Avaliação da Unidade de Análise 3 – Formação Rio Claro | 104 |
| 6.4.4. | Avaliação da Unidade de Análise 4 – Aluviões..... | 105 |
| 7. | CONCLUSÕES..... | 107 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 115 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| FIGURA 01: Caracter preventivo dos estudos geológico-geotécnicos visando à instalação de postos de combustíveis | 3 |
| FIGURA 02: Fluxograma apresentando a síntese do método de trabalho mostrando a seqüência de etapas da pesquisa | 9 |
| FIGURA 03: Solo e suas fases com indicação de volumes e massas de seus constituintes (Modificado de NOGUEIRA, 1988)..... | 13 |
| FIGURA 04: Limites de Atterberg. (Fonte: LAMBE, 1979). | 20 |
| FIGURA 05: Ciclo hidrológico (Fonte: ROSCOE MOSS COMPANY, 1990). | 26 |
| FIGURA 06: Subdivisões do solo segundo seu teor de umidade (Modificado de GUIGUER, 2000)..... | 27 |
| FIGURA 07: Representação das fases dos hidrocarbonetos encontradas na zona não saturada e saturada (Fonte: GUIGUER, 2000). | 32 |
| FIGURA 08: Efeito das camadas de diferentes condutividades hidráulicas na migração do contaminante (Fonte: OLIVEIRA, 1992). | 33 |
| FIGURA 09: Progressão do hidrocarboneto vazado de um tanque de armazenamento subterrâneo (EPA, 2003b)..... | 34 |
| FIGURA 10: Gráfico pressão x recalque (CAPUTO, 1977b). | 44 |
| FIGURA 11: (a) Bulbo de pressões; (b) Bulbo de pressões para tanque de armazenamento subterrâneo de 30.000 l e, isóbara de 10% (4,3 kN/m ²) (modificado de GIBOTTI, 1999). | 49 |
| FIGURA 12: Ocorrência de colapso em prova de carga genérica (Fonte: CINTRA, 1995) | 53 |
| FIGURA 13: Mapa de localização da área de estudo. | 60 |
| FIGURA 14: Mapa geológico com indicação da localização dos postos de combustíveis na área urbana do município de Rio Claro (modificado de ZAINE, 1994)..... | 61 |
| FIGURA 15: Perfil esquemático das unidades de análise definidas para Rio Claro (SP) (modificado de ZAINE, 2000). | 75 |
| FIGURA 16: processos atuantes no meio físico que exercem influencia sobre o tanque de armazenamento subterrâneo induzindo danos estruturais e possíveis vazamentos e as propriedades do meio físico que regem a migração do contaminante vazado. | 108 |
| FIGURA 17: Fluxograma com a análise final dos resultados obtidos pela pesquisa. | 112 |

ÍNDICE DE FOTOS

| | |
|---|----|
| FOTO 01: Perfil de solo, transição entre podzólico e litólico com siltitos arroxeados na porção inferior (P-3, ANEXO1). | 76 |
| FOTO 02: Lajeado, sem a presença de solo, na encosta norte do morro do horto (fonte: J.E. Zaine). | 78 |
| FOTO 03: Perfil de solo característico da Formação Rio Claro (P-2, ANEXO 1). | 79 |
| FOTO 04: Planície aluvionar do rio Corumbataí (ST-15, ANEXO 1). | 80 |
| FOTO 05: Vale instalado na Formação Rio Claro com solo hidromórfico (córrego Wenzel) (ST-12, ANEXO 1). | 81 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 01: Valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais inconsolidados (FETTER, 1999). | 17 |
| TABELA 02: Classificação dos solos quanto à condutividade hidráulica (VARGAS, 1978) | 17 |
| TABELA 03: Limites de consistência de alguns argilo-minerais, em função de sua forma iônica (NOGUEIRA, 1988). | 20 |
| TABELA 04: Classificação das argilas em termos de atividade (MITCHELL, 1993). | 25 |
| TABELA 05: Influência da atividade das bactérias redutoras de sulfato no potencial redox, determinando a agressividade do solo (MILLER e TILLER, 1970 apud GENTIL, 1996). | 40 |
| TABELA 06: Relação entre o potencial de expansão e índice de plasticidade. | 51 |
| TABELA 07: Susceptibilidade ao colapso baseado no cálculo do potencial de colapso (I) segundo Lutenegeger e Saber (1988 apud GIBOTTI JÚNIOR, 1999). | 56 |
| TABELA 08: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados da Formação Corumbataí, baseado em Cottas (1983). | 82 |
| TABELA 09: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais da Formação Corumbataí, referentes referentes à compressão, colapso e a tensão admissível. | 84 |
| TABELA 10: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados do diabásio, baseado em Cottas (1983). | 87 |
| TABELA 11: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados do diabásio, referentes a compressibilidade e colapsividade baseado em Cottas (1983). | 88 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 12: Parâmetros utilizados para definição da agressividade do solo na Unidade de Análise 2..... | 89 |
| TABELA 13: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados da Formação Rio claro baseado em diferentes autores..... | 91 |
| TABELA 14: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados da Formação Rio claro, à compressão, colapso e tensão admissível baseado em diferentes autores..... | 92 |
| TABELA 15: Parâmetros utilizados para determinação da agressividade do solo na Unidade de Análise 3..... | 94 |
| TABELA 16: Valores representativos de dados geotécnicos dos Aluviões, baseado em Cottas (1983)..... | 97 |
| TABELA 17: Valores representativos de dados geotécnicos dos Aluviões, referentes referentes à compressão, colapsividade e tensão admissível, baseado em Cottas (1983). | 97 |
| TABELA 18: Parâmetros utilizados para determinação da agressividade do solo na Unidade de Análise 4..... | 99 |
| TABELA 19: Valores de pH, EH (potencial redox) e condutividade elétrica para as amostras de água (Unidade de Análise 4). | 100 |
| TABELA 20: Principais atributos necessários para orientar a instalação de tanque de armazenamento subterrâneo em postos de combustíveis. | 109 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|---|----|
| QUADRO 01: Fases do Método das Hipóteses Progressivas..... | 6 |
| QUADRO 02: Índices físicos do solo..... | 15 |
| QUADRO 03: Variação da CTC de acordo com a espécie mineral (modificado de BOULDING, 1995)..... | 23 |
| QUADRO 04: Intervalos de condutividade elétrica estabelecidos de acordo com as classes de referência e a corrosividade dos solo (modificado de ZUQUETTE, 1993)..... | 37 |
| QUADRO 05: Classificação de compacidade e consistência dos solos pelo índice de resistência à penetração (IRP) (NBR 7250). | 45 |
| QUADRO 06: Correlação entre índice de resistência à penetração e tensão admissível (modificado de LIMA, 1979)..... | 46 |
| QUADRO 07: Correlação entre índice de resistência à penetração e tensão admissível (modificado de CHIOSSI, 1975). | 46 |
| QUADRO 08: Estimativa das mudanças de volume prováveis em solos expansivos e o grau de expansão (CHEN, 1975). | 51 |

| | |
|---|-----|
| QUADRO 09: Processos do meio físico que têm influência sobre os tanques de armazenamento subterrâneo..... | 57 |
| QUADRO 10: Características das propriedades do meio físico que influenciam a migração de contaminante (hidrocarboneto)..... | 58 |
| QUADRO 11: Síntese das principais características, processos e problemas da Formação Corumbataí de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000)..... | 67 |
| QUADRO 12: Síntese das principais características, processos e problemas das áreas de domínio de diabásio, de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000)..... | 68 |
| QUADRO 13: Síntese das principais características, processos e problemas da Formação Rio Claro de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000)..... | 69 |
| QUADRO 14: Síntese das principais características, processos e problemas dos depósitos de aluvião de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000)..... | 70 |
| QUADRO 15: Síntese das unidades geológico-geotécnicas da área urbana de Rio Claro (modificado de ZAINE, 2000). | 73 |
| QUADRO 16: Agrupamento da unidades geológico-geotécnicas em unidades de análise com a definição dos principais problemas envolvendo tanques de armazenamento subterrâneo..... | 74 |
| QUADRO 17: Descrição do perfil de solo encontrado na área de estudo – Unidade 2. ... | 86 |
| QUADRO 18: Descrição do perfil de solo encontrado na área de estudo – Unidade 3. ... | 91 |
| QUADRO 19: Descrição do perfil de solo encontrado na área de estudo – Unidade 4. ... | 96 |
| QUADRO 20: Síntese das Unidades de análise com indicação das principais restrições e potencialidades para a implantação de postos de combustíveis em Rio Claro – SP..... | 112 |

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Mapa geológico-geotécnico (ZAINE, 2000) com a localização dos pontos de observação e sondagens a trado, e a síntese da descrição das sondagens.

ANEXO 2: Curvas granulométricas das unidades de análise.

ANEXO 3: Difração de raio-x.

ANEXO 4: Resultado das análises físicas e químicas das amostras de solo e água.

ANEXO 5: Gráfico com a variação da condutividade elétrica para as unidades de análise 2, 3 e 4.

RELAÇÕES DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Cc – Índice de Compressão

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTC – Capacidade de troca catiônica

EH – Potencial Redox

EPA - *Environmental Protection Agency*

IP – Índice de Plasticidade

IRP – Índice de Resistência à Penetração

N.A. – Nível d'água subterrâneo

NBR – Norma Brasileira

pH – Potencial Hidrogeniônico

SPT – *Standard Penetration Test*

TAS – Tanque de Armazenamento Subterrâneo

RESUMO

A pesquisa tem como tema a caracterização geológica e geotécnica da área urbana de Rio Claro (SP), com ênfase à instalação de postos de combustíveis. Vazamentos de postos de combustíveis levaram à criação de legislações específicas para controlar a instalação e prevenir acidentes desta natureza. Estes estudos especificam a caracterização do meio físico como um dos principais fatores a serem considerados. O objetivo da pesquisa foi: a partir da definição, caracterização e análise das unidades geológico-geotécnicas, avaliar cada uma dessas unidades, orientando assim a instalação de postos de combustíveis em Rio Claro. Para isso, foram identificados os processos atuantes no meio físico, que exercem influência no o tanque de armazenamento subterrâneo, induzindo danos estruturais e possíveis vazamentos. Também foram estudadas as características e propriedades do meio físico que regem a migração do contaminante vazado. Para a área de Rio Claro, foram definidas quatro unidades de análise: Formação Corumbataí, Diabásio, Formação Rio Claro e Aluviões, onde foram realizadas a análise e caracterização geotécnica. Esta pesquisa mostra que as diferentes unidades necessitam de ensaios e análises específicos, que dependem das propriedades e dos processos atuantes. Atributos específicos de cada unidade de análise podem ser destacados como: argilas expansivas (unidade 1), fraturamento estrutural (unidade 2), solo colapsível (unidade 3) e a presença de camadas de turfa compressíveis (unidade 4). Vale ressaltar que, para todas as unidades, a profundidade do nível d'água subterrâneo é um atributo determinante, influenciando tanto na instalação do tanque de armazenamento subterrâneo quanto ocasionando processos corrosivos, além de estar susceptível a contaminações. A definição das diferentes unidades de análise comprovou a necessidade de procedimentos distintos para avaliação de cada área, onde a caracterização geotécnica determina o direcionamento e otimização dos trabalhos, além de contribuir para a escolha de equipamentos e intervenções mais adequados e compatíveis para cada situação.

PALAVRAS CHAVE: postos de combustíveis; tanque de armazenamento subterrâneo; Rio Claro; caracterização geotécnica; contaminação por hidrocarbonetos.

ABSTRACT

This research is based on the geological and geotechnical characterizations of Rio Claro (SP) urban area, a medium size town of the state of São Paulo, Brazil, with emphasis in the installation of gas stations. Gas station leaks caused the creation and emulation of specific legislation to control the installation and prevent accidents of this nature. These studies specify the characterization of the physical factors as one of the major parameters to be considered. The objective of this research was: definition, characterization, analysis and evaluation of the geologic-geotechnical units, therefore orienting the installation of fuel stations in Rio Claro. For this issue, those procedures active in the area, that influence on the underground storage tanks possibly causing structural damages and leaks were identified as well as the characteristics and properties of the surrounding fields that demand the migration of the leaked contaminant. For the Rio Claro area, four units of analysis were identified: Corumbataí Formation, Diabase, Rio Claro Formation and Alluvial Deposits, where the analysis and geotechnical characterization were conducted. This research shows that the different units need tests and analysis specific, which depend on the acting properties and processes. Specific attributes of each analysis unit can be presented as: expansive clay (unit 1), structural fracturing (unit 2) collapsible soil (unit 3) and the presence of compressible turf layers (unit 4). It is also worth mentioning that, for all units, the depth of the water table is a determinant attribute, influencing both on the installation of the underground storage tank as well as causing corrosive processes, aside from being susceptible to contamination. The definition of different units of analysis proved the necessity of distinct procedures for evaluation of each area, where the geotechnical characterization determines the direction and optimization of works, as well as contributing to the choice of equipments and more adequate and compatible interventions for each situation.

Keywords: gas stations; underground storage tank; Rio Claro; geotechnical characterization; hydrocarbon contamination.

1. INTRODUÇÃO

Diante das tendências e necessidades ligadas ao desenvolvimento e crescimento urbano, na maioria das cidades vem ocorrendo um grande aumento no número de postos de combustíveis. Estes postos interferem diretamente no meio onde se instalam, podendo causar inúmeros problemas ambientais, principalmente, relacionados a vazamentos de hidrocarbonetos.

Os tanques de armazenamento subterrâneo representam um grande risco, pois podem ocasionar vazamentos, originando plumas de contaminação, que penetram no solo e atingem o “lençol freático”. Os vazamentos são classificados como graves e complexos, de difícil recuperação das áreas afetadas (GIBOTTI JÚNIOR, 1999) e muito caros no que se refere ao processo de recuperação, segundo a *Environmental Protection Agency* - EPA cerca de U\$100.000 são necessários para a remediação de cada área contaminada.

Dados da CETESB revelam que, nos últimos cinco anos, foram detectados, um número significativo de casos de vazamento de combustíveis causados pela falta de manutenção de equipamentos, pela deterioração de tanques e tubulações e, também, por falhas operacionais decorrentes do despreparo dos profissionais que atuam nestes estabelecimentos (CETESB, 2003).

Para a Divisão de Tecnologia de Riscos Ambientais da CETESB, os vazamentos em postos de gasolina têm sido responsáveis por cerca de 10% de todas as emergências atendidas. Foram 33 casos registrados em 1997; 69 em 1998; 67 em 1999; 54 em 2000; e 38 casos em 2001.

Com o objetivo de controlar e reduzir os vazamentos de derivados de petróleo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA estabeleceu a Resolução nº 273 de 29 de novembro de 2000, que regulamenta a instalação de postos de combustíveis (CONAMA, 2000). Nesta resolução são considerados os riscos de contaminação de corpos d’água subterrâneos e superficiais, solo e ar, e os riscos de incêndio e explosões. A Resolução determina a caracterização

hidrogeológica e geológica do terreno com análise do solo, contemplando a permeabilidade e o potencial de corrosão .

A instalação de postos de combustíveis em áreas com características geológico-geotécnicas desfavoráveis, sem a execução de obras de engenharia corretivas (ZAINÉ, 2000), pode elevar o risco de contaminação associado a vazamentos de hidrocarbonetos. A caracterização geológico-geotécnica representa um subsídio de avaliação, em estudos preventivos, nas instalações de postos de combustíveis na área urbana do Município de Rio Claro (SP).

Rio Claro, uma cidade de médio porte, localizada no centro-leste do Estado de São Paulo, tem cerca de 40 postos de combustíveis, que na sua totalidade, possuem tanques subterrâneos de armazenamento de derivados de petróleo e de álcool. Diferentes situações geológicas, geomorfológicas e pedológicas, associadas a processos da dinâmica externa, impõem tratamento distinto nessas áreas de postos.

A presente pesquisa poderá subsidiar o planejamento do uso e ocupação do solo da área urbana do Município de Rio Claro (SP), definindo diretrizes específicas, para cada tipo de terreno, quanto à instalação de postos de combustíveis. O conhecimento das características dos diferentes terrenos (materiais e processos geológicos) encontrados em Rio Claro fornece subsídios para a prevenção de possíveis vazamentos de hidrocarbonetos e contribui para a remediação de áreas contaminadas por estas substâncias, além de garantir a estabilidade das instalações dos postos de combustíveis.

1.1. Premissa, Hipótese e Objetivos da Pesquisa

Atualmente, um grande número de postos de combustíveis apresentam vazamentos, este quadro levou à criação de legislações específicas para regular a instalação destes estabelecimentos e prevenção possíveis de acidentes desta natureza. Os estudos previstos e solicitados por estas leis têm em seu conteúdo a caracterização do meio físico como um dos principais parâmetros a serem considerados na instalação de postos de combustíveis.

Assim formulou-se a hipótese de que o conhecimento das características físicas de diferentes unidades geológico-geotécnicas, reconhecidas na área de

estudo é de extrema importância para analisar o comportamento de cada unidade frente às mesmas solicitações, no caso, tanques de armazenamento subterrâneo de combustíveis (TAS) e o possível vazamento de hidrocarboneto destes compartimentos.

Esta hipótese baseia-se no terceiro conceito essencial da filosofia da Geologia de Engenharia, estabelecido por Santos (1994 e 2002) – o *Conceito da Imanência das Características Físicas*. Este conceito estabelece que diferentes materiais geológicos submetidos a processos e solicitações semelhantes irão demonstrar comportamentos (fenômenos) diferenciados em dependência das características físicas intrínsecas destes materiais: composição, mineralogia e granulometria, textura, estrutura, índices de resistência, coesão etc.

A caracterização geológico-geotécnica, desta forma, age como instrumento para orientar a implantação de postos de combustíveis na área urbana de Rio Claro (FIGURA 01).

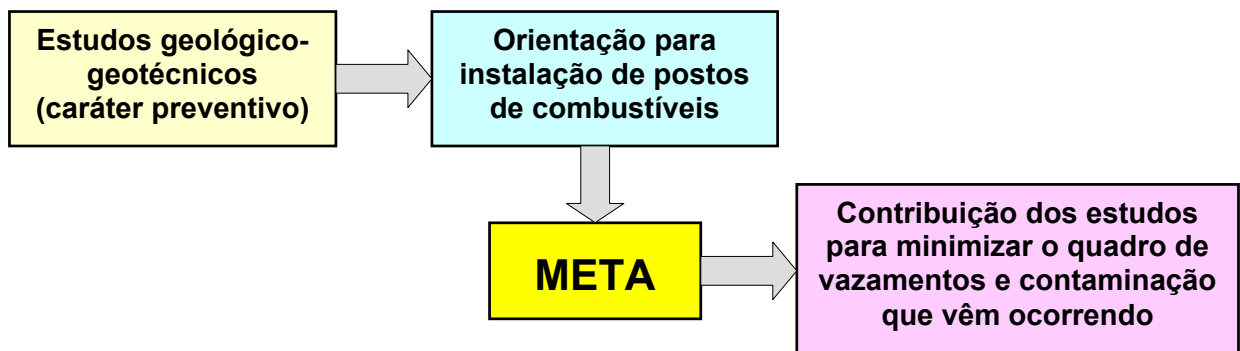


FIGURA 01: Caracter preventivo dos estudos geológico-geotécnicos visando à instalação de postos de combustíveis.

Assim os objetivos da pesquisa são:

- Definição de unidades de análise com base em observações de campo das unidades geológico-geotécnicas definidas por Zaine (2000) e na associação destas com os principais problemas envolvendo tanques de armazenamento subterrâneo;

- Análise e caracterização geotécnica das unidades definidas, com base nas propriedades e características do meio físico e nos processos atuantes que, na instalação de postos de combustíveis, interagem com os tanques enterrados e possíveis vazamentos, estabelecendo parâmetros geotécnicos específicos para as diferentes unidades de análise, por meio de ensaios e análises físicos e químicos.
- Avaliação das unidades de análise para orientar a implantação de postos de combustíveis em Rio Claro, definindo os estudos necessários e, desta forma, auxiliar na escolha de equipamentos e intervenções mais adequadas, compatíveis com a situação de cada unidade. Esta avaliação tem como meta, através do desenvolvimento desta pesquisa, contribuir para minimizar o quadro de vazamentos e contaminação que vêm ocorrendo.

2. MÉTODO DE TRABALHO

No campo das Geociências, a especialização que se destaca por focar as relações biunívocas entre o homem e o meio físico geológico é a Geologia de Engenharia (SANTOS et al., 1990).

De acordo com os estatutos da ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, Geologia de Engenharia é a *“ciência dedicada à investigação, estudo e solução dos problemas de engenharia e meio ambiente decorrentes da interação entre as obras e atividades do Homem e o meio físico geológico, assim como ao prognóstico e ao desenvolvimento de medidas preventivas ou reparadoras de riscos geológicos”* (SANTOS, 2002). Este conceito, adotado por esta pesquisa vem abordar a interferência de uma obra de engenharia, no caso postos de combustíveis, no meio físico onde se instala, propondo o estudo preventivo para possíveis problemas relacionados à implantação da obra e problemas ambientais decorrentes de vazamentos.

Segundo a norma técnica NBR-10703 (ABNT, 1989 apud FORNASARI FILHO et al., 1992) Meio ambiente consiste em *“determinado espaço onde ocorre a interação dos componentes bióticos (fauna e flora), abióticos (água, rocha e ar) e biótico-abiótico (solo). Em decorrência da ação humana, caracteriza-se também o componente cultural.”*

O conceito de meio físico proposto por Fornasari Filho et al. (1992) é entendido como o conjunto do ambiente definido pela interação dos componentes predominantemente abióticos, quais sejam, materiais terrestres (solos, rochas água, ar) e tipos naturais de energia (gravitacional, solar, energia interna da Terra e outras), incluindo suas modificações decorrentes da ação biológica e humana. Nesta pesquisa será utilizado o conceito de meio físico do autor citado por se adequar ao enfoque da pesquisa.

Segundo Fornasari Filho et al. (1992), os processos do meio ambiente que decorrem de interações com predominância de componentes abióticos são considerados como sendo processos do meio físico que podem ser deflagrados,

induzidos, acelerados ou retardados artificialmente por obras de engenharia. De acordo com Santos (1994), cabe a Geologia de Engenharia a responsabilidade técnica de diagnosticar e entender os fenômenos geológico-geotécnicos que possam resultar da interação de solicitações globais, regionais ou locais ao meio físico geológico com os processos e características pré-existentes deste meio. Assim as palavras-chave que definem a meta da Geologia de Engenharia são **diagnóstico, entendimento, dinâmica de desenvolvimento e previsão de comportamento**. Diante do exposto, o mesmo autor define como fundamental a adoção de um método científico de trabalho para o cumprimento das tarefas da geologia de engenharia.

Para as análises dos fenômenos da Geologia de Engenharia o método científico mais indicado é o Método das Hipóteses Progressivas, que se baseia no método indutivo de Francis Bacon e no método experimental de Galileu Galilei, ambos idealizados no séc. XVII.

O Método das Hipóteses Progressivas passa por um contínuo processo de adoção e aferição de hipóteses fenomenológicas. Este processo é obtido através da investigação orientada de dados para se chegar a um diagnóstico seguro (SANTOS 1994 e 2002) (QUADRO 01).

QUADRO 01: Fases do Método das Hipóteses Progressivas.

| Fases | Objetivos |
|---------------------------------|--|
| 1ª Fase: Hipótese inicial | Localização e circunscrição do problema, reunião de dados disponíveis e adoção de uma primeira hipótese orientativa. |
| 2ª Fase: Diagnóstico definitivo | Investigação orientada. Aferição da hipótese anterior; adoção de novas hipóteses até a formulação do diagnóstico definitivo. |
| 3ª Fase: Fechamento | Investigação e sistematização orientadas, e descrição final do fenômeno através da qualificação e quantificação, dinâmica de desenvolvimento, previsão de comportamento. |

Seguindo o Método das Hipóteses Progressivas, inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica com o levantamento de artigos e publicações existentes em anais de congressos e simpósios, dissertações e teses acadêmicas sobre assuntos de interesse ao tema da pesquisa, bem como trabalhos referentes à área

de estudo, além da aquisição de dados na Prefeitura Municipal de Rio Claro. Também foi feito um levantamento das legislações federais, estaduais e municipais pertinentes à instalação de postos de combustíveis e vazamentos de hidrocarbonetos. Esta etapa de trabalho corresponde à primeira fase da investigação de acordo com o Método das Hipóteses Progressivas.

Com as informações adquiridas por meio de pesquisa bibliográfica e coleta de dados, foram reconhecidas as principais unidades geológico-geotécnicas definidas por Zaine (2000), base para o desenvolvimento da pesquisa, utilizando-se também de observações e descrições preliminares de campo, com o intuito de analisar as unidades.

Foi possível verificar previamente, para cada unidade, quais os problemas relacionados com a instalação de tanques de armazenamento subterrâneo que estão ligados aos processos atuantes no meio físico e propriedades de cada unidade. Assim cada tipo de terreno irá responder de forma distinta quando expostos à instalação de tanques de armazenamento subterrâneo. Neste ponto tem-se a formulação da hipótese orientativa referente à primeira fase do Método de Santos (1994).

As etapas subsequentes estão relacionadas com as atividades previstas na Segunda fase do Método das Hipóteses Progressivas abrangendo à coleta de dados de campo e ensaios laboratoriais, e para o caso desta pesquisa, integração com dados adquiridos em bibliografias específicas da área. Tudo com vistas à adequação da hipótese inicial proposta.

Com base nos problemas encontrados nas unidades relacionados às propriedades e processos atuantes no meio físico, foi realizado um estudo detalhado em 18 áreas (ANEXO 1), distribuídas pelas unidades geológico-geotécnicas de Zaine (2000). Para a seleção destas áreas foi realizada uma fotointerpretação, primeiramente com fotografias na escala 1:25.000, para um reconhecimento geral. Posteriormente utilizou-se de fotos na escala 1:5.000 da área urbana do Município de Rio Claro, com o intuito de delimitar com maior detalhe, os contatos entre as unidades, além estabelecer a locação das sondagens a trado e verificação de feições observadas na fotointerpretação.

Nestas áreas foram realizadas investigações diretas através de sondagens a trado, até a profundidade de 4,00 m (a profundidade média da base de um tanque enterrado é entre 3,50 e 4,0 m), com coleta de amostras deformadas nos últimos 50

cm para análises físicas e químicas. Nestas amostras foram determinadas teor de umidade, densidade dos sólidos do solo, limite de consistência com base em Stancati et al. (1981), granulometria (NBR-7181 ABNT, 1987) e difração de raio-x para os materiais onde não existiam análises (aluviões e diabásio) (ANEXO 2 e 3). Como a região de Rio Claro é uma área com trabalhos de importância já publicados, e para a otimização da pesquisa foram utilizados dados geológicos e geotécnicos existentes tais como: índices físicos, capacidade de suporte, avaliação do grau de colapsividade, análise mineralógica, expansibilidade, compressibilidade e condutividade hidráulica.

Para cada ponto de amostragem foram feitas as seguintes análises químicas: pH, EH (potencial redox), condutividade elétrica e CTC (capacidade de troca catiônica). Nas sondagens que atingiram o nível d'água subterrâneo foram coletadas amostras de solo para a aferição do teor de sulfeto e sulfato. Nas amostras de água foram medidos pH, EH e condutividade elétrica foram feitas "*in situ*" através do medidor de condutividade, temperatura e pH, DIG PCT/PH COMP – HYDAC e do medidor pH/mV 290A – ORION, juntamente com o eletrodo de oxirredução (9678BN – ORION) (ANEXO 4). Estas análises foram utilizadas na determinação da agressividade dos solos da área de estudo.

Os ensaios físicos foram realizados nos laboratórios de Unesp - Rio Claro e as análises físico-químicas foram encaminhadas para a ESALQ – USP e para empresa Bioagri Ambiental ambas na cidade de Piracicaba.

Todas as análises objetivaram determinar a relação entre o tanque de armazenamento subterrâneo e o meio físico em que se encontra ou se encontrará o estabelecimento, determinando o comportamento frente aos diferentes materiais, geometria e dinâmica das diferentes áreas.

A partir dos dados obtidos através de informações e descrições de campo, ensaios de laboratório, juntamente com dados geotécnico de literatura obteve-se a caracterização geológica-geotécnica da área de estudo que estabeleceu quatro unidades de análise, através do agrupamento de unidades geológico-geotécnicas definidas por Zaine (2000). Para cada unidade foram observados comportamentos distintos quanto à implantação de tanques armazenamento subterrâneo, indicando os principais problemas relacionados aos processos e propriedades do meio físico encontrados para cada unidade, concluindo assim, os objetivos da terceira fase do Método das Hipóteses Progressivas.

Com base no método de trabalho adotado foi elaborado um fluxograma da seqüência de etapas da pesquisa (FIGURA 02).

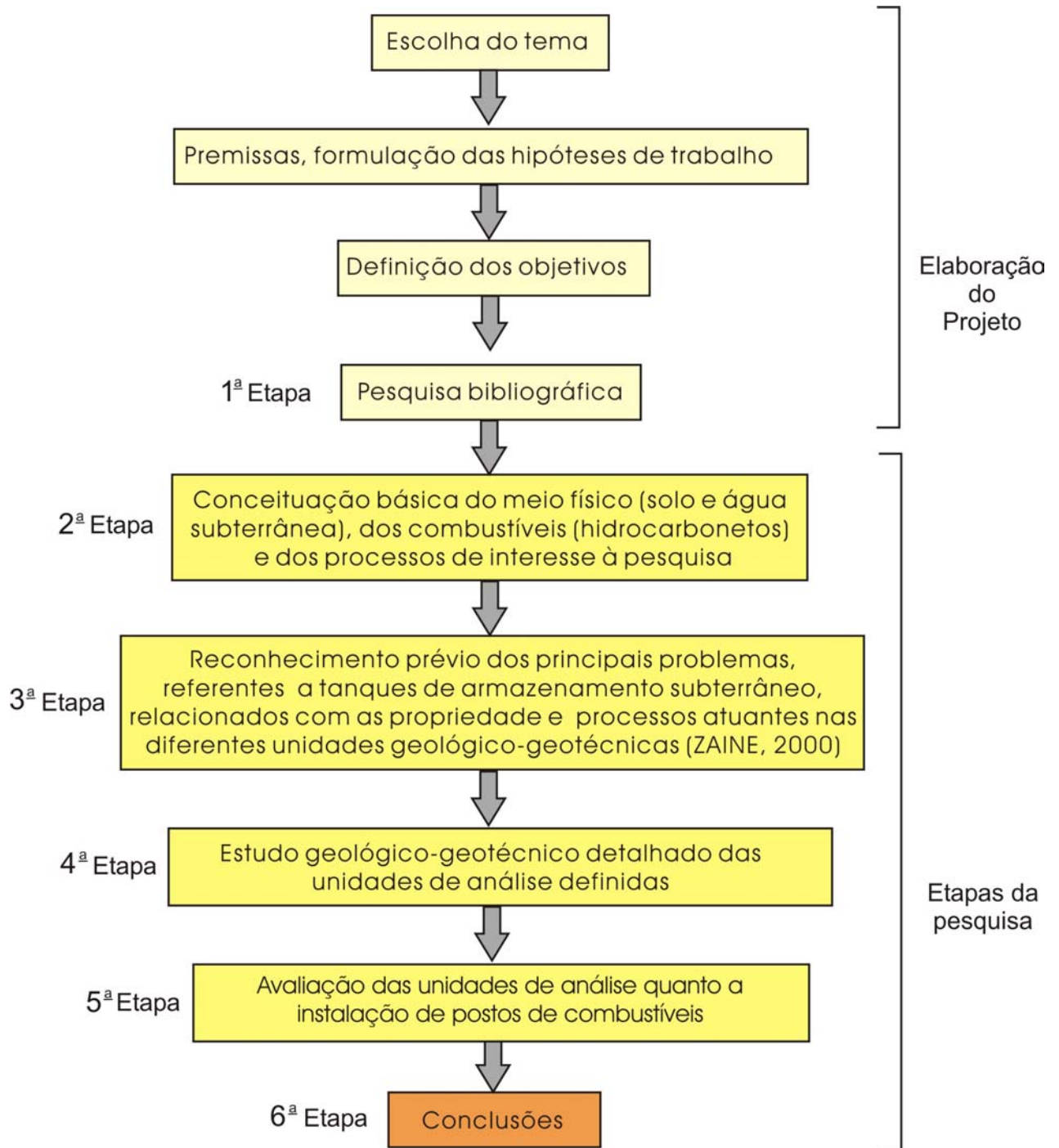


FIGURA 02: Fluxograma apresentando a síntese do método de trabalho mostrando a seqüência de etapas da pesquisa.

3. SITUAÇÃO LEGAL

Durante os anos 60, os Estados Unidos passaram por um grande desenvolvimento econômico marcado, no final da década de 70, por um aumento notável de vazamentos em tanques de combustível (OLIVEIRA, 1992). A EPA – Environmental Protection Agency estima que 375.000 tanques com derivados de petróleo e outras substâncias vazaram, de um total de 3 a 5 milhões de tanques (OLIVEIRA, 1992).

Em meados dos anos 80, a maioria dos tanques enterrados eram feitos de aço que sofria corrosão com o tempo e desta maneira a substância armazenada era liberada para o meio ambiente. O mesmo pode acontecer com a instalação ou operação inadequada dos tanques. O maior perigo potencial relacionado aos tanques de armazenamento subterrâneo é que o hidrocarboneto armazenado pode vaziar e contaminar o solo e a água subterrânea, além do potencial de causar incêndios e explosões.

Em 1984 o congresso americano, adicionou o Subtítulo I ao “Ato para a Recuperação e Conservação dos Recursos” (Resource Conservation and Recovery Act), que regulamenta os tanques de armazenamento subterrâneo. Este subtítulo trata de detecção de vazamentos, padrões para novos tanques, plano de ação corretiva e seguros para proprietários (EPA, 2003a).

Acompanhando as tendências do desenvolvimento mundial, o Brasil durante a década de 70, apresentou um grande crescimento econômico e conseqüentemente aumentou a quantidade de postos de combustíveis. Experiência na Europa e Estados Unidos, mostrou que tanques de armazenamento subterrâneos de combustível corroem e vazam num período de 20 anos após a instalação, desde que não disponham de proteção catódica, sendo que em muitos casos vazam antes de 15 anos de idade. Vazamentos em tubulações ocorrem dentro dos 10 primeiros anos, devido a instalações mal realizadas ou operações inadequadas (OLIVEIRA, 1992).

No Brasil, a preocupação com os postos de combustíveis e seus tanques de armazenamento subterrâneo somados aos danos que podem causar ao meio ambiente só foram considerados na Resolução CONAMA nº 273 de 2000 que regulamenta a instalação destes empreendimentos. Esta resolução considera que instalações e sistemas de armazenamento de derivados de petróleo e outros combustíveis são potencialmente ou parcialmente poluidores e geradores de acidentes ambientais e têm como objetivo controlar e reduzir vazamentos destas substâncias. O não cumprimento das exigências previstas pela resolução federal impõe sanções penais previstas na Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998), Lei nº 6.938/1981 e no Decreto nº 3.179/1999 (CONAMA, 2000).

Os postos de combustíveis depois da Resolução CONAMA nº 273 passam a ser passivos de licenciamento ambiental (licença prévia, licença de instalação e licença de operação), o que antes não era exigido. Isto deve-se ao fato de grande parte dos estabelecimentos estarem localizados em áreas densamente povoadas, cujas populações correm riscos em casos de vazamentos de tanques, que podem provocar a contaminação do solo e das águas subterrâneas, além da possibilidade de incêndios e explosões. O licenciamento exige laudos de caracterização do terreno, planejamento do empreendimento, de acordo com as normas da ABNT e INMETRO, valendo também para postos em funcionamento.

De acordo com a CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, o Estado de São Paulo possui cerca de 8.400 postos de combustíveis, e revela que nos últimos anos houve um aumento significativo de ocorrências de vazamentos, fatores que contribuem para o risco de explosões e incêndios, além da contaminação do ar, solo, água subterrânea e superficial (CETESB, 2003).

Antes mesmo da Resolução CONAMA nº 273 entrar em vigor, alguns municípios brasileiros já se preocupavam com a situação dos postos de combustíveis e seus tanques de armazenamento subterrâneo.

Em 1996, o Município de Porto Alegre no Estado do Rio Grande do Sul, estabelece o Decreto nº 11.423 que dispõe sobre o armazenamento subterrâneo de combustíveis, solicitando informações sobre as condições do terreno, como a caracterização do solo, comportamento hidrogeológico e laudos conclusivos para o licenciamento do empreendimento, além da apresentação de projetos de instalação.

O Município de Rio Claro em 1998 promulga a Lei nº 2.942 que regula a construção de Postos de abastecimento e Serviços de veículos e solicita em um dos

seus artigos, a apresentação de um laudo técnico com a caracterização da área do empreendimento, dados sobre estanqueidade dos tanques e estabilidade do solo (RIO CLARO, 1998).

4. BASE TEÓRICA

4.1. Propriedades físicas do meio

Serão abordados neste item algumas propriedades do meio físico que serão importantes na caracterização geológico-geotécnica dos terrenos para a implantação de postos de combustíveis, além de contribuir para o entendimento da relação destas propriedades com os hidrocarbonetos e processos atuantes no meio físico.

4.1.1. Índices físicos

O solo é um sistema trifásico (sólido, líquido e gás) onde a fase sólida é um conjunto discreto de partículas minerais que formam uma estrutura porosa que contará com elementos constituintes das fases líquida e gasosa (ar, vapor de água) (NOGUEIRA, 1988) (FIGURA 03).

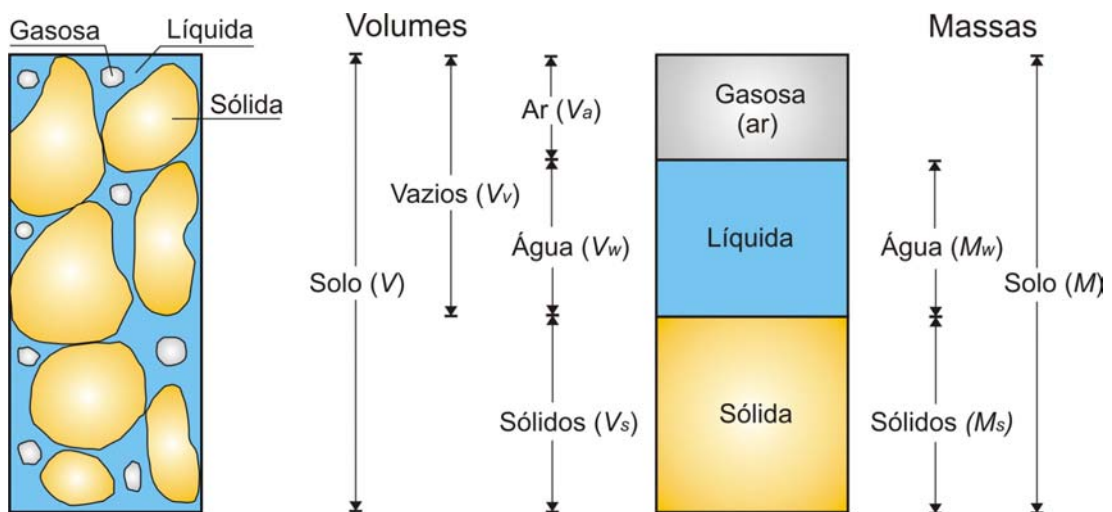


FIGURA 03: Solo e suas fases com indicação de volumes e massas de seus constituintes (Modificado de NOGUEIRA, 1988).

Os índices físicos do solo são utilizados para a caracterização das condições do solo, podendo ser alterados ao longo do tempo (NOGUEIRA, 1988). As propriedades do solo dependem dos seus constituintes e das proporções relativas entre eles, assim como das interações entre suas fases (CAPUTO, 1977a) (FIGURA 03)

Define-se índice físico de um solo como sendo a relação entre volume, entre massa, e entre massa e volume das fases constituintes do solo (NOGUEIRA, 1988) (QUADRO 02).

O *Teor de umidade* (w) de um solo é a relação entre massa de água e a massa de sólidos, existentes em um mesmo volume de solo, expressa em porcentagem. (NOGUEIRA, 1988).

A *Porosidade* (n) é a razão entre o volume de vazios e o volume total de solo, sendo expressa em porcentagem. Qualquer variação no volume de um solo será acompanhada de igual variação no seu volume de vazios (NOGUEIRA, 1988). O termo porosidade efetiva reflete o grau de intercomunicação entre os poros, permitindo a percolação da água, sendo expressa pela relação entre volume ocupado pela água livre e o volume total (AZEVEDO e ALBUQUERQUE FILHO, 1998). A porosidade secundária está relacionada a meios geológicos fraturados, que permite a migração preferencial dos fluidos.

O *Índice de vazios* (e) é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos existentes em um igual volume de solo. Deformações volumétricas são proporcionais a uma variação no índice de vazios, quanto maior o índice de vazios maior a deformação volumétrica quando o material é comprimido (ORTIGÃO, 1995). O índice de vazios tem grande importância no comportamento colapsível do solo, que será abordado posteriormente.

O *Grau de saturação* (S_r) nada mais é que a porcentagem de água contida nos vazios do solo, expressa pela razão entre o volume de água e o volume de vazios. O grau de saturação é igual a 100% nos materiais saturados, isto é, quando os vazios estão totalmente preenchidos por água (ORTIGÃO, 1995).

A *Massa específica do solo* (ρ) é a relação entre massa do solo e o volume do solo para qualquer valor de grau de saturação. Para $S_r = 0\%$ tem-se a *massa específica seca* (ρ_d) dada pela relação entre massa dos sólidos (M_s) e volume do solo, para $S_r = 100\%$ tem-se a *massa específica saturada* (ρ_{sat}), relação entre massa saturada e o volume total. A *massa específica submersa* (ρ_{sub}) é designada para a

camada de solo abaixo do nível d'água, que é a diferença entre massa específica saturada e massa específica da água. A *Massa específica dos sólidos* (ρ_s) é a relação entre massa dos sólidos e volume dos mesmos.

A determinação dos índices físicos também pode ser realizada mediante o emprego de fórmulas de correlação (QUADRO 02).

QUADRO 02: Índices físicos do solo.

| ÍNDICES FÍSICOS | SÍMBOLO | EQUAÇÃO |
|-------------------------------------|--------------|--|
| <i>Teor de umidade</i> | w | $w = M_w / M_s$ |
| <i>Porosidade</i> | n | $N = V_v / V$ |
| <i>Índices de vazios</i> | e | $e = V_v / V_s$ |
| <i>Grau de saturação</i> | Sr | $Sr = V_w / V_v$ |
| <i>Massa específica dos sólidos</i> | ρ_s | $\rho_s = M_s / V_s$ |
| <i>Massa específica do solo</i> | ρ | $\rho = M / V$ |
| <i>Massa específica seca</i> | ρ_d | $\rho_d = M_s / V$ ou $\rho / 1+w$ |
| <i>Massa específica saturada</i> | ρ_{sat} | $\rho_{sat} = M_{sat} / V$ |
| <i>Massa específica submersa</i> | ρ_{sub} | $\rho_{sub} = \rho_{sat} - \rho_w$ (<i>massa específica da água</i>) |

4.1.2. Condutividade hidráulica

Permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele (CAPUTO, 1977a). O Coeficiente de permeabilidade foi determinado pela “Lei de Darcy”, de acordo com a qual, a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico. Esta lei é válida para um escoamento laminar, que é definido quando a trajetória das partículas d'água não se cortam (CAPUTO, 1977a). Este coeficiente pode ser chamado de **condutividade hidráulica**, que leva em conta as características do meio incluindo: porosidade, tamanho, forma e arranjo das partículas, distribuição e as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica) (CABRAL, 2000).

Como a condutividade hidráulica depende das características do meio poroso e das propriedades do fluido, um fluido viscoso terá em meio poroso, velocidade diferente da velocidade da água, que tem baixa viscosidade (CABRAL,

2000). A condutividade pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido da seguinte forma:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{\nu}$$

onde:

K = condutividade hidráulica

k = permeabilidade intrínseca do meio poroso

ρ e μ = características do fluido, massa específica (ρ)
viscosidade absoluta (μ). Utiliza-se também a
viscosidade cinemática $\nu = \mu / \rho$

g = aceleração da gravidade

A **permeabilidade intrínseca**, também chamada de permeabilidade específica, é função do tipo de material poroso, sua granulometria e disposição estrutural. Segundo Cabral (2000) vários estudos em sedimentos não consolidados comprovam as seguintes conclusões:

- Quanto maior o tamanho médio dos grãos do solo, maior a permeabilidade (vazios maiores);
- Quanto maior o desvio padrão do diâmetro das partículas, menor a permeabilidade (o aumento do desvio padrão indica maior variação do tamanho dos grãos, grãos pequenos ocupando espaços vazios entre os grãos grandes).
- Amostras com um tamanho de grãos uniformes apresentam maior permeabilidade.

Mello e Teixeira (1960) acrescentam outros fatores que influenciam condutividade hidráulica:

- a) influência da temperatura e da viscosidade da água. A condutividade hidráulica é proporcional a densidade do fluido (água) e inversamente proporcional à viscosidade do mesmo. Por sua vez, estes parâmetros variam com a temperatura, assim a condutividade hidráulica aumenta com a temperatura;
- b) influência do arranjo estrutural dos grãos: a disposição das partículas que formam o arcabouço sólido, tem influência na condutividade hidráulica dos solos, tendo como exemplo:
 - solo estratificado: $K_{\text{horizontal}} > K_{\text{vertical}}$;
 - solo sedimentar amalgamado: $K_{\text{indeformado}} \gg K_{\text{amalgamado}}$
 - solo compactado mecanicamente: $K_{\text{horizontal}} \gg K_{\text{vertical}}$

- c) influência do grau de saturação: são observadas maiores condutividades hidráulica a medida que os solos tendem a tornarem-se saturados, a presença de ar dificulta a passagem d'água.

TABELA 01: Valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais inconsolidados (FETTER, 1999).

| Material | Permeabilidade intrínseca (darcys)* | Condutividade Hidráulica (cm/s) |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Argila | $10^{-6} - 10^{-3}$ | $10^{-9} - 10^{-6}$ |
| Silte, silte arenoso, areia argilosa | $10^{-3} - 10^{-1}$ | $10^{-6} - 10^{-4}$ |
| Areia siltosa, areia fina | $10^{-2} - 1$ | $10^{-5} - 10^{-3}$ |
| Areia bem distribuída | $1 - 10^2$ | $10^{-3} - 10^{-1}$ |
| Cascalho bem distribuído | $10 - 10^3$ | $10^{-2} - 1$ |

* 1darcy = $9,87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$

Segundo Casagrande e Fadum (apud TERZAGHI e PECH, 1962) os terrenos podem ser de “boa drenabilidade”, quando apresentam condutividade hidráulica com valores maiores que 10^{-4} cm/s , de “difícil drenabilidade” com K variando entre 10^{-4} a 10^{-6} cm/s e “praticamente impermeável” quando K for menor que 10^{-6} cm/s .

Para Vargas (1978) os solos podem ser classificados quanto a sua permeabilidade, nas seguintes classes (TABELA 02):

TABELA 02: Classificação dos solos quanto à condutividade hidráulica (VARGAS, 1978).

| | Grau de permeabilidade | Tipos de solos | Coefficiente de Permeabilidade a 20°C (cm/s) |
|--------------------|------------------------|-----------------|--|
| Solos Permeáveis | Alta | Pedregulhos | $> 10^{-1}$ |
| | Média | Areias | 10^{-1} a 10^{-3} |
| | Baixa | Silte e Argilas | 10^{-3} a 10^{-5} |
| Solos Impermeáveis | Muito Baixa | Argilas | 10^{-5} a 10^{-7} |
| | Baixíssima | Argilas | $< 10^{-7}$ |

A condutividade hidráulica tem sua importância devido à maior ou menor facilidade de deixar passar a água, determinando na maior parte dos casos, a principal componente da propagação dos contaminantes. Quanto menor a condutividade hidráulica, menor a velocidade de migração do contaminante. Isso significará menor volume contaminado e mais tempo para as intervenções necessárias à remediação.

Zuquette (1987) adota para o mapeamento geotécnico a classificação da permeabilidade como:

Alta - Materiais permeáveis $k > 10^{-3}$ cm/s

Razoável - Materiais semi-permeáveis $10^{-3} > k > 10^{-5}$ cm/s

Baixa - Materiais impermeáveis $k < 10^{-5}$ cm/s

O coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica do terreno é o fator determinante para a infiltração da água contendo substâncias contaminantes. O coeficiente de permeabilidade de areias grossas e cascalhos varia, de acordo com sua granulometria, entre 0,86 e 86,40 m/dia; as areias finas apresentam um coeficiente oscilante entre $8,64 \times 10^{-5}$ e 0,86 m/dia; enquanto que as argilas apresentam coeficientes da ordem de $8,64 \times 10^{-7}$ e $8,64 \times 10^{-5}$ m/dia (YASSUDA *et al.*, 1965 apud GUIMARÃES, 2000). Analisando esses valores conclui-se que a infiltração do material contaminante em um terreno arenoso se faz com velocidades um milhão de vezes superior às que ocorrem nas argilas.

4.1.3. Textura e Granulometria

O tamanho relativo dos grãos que formam a fase sólida dos solos é chamado de textura e sua medida é denominada granulometria. A análise granulométrica é a determinação das dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram, representada pela curva granulométrica (CAPUTO, 1977a). Por sua vez a análise granulométrica tem aplicação prática na classificação textural do solo e na estimativa da condutividade hidráulica.

A curva é traçada num diagrama semi-logarítmico onde tem-se dimensões das partículas nas abscissas (escala logarítmica) e porcentagem acumulada de material nas ordenadas (escala aritmética).

Os ensaios granulométricos são realizados utilizando-se o método do peneiramento para separação das frações arenosas e sedimentação para a quantificação da fração silte e argila.

A uniformidade de um solo pode ser expressa pelo coeficiente de uniformidade, obtido a partir da curva granulométrica, que é a relação entre os diâmetros correspondentes a 60% e 10% do material que passa. Um solo é considerado uniforme quando seu coeficiente é menor que 2.

A textura do solo pode definir a menor ou maior capacidade do substrato se deixar atravessar por contaminantes e também tem influência sobre a capacidade de carga do substrato. A textura argilo-arenosa apresenta boa capacidade de depuração por parte da argila e boa capacidade de carga por parte da areia, apresentando ainda, baixa permeabilidade; por outro lado, textura muito arenosa resulta numa boa capacidade de carga, mas a alta permeabilidade resulta na passagem do contaminante.

Em relação às características granulométricas, são mais favoráveis os materiais com diâmetro médio de grãos predominantemente entre 0,002 e 0,001 mm (10^{-8} cm/s < k < 10^{-6} cm/s) (GUIMARÃES, 2000).

4.1.4. Limites de consistência

O comportamento de um solo argiloso varia com seu teor de umidade, podendo passar de um estado líquido para um estado sólido tendo vários estados intermediários. Os teores de umidade limite entre os vários estados de consistência dos solos argilosos são denominados de limites de consistência ou limites de Atterberg, nome do cientista que primeiro se preocupou com estabelecimento destes limites (FIGURA 04).

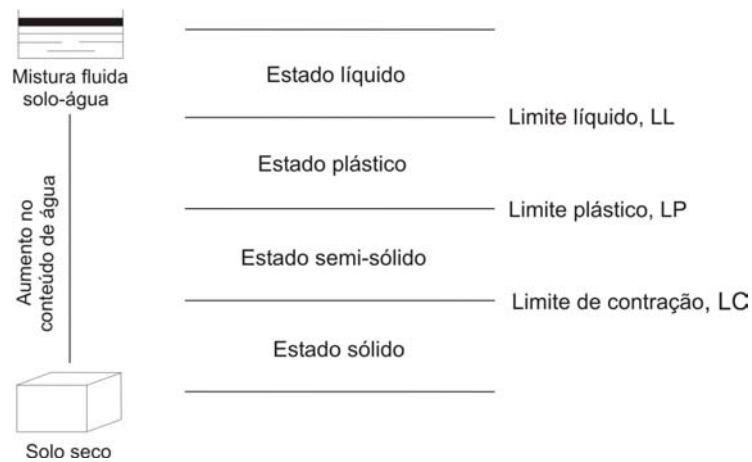


FIGURA 04: Limites de Atterberg. (Fonte: LAMBE, 1979).

Um solo está no estado sólido quando está seco, e conforme o conteúdo de água é aumentado passa pelos estados: semi-sólido, plástico e líquido. Os limites entre um estado e outro são denominados limite de contração, limite plástico e limite líquido como se observa na FIGURA 04 (LAMBE, 1979), sendo estes limites aproximados, devido a passagem gradativa entre eles.

A plasticidade pode ser definida como a habilidade de um material mudar de forma continuamente sobre influência de uma tensão e manter a nova forma após a remoção da tensão. Apenas as menores partículas do solo e as argilas exibem este comportamento (TABELA 03) que é apresentado sobre certo conteúdo de água (LAMBE, 1979). O limite plástico é aquele que sob um determinado conteúdo de água exibe comportamento plástico, acima deste limite o solo pode ser deformado sem mudanças de volume ou rupturas (MITCHELL, 1993), para o limite líquido a mudança é do comportamento plástico para o fluido (YONG e WARKENTIN, 1975).

TABELA 03: Limites de consistência de alguns argilo-minerais, em função de sua forma iônica (NOGUEIRA, 1988).

| <i>Argilo-Mineral</i> | <i>LL (%)</i> | <i>LP (%)</i> | <i>LC (%)</i> |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| Montmorilonita | 100 – 900 | 50 – 100 | 8,5 – 15 |
| Ilita | 60 – 120 | 35 – 60 | 15 - 17 |
| Haloisita: | | | |
| - hidratada | 50 – 70 | 47 – 60 | - |
| - não hidratada | 35 – 55 | 30 – 45 | - |
| Clorita | 44 – 47 | 36 – 40 | - |
| Caolinita | 30 – 110 | 25 – 40 | 25 – 29 |

O intervalo de variação do teor de umidade, no qual o solo se encontra em estado plástico, é definido como índice de plasticidade $IP = LL - LP$. Quanto maior IP, mais plástico será o solo, quando não apresenta plasticidade (ex.: areia) considera-se não plástico ($IP = NP$) (CAPUTO, 1977a).

A matéria orgânica num solo pode ser responsável pela alta plasticidade, alta contração, alta compressibilidade, baixa condutividade hidráulica e baixa resistência. Uma pequena porcentagem de matéria orgânica eleva o valor do LP (limite plástico), sem elevar simultaneamente o LL (limite líquido), apresentando portanto, baixos valores de IP. Sabe-se ainda que as argilas são mais compressíveis quanto maior IP (CAPUTO, 1977a). Solos com matéria orgânica têm uma complexidade física e química, e uma variedade de reações e interações entre o solo e a matéria orgânica são possíveis. Em altos teores de umidade, a matéria orgânica decomposta pode se comportar como um sistema reversível de expansão. Durante alguns estágios críticos de secamento esta reversibilidade cessa e é muitas vezes manifestada pela grande diminuição nos limites de Atterberg, como resultado do secamento (MITCHELL, 1993).

4.1.5. Propriedades da fração argilosa do solo

A fração argilosa dos solos é na maioria das vezes definida como a parte coloidal dos mesmos, sendo constituída por um ou mais argilo-minerais, sílica coloidal, cristais de quartzo com tamanho argila, microgrãos de óxido de ferro e matéria orgânica (VARGAS, 1978).

Os argilo-minerais apresentam íons O^{2-} e OH^- que desempenham um papel importante na configuração geral da estrutura, construindo elementos estruturais, tetraedros e octaedros dispostos em camadas alternadas, no espaçamento entre eles e nos elementos químicos envolvidos (FRASCÁ e SARTORI, 1998).

Segundo Vargas (1978) a plasticidade e coesão de um solo dependem, além do teor de umidade, da espécie mineralógica presente e de suas propriedades coloidais. Os grupos de espécies mineralógicas que mais ocorrem são as caolinitas, as illitas e as montmorilonitas, em que na ordem que foram denominados, apresentam um crescimento da plasticidade e coesão.

Os membros do grupo das caolinitas são formados de camadas de silicatos 1:1, sua composição química é $(OH)_8Al_4Si_4O_{10}$ e as espécies deste grupo apresentam pequena variação química assim como sua substituição isomórfica é muito limitada, diferindo da maioria dos outros minerais de argila (GILLOTT, 1987).

As esmectitas são camadas de silicatos 2:1, onde a substituição iônica nas camadas resulta de cargas negativas que podem ser localizadas entre as folhas de tetraedros ou octaedros. Assim a característica mais distintiva das esmectitas é que a água e líquidos orgânicos podem penetrar entre as camadas e desta forma o espaçamento basal é variável. A água que penetra é acompanhada por um grande aumento no volume e um grande aumento de pressões é gerado (GILLOTT, 1987). A montmorilonita é um dos minerais mais importantes deste grupo, sua composição química, na ausência de substituição isomórfica, é $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot n H_2O$. O alumínio pode ser trocado por ferro ou magnésio, como ocorre na notronita, mineral encontrado na decomposição do basalto e extremamente expansivo (VARGAS, 1978).

A estrutura das ilitas $(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4Mg_6)(Si_{8-y}Al_y)$ é semelhante a das montmorilonitas, exceto que a grande parte do Si (quadrivalente) é substituído por Al (trivalente), onde a compensação é feita por K (monovalente). A ilita apresenta estrutura semelhante também a da muscovita, entretanto contém menos potássio, mais água e mostra variabilidade estrutural (GILLOTT, 1987).

4.1.5.1. Capacidade de troca de cátions

Sob determinadas condições as argilas adsorvem diferentes quantidades e tipos de cátions, que quando adsorvidos irão balancear a deficiência de carga das partículas sólidas. As reações de troca podem ocorrer em resposta às mudanças nas condições do meio, envolvendo substituição de uma parte ou de todos os íons adsorvidos de um tipo por outro. As reações de troca não afetam a estrutura das partículas de argila, mas podem resultar em importantes mudanças nas propriedades físicas e físico-químicas do solo (MITCHELL, 1993). Assim a capacidade de troca de cátions (CTC) é a medida quantitativa da habilidade de uma superfície mineral adsorver íons (BOULDING, 1995), variando de acordo com a espécie mineral.

QUADRO 03: Variação da CTC de acordo com a espécie mineral (Modificado de BOULDING, 1995).

| Tipos de Argila | | | |
|---|----------------|--------|-----------|
| Propriedades | montmorilonita | Ilita | Caolinita |
| Estrutura | 2:1 | 2:1 | 1:1 |
| Área de superfície específica (m ² /g) | 700-800 | 65-120 | 7-30 |
| Capacidade de expansão | Alta | Média | Baixa |
| Capacidade de troca cátions (meq/100g) | 80-150 | 10-40 | 3-15 |

O QUADRO 03 sumariza algumas propriedades de diferentes minerais de argila. O grupo montmorilonita é o mais sensível à expansão e tem uma alta capacidade de troca de cátions. Este tipo de argila tem estas características por causa da estrutura 2:1 formando folhas que são conectadas por cátions trocáveis. O local de troca entre camadas 2:1 pode ser facilmente hidratado (moléculas de água adsorvidas) sobre certas condições. Pela molécula de água possuir um diâmetro maior que os cátions que seguram as folhas, a hidratação distancia as folhas. A estrutura 1:1 da caolinita cria vínculos muito fortes entre os pares de folhas, resultando numa baixa área de superfície e baixa capacidade de troca cationica (CTC). A ilita tem intermediárias áreas de superfície, CTC e sensibilidade para expansão (BOULDING, 1995).

Muitas vezes a troca de cátions envolve moléculas orgânicas, esta interação entre argila e material orgânico tem se tornado de grande interesse para a geotecnia e meio ambiente, pela necessidade de solucionar problemas relacionados com contaminação, migração e remediação de substância tóxica.

A CTC (capacidade de troca catiônica) constitui-se em fator bastante importante na retenção dos poluentes orgânicos e outros íons menos móveis, indicando a capacidade de retenção de poluentes pelo material inconsolidado. A CTC é a maior ou menor capacidade que a argila possui em trocar cátions para neutralizar as cargas negativas, sendo função da textura, mineralogia e pH do solo (GUIMARÃES, 2000).

Materiais com alta CTC apresentam-se mais favoráveis à retenção de poluentes, contrariamente àqueles com baixos valores de CTC. Souza e Zuquette (1993) recomendam um valor de CTC maior que 15 meq/100g (áreas para disposição de resíduos). Alguns autores classificam como CTC baixa, aquelas menores que 5 meq/100g e alta aquelas maiores de 15 meq/100g. Para Leite e Zuquette (1996) o valor seria maior ou igual a 10 meq/100g, no que se refere à implantação de qualquer tipo de fonte contaminante.

A interação orgânica com as argilas se dá pela adsorção na superfície das partículas, troca iônica e intercalação. A intercalação envolve a entrada de moléculas orgânicas entre as camadas de sílica, particularmente importante nas caolinitas. A adsorção de compostos orgânicos na superfície das argilas, em um sistema aquoso, depende da superfície disponível e da habilidade das moléculas orgânicas deslocar moléculas de água. Cátions orgânicos podem ser trocados com cátions inorgânicos adsorvidos, entretanto se o cátion orgânico for maior, todos os cátions trocáveis não poderão ser deslocados. A atração de moléculas grandes para a superfície da argila, pela forças de van der Waals podem contribuir para a quantidade total de material orgânico preso na argila (MITCHELL, 1993).

A CTC pode ser alterada se houver variação do pH e à medida que o material vai sendo saturado pela passagem do contaminante, seu valor vai diminuindo (GUIMARÃES, 2000).

4.1.5.2. Atividade

O tipo e a quantidade de argila no solo influenciam suas propriedades, e os limites de Atterberg refletem estes fatores. Eskempton (1953 apud VARGAS, 1978; GILLOTT, 1987; MITCHELL, 1995;) dá o nome de **atividade** à razão entre o índice de plasticidade IP e a fração de argila do solo (TABELA 04). A atividade de um solo fornece a medida do índice de plasticidade IP da fração argila (MITCHELL, 1993).

Os limites de Atterberg estão relacionados com a quantidade de água que é atraída para a superfície das partículas do solo. Por causa do grande aumento na área de superfície por massa com a diminuição do tamanho das partículas, pode se esperar que a quantidade de água atraída será amplamente influenciada pela

quantidade de argila presente no solo baseado nisto Ekemptom definiu a atividade (LAMBE, 1979).

TABELA 04: Classificação das argilas em termos de atividade (MITCHELL, 1993).

| Descrição da argila | Atividade |
|----------------------------|------------------|
| Inativa | <0,75 |
| Normal | 0,75 – 1,25 |
| Ativa | >1,25 |

4.1.5.3. Coesão

De acordo com Vargas (1978) a coesão pode ser definida como a resistência ao cisalhamento de um solo, quando sobre ele não atua pressão externa alguma, esta resistência é dada pela fração argilosa do solo que o torna capaz de se manter coeso. Esta resistência pode ter 3 origens:

- 1- Efeito da existência de um cimento natural que aglutina os grãos do solo. Esse cimento são grãos muito finos (óxidos, hidróxidos, carbonatos e cimentos argilosos);
- 2- Efeito de eventual ligação entre os grãos, exercida pelo potencial atrativo de natureza molecular ou coloidal que exerce pressão também sobre a água intersticial. Forma-se uma camada de água adsorvida envolvendo os grãos, contribuindo para o aumento da ligação entre os grãos, tendo origem a coesão verdadeira;
- 3- Efeito da pressão capilar na água intersticial quando o solo sofre efeito de ruptura. Os grãos tendem a mover-se um em relação aos outros, formando meniscos capilares entre seus pontos de contato. Os grãos são pressionados pelo efeito da tensão superficial que age no contato entre os grãos e no filme de água. Este efeito é denominado coesão aparente ou apenas coesão.

4.2. Água Subterrânea

Neste item será abordado o comportamento da água tanto no que se refere ao ciclo hidrológico, quanto em subsuperfície, onde movimentação do contaminante (hidrocarboneto) está diretamente ligada ao fluxo d'água subterrâneo.

4.2.1. Ciclo Hidrológico

Sessenta por cento da superfície da terra é coberta por água. Mais de 90% dessa água é encontrada nos oceanos, fonte virtual de toda água encontrada na massa continental. O processo que distribui o suprimento de água do mundo é o ciclo hidrológico (ROSCOE MOSS COMPANY, 1990) (FIGURA 05).

O ciclo hidrológico envolve um contínuo movimento da água entre a atmosfera, água de superfície e o terreno. O sistema de água subterrânea deve ser entendido pela relação entre a água de superfície e umidade atmosférica. Grande parte das recargas de água subterrânea vêm da atmosfera na forma de precipitação, rios, lagos etc. A água penetra no solo, assim como a precipitação retorna para atmosfera pela evapotranspiração antes de alcançar a zona saturada. A água que alcança a zona saturada volta novamente à superfície, fluindo para um ponto de descarga na superfície, tipicamente estes pontos são rios, lagos ou oceano. O solo, a geologia e o clima irão determinar a quantidade e a taxa de fluxo entre a atmosfera, superfície e o sistema de água subterrânea (BOULDING, 1995).

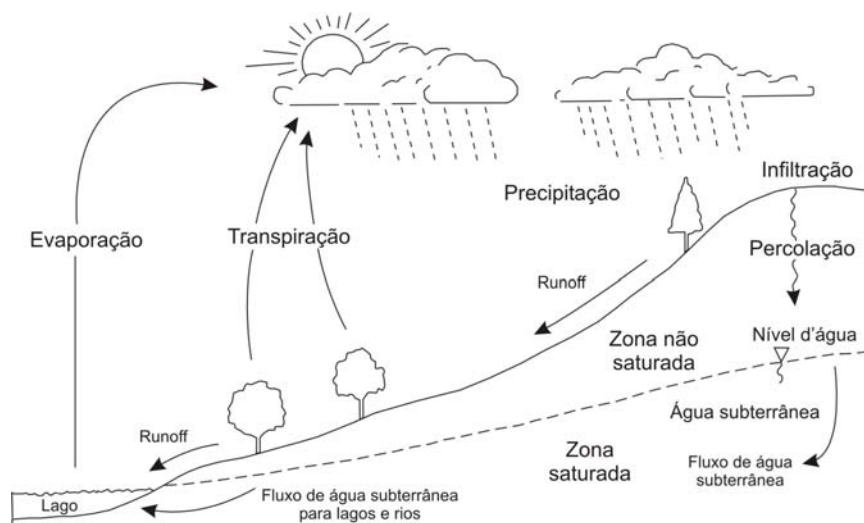


FIGURA 05: Ciclo hidrológico (Fonte: ROSCOE MOSS COMPANY, 1990).

4.2.2. Zonas de umidade do solo

O solo, onde se inicia a penetração da água superficial através da infiltração, pode ser dividido em dois compartimentos segundo seu teor de umidade (FIGURA 06): a zona não saturada ou vadosa e a zona saturada (AZEVEDO e ALBUQUERQUE FILHO, 1998).

A zona vadosa se localiza imediatamente abaixo da superfície do terreno, onde parte dos espaços intergranulares está preenchido com água e a outra parte, com ar (AZEVEDO e ALBUQUERQUE FILHO, 1998) (FIGURA 06).

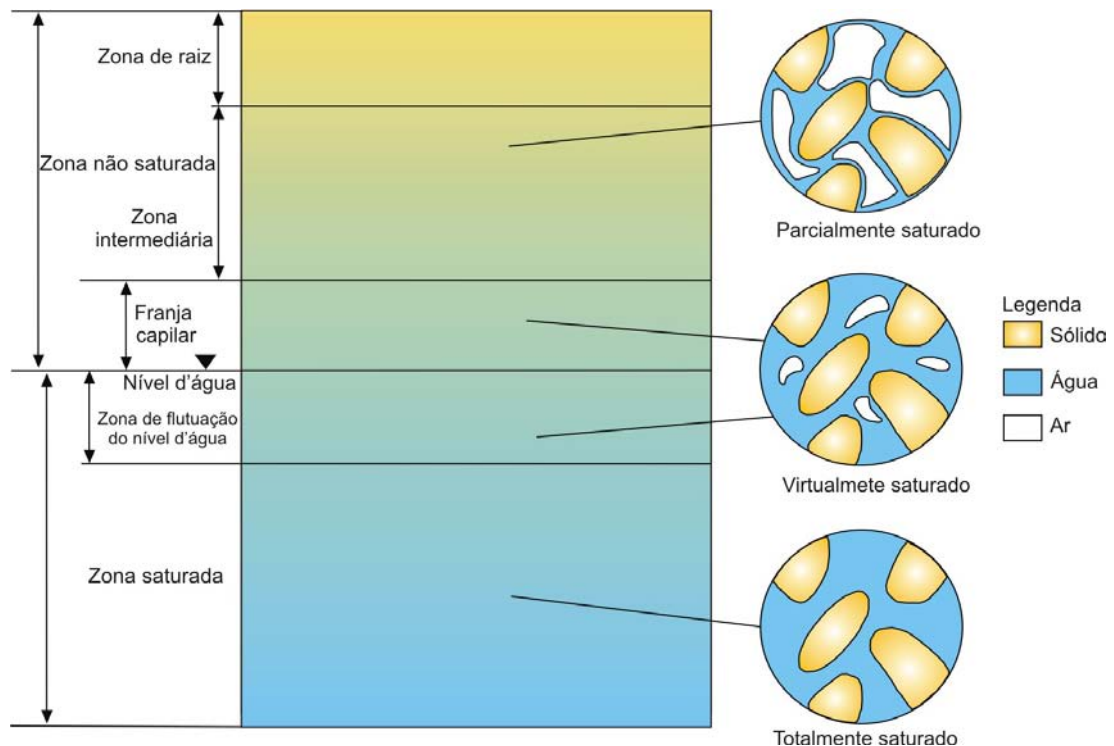


FIGURA 06: Subdivisões do solo segundo seu teor de umidade (Modificado de GUIGUER, 2000).

Esta porção do solo é muito importante na hidrologia do contaminante, por ser um importante reservatório de captura, armazenamento e fonte de liberação de contaminante (BOULDING, 1995).

A zona vadosa apresenta três grandes subdivisões (FIGURA 06):

- *Zona solo-água ou zona de raiz*: está situada entre a superfície do terreno e a máxima profundidade que as raízes de vegetação penetram. É caracterizada

pela ampla flutuação na qualidade e quantidade de umidade em resposta a transpiração e evapotranspiração (BOULDING, 1995). A água na zona raiz é denominada água higroscópica, que envolve o grão do solo, particularmente solos argilosos, formando uma camada muito fina da ordem de grandeza de algumas moléculas, devido a atração molecular. Esta água está fortemente presa ao grão do solo e sujeita a pressões elevadas, de tal forma que não se movimenta. Forças gravitacionais ou de capilaridade não conseguem movê-la (AZEVEDO e ALBUQUERQUE FILHO, 1998).

- *Zona intermediária:* está compreendida entre o limite da franja capilar (ascensão capilar) e o limite de alcance das raízes das plantas. A água encontrada nesta zona forma uma película de espessura variável em volta dos grãos de solo, estando submetida a atrações moleculares e a tensões superficiais. Forças gravitacionais não a movimentam, porém ela pode migrar de grão para grão. A espessura desse filmes de água é que determina alguma das propriedades físicas dos solos como coesão e capilaridade (AZEVEDO e ALBUQUERQUE FILHO, 1998). A partir de uma quantidade significativa de ar nos poros, a água gravitacional que alcança esta zona se move relativamente devagar para a zona saturada (BOULDING, 1995).
- *Franja Capilar:* marca o final da transição entre a zona vadosa e a zona saturada. A capilaridade se deve a força de atração sólido-água e a tensão superficial da água. Para água, a altura da ascensão capilar em um canalículo pode ser calculada pela expressão $h = 0,15 / r$, onde r é o raio do canalículo. Em outras palavras, quanto menor o diâmetro, maior é a ascensão capilar.

A *zona saturada* fica abaixo da superfície freática (nível d' água) e nela todos os vazios existentes no terreno estão preenchidos com água. A superfície freática é definida como o lugar geométrico dos pontos em que a água se encontra submetida à pressão atmosférica. É uma superfície real na qual a pressão é zero.

Segundo Azevedo e Albuquerque Filho (1998) materiais ou rochas que armazenam água e permitem sua circulação são denominados aquíferos. Quando o nível d'água subterrâneo está submetido a pressões iguais à atmosférica tem-se os aquíferos ditos livres e, quando submetido a pressões superiores caracteriza-se o aquífero confinado. O fluxo da água subterrânea é controlado por propriedades específicas como porosidade e permeabilidade.

4.3. Características dos combustíveis derivados de petróleo

Os hidrocarbonetos de petróleo são derivados do óleo cru bruto, que é refinado em uma gama de produtos por meio de vários processos. Os produtos do petróleo refinado são uma mistura de centenas de compostos, que podem ser classificados com base na composição e propriedades físicas. Os maiores grupos de produtos estocados em tanques subterrâneos de armazenamento são (EPA, 2003b):

- Gasolinas;
- Destilados médios;
- Óleos combustíveis pesados.

A **gasolina** é uma mistura de hidrocarbonetos e outros aditivos químicos, como os álcoois, (ex.: etanol) e éteres (ex.: metil-terc-butil éter, ou MTBE). A gasolina é mais móvel que os destilados médios ou os óleos combustíveis. A alta mobilidade da gasolina se deve ao fato de seus componentes possuírem baixos pesos moleculares. Compostos de hidrocarbonetos usualmente encontrados na gasolina têm entre 4 e 10 átomos de carbono por molécula. O peso molecular mais baixo resulta em uma baixa viscosidade, alta volatilidade, e moderada solubilidade em água (EPA, 2003b).

A gasolina contém altas porcentagens de hidrocarbonetos aromáticos (ex.: aqueles com anel de benzeno com 6 carbonos), que está entre os compostos de hidrocarbonetos mais solúveis e tóxicos. Os compostos aromáticos mais freqüentemente encontrados são benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX). Pela sua volatilidade relativamente alta, solubilidade e biodegradabilidade, os compostos de BTEX estão entre os primeiros a serem esgotados da pluma de contaminação (produto livre). Em vazamentos antigos de gasolina, a pluma pode conter relativamente pouco BTEX, sendo rica em componentes mais pesados, menos solúvel e menos biodegradáveis. Como consequência o produto será mais viscosos, levemente mais denso, menos volátil e menos móvel que o produto recém vazado (EPA, 2003b).

Os aditivos (ex.: etanol, MTBE) são muito solúveis e se dissolvem preferencialmente em água subterrânea, que diminui a concentração desses aditivos no produto livre, mas resulta na formação de plumas dissolvidas mais extensas. O MTBE também se distancia da fonte mais rápido que o produto livre e por ser relativamente não degradável, é de difícil remediação (EPA, 2003b).

Os **destilados médios** (ex.: diesel, querosene, combustível para aviação, óleos combustíveis mais leves) podem conter 500 compostos individuais, mas tendem a ser mais densos, muito menos voláteis, menos solúveis na água e menos móveis que os compostos encontrados na gasolina. Os maiores componentes individuais nesta categoria de hidrocarbonetos contêm entre 9 a 20 átomos de carbono cada. Hidrocarbonetos aromáticos mais leves como o BTEX, são geralmente encontrados como traços nos médios destilados, e quando estão inicialmente presentes, geralmente não são mais encontrados em plumas de antigos vazamentos, por terem se biodegradado, evaporado e dissolvido na água subterrânea (EPA, 2003b).

Aditivos e oxigenados estão presentes tanto nas gasolinas quanto nos destilados médios. Os aditivos são constituídos de antioxidantes, inibidores de metal e detergentes, que formam 0,5 % (em volume) da gasolina e do diesel. Os oxigenados presentes na gasolina consistem de intensificadores de octano, como álcoois e éteres constituindo até 10% , ou mais, em volume de algumas gasolinas (GUIGUER, 2000).

Os **óleos combustíveis pesados** possuem composição e características similares aos destilados médios. Este tipo de combustível é relativamente mais viscoso e insolúvel em água sendo imóveis em subsuperfície. A maioria dos compostos encontrados no óleo combustível pesado possuem mais de 14 átomos de carbono, alguns mais de 30. Assim como nos antigos vazamentos de destilados médios e gasolinas, os componentes mais leves estão presentes apenas como traços por serem mais prontamente biodegradados e dispersados (EPA, 2003b).

Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos, ditos parcialmente miscíveis em água, NAPL – non aqueous phase liquid ou fase líquida não aquosa, existem dois tipos de NAPL:

- LNAPLs (light non- aqueous phase liquids ou fase líquida não aquosa leve) possuem densidade menor que a água, estão comumente associados com a produção, refino e distribuição de produtos do petróleo, como exemplos têm-se a gasolina , diesel, querosene.
- DNAPLs (dense non-aqueous phase liquids ou fase líquida não aquosa densa): possuem densidades maiores do que a água e estão relacionados a uma ampla variedade de atividades industriais. Como exemplos de DNAPL têm-se os clorinados e solventes.

4.3.1. Fases dos hidrocarbonetos no solo

Os hidrocarbonetos ao vazarem de um tanque de armazenamento subterrâneo e serem liberados no solo resultam de três fases distintas que regulam o processo de migração do produto (FIGURA 07) (GUIGUER, 2000), a partição entre as fases é determinada pela dissolução, volatilização e adsorção (EPA, 2003b).

A **fase líquida** pode existir no solo como resíduos líquidos relativamente imóveis, adsorvidos pelas partículas do solo e de matéria orgânica e como líquido livre, nos vazios, existente entre os sólidos do solo – **fase líquida residual** – o líquido livre não residual, que passa pelo solo, é chamado de **fase líquida livre**, que quando atinge o nível d'água subterrâneo passa a flutuar sobre o mesmo. Hidrocarbonetos em **fase dissolvida** podem estar presentes nas superfícies dos sólidos do solo como películas, estar presentes na água do solo e ao atingir o nível d'água subterrâneo forma a chamada pluma de contaminação. Os hidrocarbonetos em **fase de vapor** podem existir como componentes do vapor do solo, podendo também se condensar e adsorver em sólidos do solo ou se dissolver na água do solo (GUIGUER, 2000).

Hidrocarboneto em fase líquida: Os combustíveis líquidos (como o NAPL) quando atingem o solo migram descendentemente pela atuação da gravidade e forças capilares. Durante o processo de migração ocorre algum espalhamento horizontal do hidrocarboneto devido a forças capilares e a diferenças na condutividade hidráulica das camadas do solo. As forças capilares influenciam à quantidade dos movimento de hidrocarbonetos em fase líquida pelos espaços vazios do solo (GUIGUER, 2000). Camadas com condutividade hidráulica baixa promovem um acúmulo de hidrocarbonetos em movimento descendente, acima destas camadas, e desta forma o hidrocarboneto irá migrar lateralmente continuando o fluxo descendente, o mesmo pode ocorrer com tubulações de água, esgoto, eletricidade etc. (OLIVEIRA, 1992) (FIGURA 08). Depois que a parte principal da fase líquida passar, parte ficará retida pelas forças capilares e será denominada fase líquida residual, que irá agir como fonte constante de contaminação ao longo do tempo, através da dissolução por infiltração, variação do nível d'água e volatilização. Ao atingir o nível d'água o hidrocarboneto em fase líquida livre irá formar uma pluma de contaminação que irá flutuar, por ser um NAPL. Para o hidrocarboneto se acumular como produto livre sobre o nível d'água subterrâneo, o volume do vazamento deve

ser suficiente para superar a capacidade de retenção do solo entre o ponto do vazamento e o nível d'água subterrâneo (EPA, 2003b).

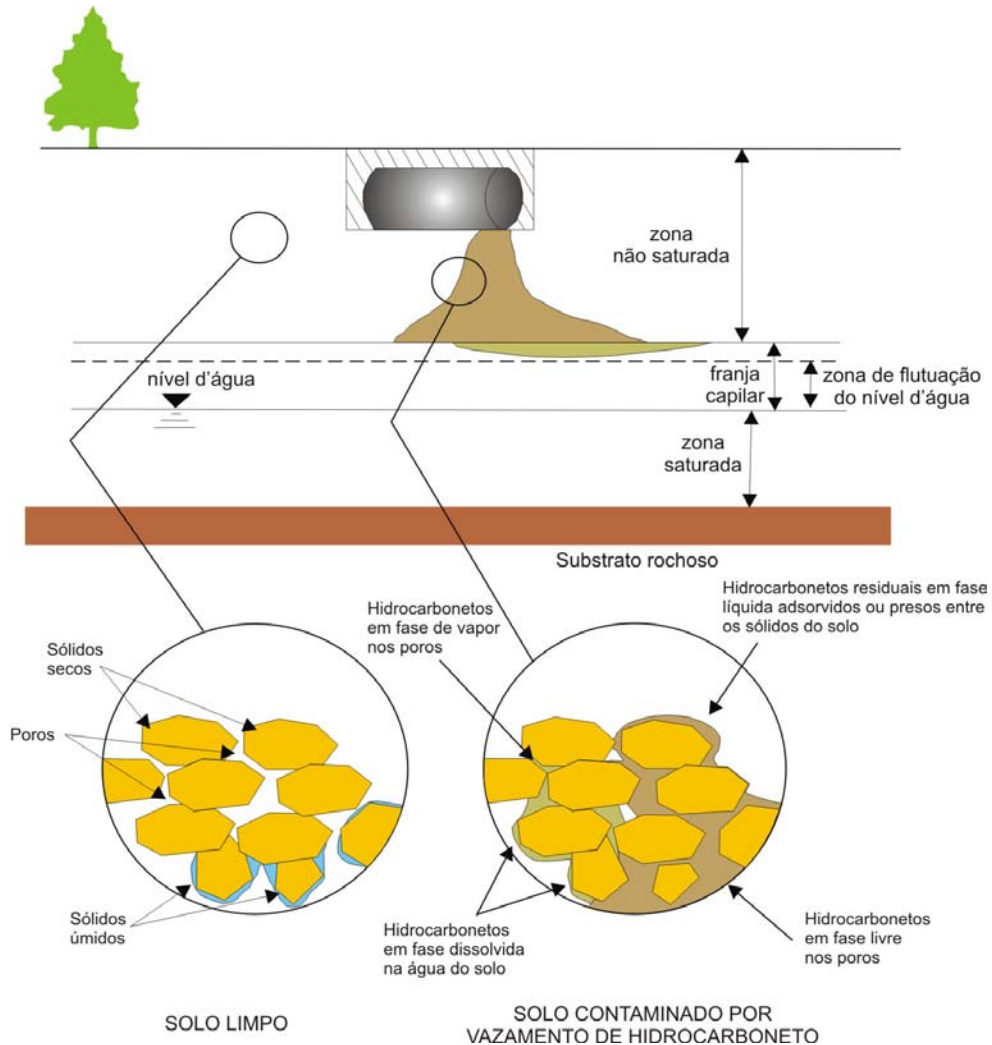


FIGURA 07: Representação das fases dos hidrocarbonetos encontradas na zona não saturada e saturada (Fonte: GUIGUER, 2000).

Hidrocarbonetos em fase dissolvida: Esta fase é o resultado do contato entre a água de subsuperfície e o hidrocarboneto em fase líquida, que pode ocorrer pela infiltração de água pela zona não saturada contendo hidrocarbonetos residuais, movimentação da água subterrânea, em contato com a pluma de contaminação de hidrocarbonetos livres e fluxo de água que passa por hidrocarbonetos residuais não dissolvidos abaixo do nível d'água subterrâneo. Segundo Guiguer (2000) as concentrações de hidrocarbonetos dissolvidos e as quantidades de transferência para o sistema de água subterrânea dependem da profundidade do nível d'água,

permeabilidade (condutividade hidráulica) do solo, recarga pluviométrica, flutuação do nível d'água, velocidade da água subterrânea, temperatura da água e a concentração destes compostos dentro da fase de hidrocarboneto residual. A quantidade de hidrocarbonetos presentes na fase dissolvida depende da interação entre a água, fase dos hidrocarbonetos e os coeficientes de solubilidade de constituintes específicos numa mistura de combustível (GUIGUER, 2000). Os oxigenados, fenóis e hidrocarbonetos aromáticos simples são os constituintes da gasolina que prontamente se dissolvem em água.

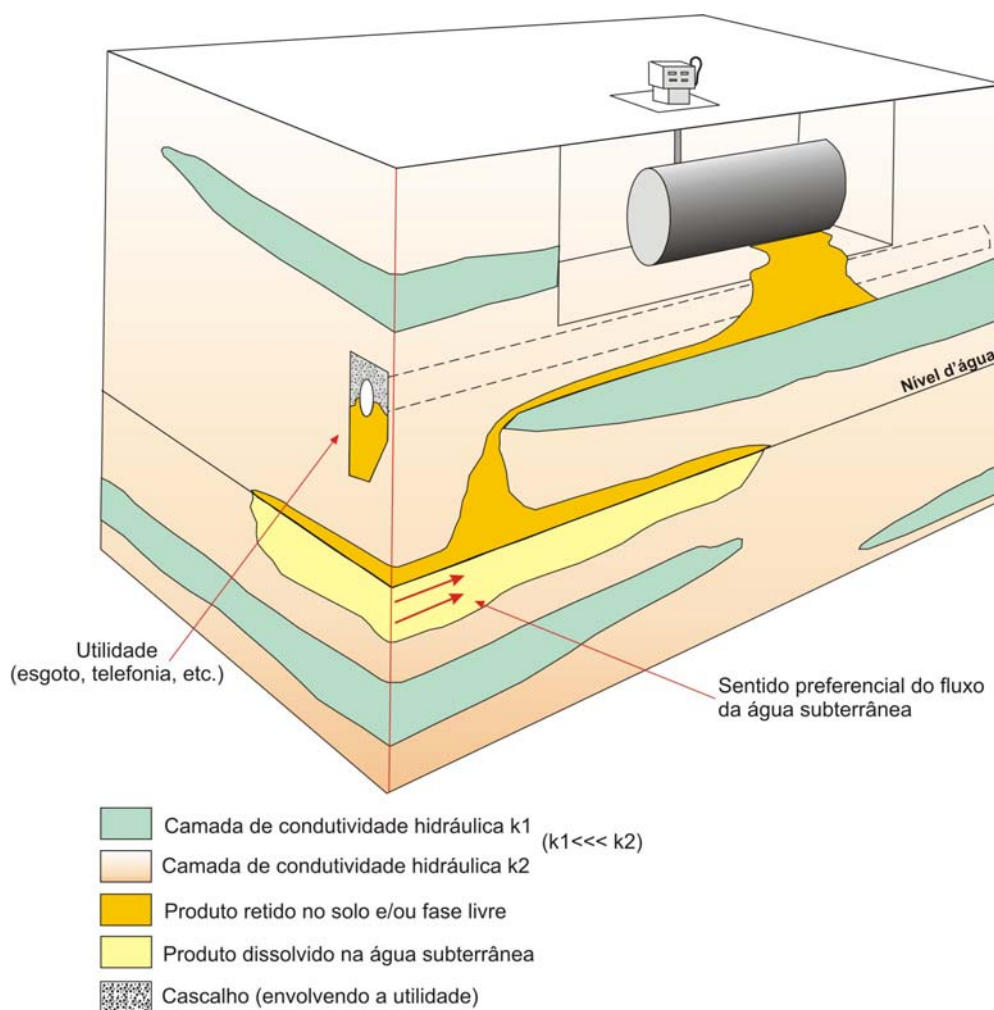


FIGURA 08: Efeito das camadas de diferentes condutividades hidráulicas na migração do contaminante (OLIVEIRA, 1992).

Hidrocarboneto em fase vapor: é resultante da volatilização dos hidrocarbonetos livres em fase líquida, presentes na zona não saturada, da

volatilização de hidrocarbonetos residuais em fase líquida, em menor escala, originados de hidrocarbonetos em fase dissolvida presentes na água do solo (GUIGUER, 2000). O hidrocarbonetos em fase vapor podem se aderir ao solo ou ser adsorvido, onde a água servirá como agente que reduz da capacidade de adsorção do solo. Logo um solo seco poroso adsorve mais hidrocarbonetos em fase vapor que um solo relativamente úmido.

A FIGURA 09 ilustra a progressão do hidrocarboneto vazado de um tanque de armazenamento subterrâneo.

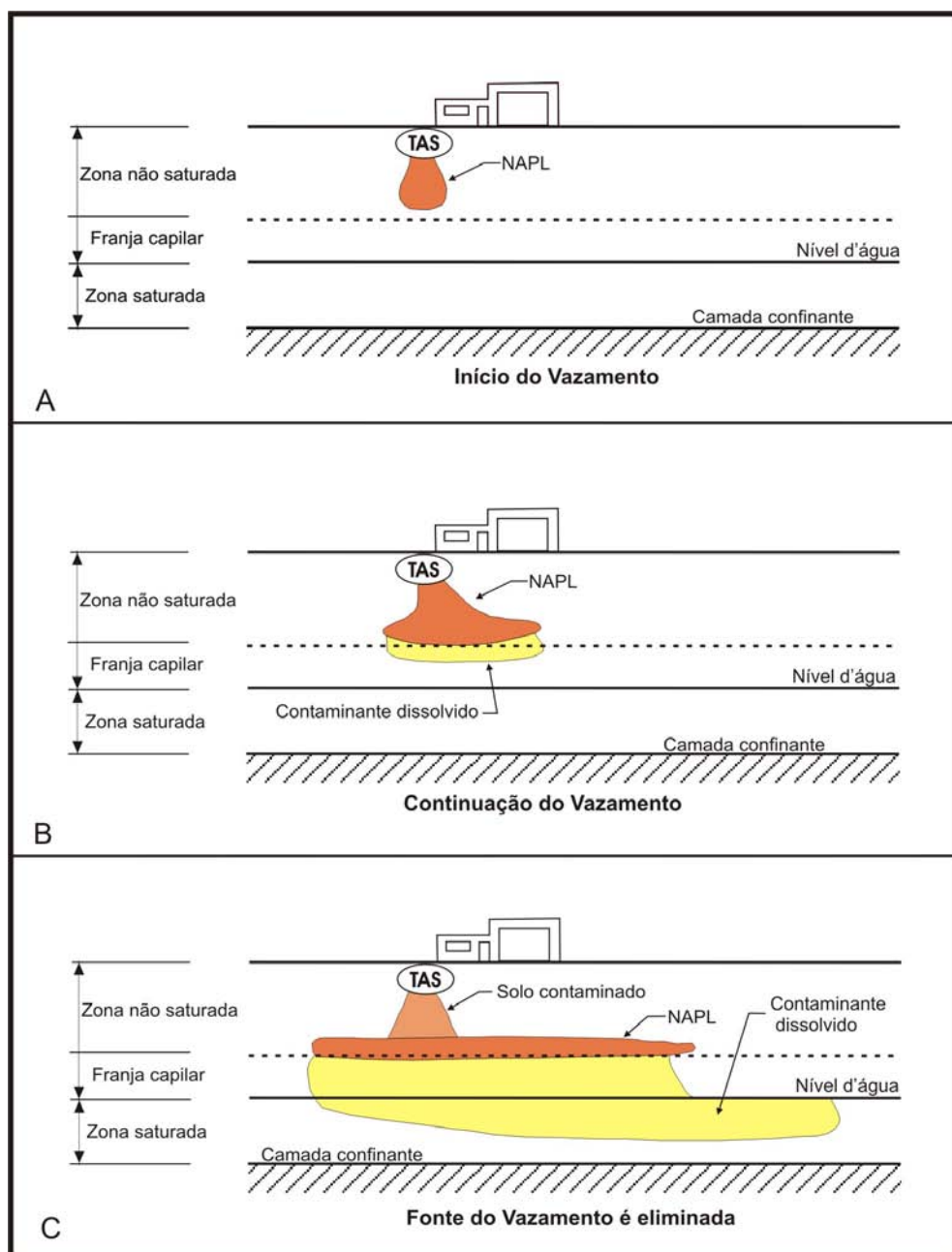


FIGURA 09: Progressão do hidrocarboneto vazado de um tanque de armazenamento subterrâneo (EPA, 2003b).

4.4. Processos no meio físico de interesse à pesquisa

É apresentado a seguir uma conceituação básica de processos atuantes no meio físico, que ocorrem na área de estudo e que interferem nas condições dos tanques de armazenamento subterrâneo.

4.4.1. Corrosão

Define-se corrosão como deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletrolítica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais (GENTIL, 1996).

A corrosão que ataca tubulações e tanques enterrados é um fenômeno causado por reações eletroquímicas que envolvem os metais utilizados nas instalações (aço, aço galvanizado, ferro fundido, cobre, ligas de cobre entre outras) e o solo, que apresenta um comportamento eletrolítico, pois contém sais dissolvidos, substâncias químicas variadas e água. Os materiais metálicos em contato com o solo ficam sujeitos a pilhas de corrosão, capazes de gerar corrente elétrica que corroem os tanques e tubulações enterradas (GOMES, 1993).

De acordo com Gomes (1993) as pilhas de corrosão são causadas pelas heterogeneidades do aço (inclusões metálicas, variações na composição química e tensões internas diferentes, causadas pelos processos de conformação e soldagem), heterogeneidade do solo (resistividade elétrica, grau de aeração, teor de umidade, composição química e pH), ligação elétrica de dois metais diferentes enterrados usados nas instalações e correntes de fuga.

4.4.1.1. Mecanismos de corrosão

A corrosão observada em materiais metálicos envolve reações químicas onde ocorre a transferência de carga ou elétrons através de uma interface ou meio eletrolítico (solo). Essa é denominada corrosão eletroquímica onde elétrons são

cedidos em uma região e recebidos em outra formando uma pilha de corrosão, tal processo pode ser decomposto em 3 etapas (GENTIL, 1996):

- *Processo anódico*: passagem de íons para o meio eletrolítico;
- *Deslocamento de elétrons e íons*: transferência de elétrons das regiões anódicas para as catódicas pelo circuito metálico e uma difusão ânions e cátions no meio eletrolítico;
- *Processo catódico*: recepção de elétrons na área catódica, pelos íons ou moléculas existentes no meio eletrolítico.

A corrosão é um processo eletroquímico que tende a oxidar um determinado metal, isto é, fazer com que tal elemento perca elétrons transformando-se em íons. A facilidade com que os átomos de um metal (eletrodo) perdem elétrons ou a facilidade com que os íons recebem elétrons é denominada potencial de eletrodo, que varia de acordo com cada metal e natureza da solução (GENTIL, 1996). A equação geral da oxidação dos metais é descrita da seguinte forma:



sendo M um metal qualquer, que age como redutor e n o número de elétrons cedidos pelo metal quando se transforma em íon.

4.4.1.2. Solo: meio corrosivo

O solo é considerado por Gentil (1996) como sendo um meio corrosivo cujo comportamento depende de suas características físico-químicas, microbiológicas e operacionais que podem influenciar na ação corrosiva sobre tanques e tubulações metálicas enterradas.

O comportamento corrosivo do solo é muito importante de ser estudado e depende de muitas variáveis como: aeração, umidade, pH, presença de microrganismos, condições climáticas, heterogeneidade, presença de bactérias redutoras de sulfato, presenças de fertilizantes e despejos industriais, melhor ou pior qualidade de revestimentos, contato bimetálico e correntes de fugas (GOMES, 2003). Esses critérios podem ser utilizados isolada ou conjugadamente, a utilização

de um ou mais destes critérios depende de uma análise específica para cada caso (NOGUEIRA JÚNIOR e SILVA, 1990).

Corcoran *et al.* (1977) determina que a resistividade, potencial redox, pH, teores de sulfeto e sulfatos e o teor de umidade como sendo os fatores que influenciam diretamente a agressividade de um solo. A corrosão pode ser originada por umas das variáveis citadas mas, normalmente ocorre uma combinação entre as mesmas.

A corrosão de um metal no solo é essencialmente um processo eletroquímico, que depende da presença de eletrólitos. A intensidade da corrosão pode ser obtida através da **Resistividade elétrica** de um solo que é determinada pela concentração de eletrólitos (ânions e cátions). Um solo com uma baixa resistividade é propício para à corrosão eletroquímica, enquanto um solo com alta resistividade pode ser considerado um ambiente livre de oxidação (CORCORAN *et al.*, 1977).

A **condutividade elétrica** também pode ser utilizada para a determinação da intensidade de corrosão (FUNDUNESP, 1999; MILLER *et al.*, 1981; ZUQUETTE, 1993), quanto maior a concentração de eletrólitos (sais) no solo maior a condutividade, o que a torna inversamente proporcional a resistividade. Zuquette (1993) estabelece classes de referência para a classificação dos solos de acordo com a corrosividade, tais classes referem-se originalmente a classificação de unidades de mapeamento geotécnico nas quais, existe ou não, a possibilidade de ocorrência de processos corrosivos. A condutividade elétrica está dividida em intervalos de acordo com as classes estabelecidas pelo autor citado. Assim para efeito desta pesquisas classes as *moderada*, *severa* e *restritiva*, definidas por Zuquette (1993) serão consideradas como corrosivas, e a classe *favorável* será considerada como não corrosiva (QUADRO 04) .

QUADRO 04: Intervalos de condutividade elétrica estabelecidos de acordo com as classes de referência e a corrosividade dos solo (modificado de Zuquette (1993)).

| Condutividade elétrica (mmhos/cm) | Classes (Zuquette, 1993) | Corrosividade do solo |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| < 0,2 | <i>Favorável</i> | Não corrosiva |
| < 0,4 | <i>Moderada</i> | Corrosiva |
| < 1,0 | <i>Severa</i> | Corrosiva |
| > 1,0 | <i>Restritiva</i> | Corrosiva |

Nesta pesquisa vamos utilizar a condutividade elétrica para a determinação do potencial corrosivo do solo, pois quanto maior a condutividade maior a corrosão, isto é maior a concentração de eletrólitos que permitem o desenvolvimento de um processo eletroquímico.

Segundo Braga (2003) a resistividade é proporcional ao conteúdo de areia presente no solo, solos argilosos apresentam baixa resistividade, assim a condutividade elétrica irá responder seguindo o mesmo princípio sendo inversamente proporcional ao teor de areia presente nos solos. Camitz e Vinka (1989) determinam que a taxa de corrosão é mais elevada para solos argilosos e menores em solos arenosos.

Miller et al. (1981) afirma que apesar do uso comum da resistividade para determinar o potencial corrosivo dos solos, existem muitas experiências mostrando que a resistividade não é um índice de confiança. Segundo Noyce e Rictchie (1979 apud MILLER et al., 1981) a maior contribuição das medidas de resistividade é identificar ambientes potencialmente corrosivos que posteriormente outros testes poderão comprovar.

O **Potencial redox** é a medida da diferença de potencial, expressa em volts, que ocorre numa reação de oxi-redução na chamada pilha de corrosão. Este potencial está relacionado ao grau de aeração do solo, baixos valores de potencial são indicativos de ambientes favoráveis às bactéria redutoras de sulfato (CORCORAN et al., 1977). Booth et al. (1967 apud CORCORAN et al., 1977) sugere que valores menores que 400 mV, ou menores que 430 mV para solos argilosos, podem ser considerados potencialmente agressivos.

Em condições altamente ácidas o ferro das estruturas de aço são dissolvidos com a produção de hidrogênio, isto é diminuição do **pH** (< 7). Com a presença de sulfetos pode ocorrer reação com formação de ácido sulfídrico que ocasiona perfurações no metal (NOGUEIRA JÚNIOR et al., 1981). Segundo o critério de identificação de solos corrosivos a materiais metálicos de Uhlig (1948, apud NOGUEIRA JÚNIOR e SILVA, 1990), valores de pH < 6 classificam os solos como agressivos. KELLY & MARES (1993) consideram que para esta faixa de valores de pH, a corrosividade é muito alta.

Segundo Gentil (1996), a corrosão eletroquímica será mais intensa quanto menor o valor de pH e quanto maior a concentração de oxigênio no meio corrosivo. Assim, para Camitz e Vinka (1989), tomando como exemplo porções acima do nível

d'água, os poros estão na sua totalidade preenchidos com ar o que significa que o oxigênio pode ser transportado por difusão na fase gasosa, tornando mais rápido o transporte de oxigênio para a superfície do metal. Desta forma aumenta a velocidade da reação catódica que por consequência aumenta a o processo anódico e aumenta taxa de corrosão.

Camitz e Vinka (1989) analisam a taxa de corrosão em painéis de aço enterrados no solo original e aqueles envolvidos por aterro de areia, a taxa de corrosão é mais elevada nos painéis envoltos no aterro. A explicação está associada a maior permeabilidade do aterro que facilita o transporte de oxigênio para a superfície do aço estimulando o processo catódico aumentando a taxa de corrosão.

Como visto o ferro em meios deaerados, como águas ou solos, normalmente não sofrem corrosão considerável. Entretanto, em certos casos, mesmo em ausência de aeração, observa-se corrosão acentuada. Isto ocorre em águas ou solos úmidos contendo bactérias capazes de utilizar em seu metabolismo, hidrogênio livre (como o hidrogênio catódico) (GENTIL, 1996).

A presença de sulfato solúvel no solo juntamente com baixos valores de potencial redox indicam condições favoráveis a atividade de bactérias redutoras de sulfato. Os gêneros *Desulfovibrio* e *Desulfotomaculum* compreendem oito espécies dentre as quais seis podem influenciar reações de corrosão. Todas essas espécies são obrigatoriamente anaeróbicas e deste modo a ausência de oxigênio é essencial para a sua sobrevivência. A fonte de energia para o desenvolvimento desses organismos é a redução dos sulfatos para sulfetos, sendo este último indicativo da presença das bactérias (CORCORAN et al., 1977). Com base nos índices parciais da tabela de classificação da agressividade de Trabanelli (1972 apud SEBRÃO & SERRA, 1993) a presença de sulfetos em quantidade maiores ou menores que 0,5 mg/kg e a presença de sulfatos entre 200 a 300, e maior que 300mg/kg, indicam potencial para corrosão.

Segundo Gentil (1996) as bactérias do gênero *Desulfovibrio* redutoras de sulfato tem seu crescimento depende de:

- Condições favoráveis de pH entre 5,5 a 8,5
- Ausência de oxigênio
- Presença de sulfato
- Presença de nutrientes
- Temperatura entre 25 a 44° C

No caso de tubulações enterradas, observou-se que a atividade das bactérias redutoras de sulfato está bem correlacionada com o potencial redox (MILLER e TILLER, 1970 apud GENTIL, 1996) (TABELA 05) usando-se o eletrodo normal de hidrogênio.

TABELA 05: Influência da atividade das bactérias redutoras de sulfato no potencial redox, determinando a agressividade do solo (MILLER e TILLER, 1970 apud GENTIL, 1996).

| Corrosividade | Potencial redox (mV) |
|---------------|----------------------|
| Intensa | <100 |
| Moderada | 100 – 200 |
| Discreta | 200 – 400 |
| Ausência | >400 |

A resistividade elétrica depende da capacidade do solo de fornecer eletrólitos dependendo desta forma, de seu **teor de umidade**. Steinrath (1968 apud CORCORAN et al., 1977) indica que para teores de umidade acima de 20% ocorre um aumento do processo corrosivo. Em casos-limites, o teor de umidade pode ser usado como fator decisivo para determinar a de um solo, isto é o grau de corrosividade. Trabanelli (1972, apud SEBRÃO e SERRA, 1993) também emprega o teor de umidade como critério na identificação da agressividade do solo, utilizando também o valor limite de 20%.

Entre as principais condições operacionais que podem influir na ação corrosiva do solo pode-se destacar: oxigenação diferencial, contato bimetálico e correntes de fuga. Gibotti Júnior (1999) destaca ainda a corrosão em áreas deformadas ou tensionadas, por uma associação do meio corrosivo com solicitações mecânicas, podendo estar relacionada com o comportamento colapsível do solo que será tratado posteriormente.

Em razão da porosidade dos solos pode-se ter diferentes teores de oxigênio nos mesmos. Solos argilosos se apresentam menos aerados do que solos arenosos, essa diferença de aeração cria uma pilha de **oxigenação diferencial**, na qual a área anódica, aquela em que ocorre a corrosão, é menos aerada. Este processo pode ser observado em tubulações que atravessam solos com diferentes teores de água e oxigênio, onde a corrosão se processa na área menos aerada da tubulação, assim

como em tanques e tubulações parcialmente enterrados, em que nas partes menos aeradas a poucos centímetros abaixo da superfície do terreno, se desenvolve a corrosão, além de tubulações com partes enterradas em solo argiloso e parte em solo arenoso, onde a porção corroída é colocada em argiloso, menos aerada (GENTIL, 1996).

A **corrosão bimetalica** ocorre quando dois metais ou ligas metálicas diferentes são interligados eletricamente e enterrados. Exemplos acontecem quando qualquer peça de bronze é conectada a uma tubulação de aço, quando tubulações galvanizadas são ligadas aos tanques aterrados eletricamente com hastes e cabos elétricos de cobre. Nesses exemplos, o tubo de aço se corrói em benefício da peça de bronze, a galvanização do tubo se consome em benefício do tanque de aço e o tanque se corrói em benefício do cobre do sistema de aterramento elétrico. Pares bimetalicos devem ser evitados na construção de qualquer instalação enterrada (GOMES, 1993).

Correntes de fuga são correntes conduzidas pelo solo, provindas de sistemas de corrente contínua aterradas, como as ferrovias eletrificadas, metrô, máquinas de solda e tubulações como gasodutos, oleodutos e adutoras com sistema de proteção catódica. Quando estruturas metálicas enterradas estão construídas próximo destas instalações, podem ficar influenciadas pelas correntes de fuga e serem severamente corroídas. Tais circunstâncias ocorrem em zonas urbanas e em cidades servidas por trem elétrico ou metrô (GOMES, 1993).

O processo corrosivo – **corrosão sob tensão** – pode se desenvolver em condições em que o corpo metálico está sujeito a deformações diferenciais, ou seja, qualquer parte de um material metálico sujeito a deformações pode apresentar potencial diferente daquele de uma parte não deformada. Assim, quando um material metálico está submetido à tensão, observa-se que a região tensionada, ou deformada funciona como ânodo (GIBOTTI JÚNIOR, 1999). Vlack (1973) explica que num material metálico o contorno dos grãos (cristais) do metal apresenta uma maior energia devido ao empacotamento de átomos nesta região, em relação aos átomos do interior do grão; portanto tem-se um ânodo e um cátodo, gerando o processo de corrosão. A zona do contorno dos grãos pode ser considerada tensionada, já que os átomos estão em posição de maior energia.

4.1.1.3. Água: meio corrosivo

Gentil (1996) determina que a presença de água no solo pode influir diretamente na ação corrosiva. Assim pode-se citar a influência que a presença de água e de sais solúveis vai exercer sobre a resistividade elétrica que será mais baixa com o aumento do teor de água e de sais solúveis.

O autor citado estabelece alguns fatores que mais freqüentemente podem causar deterioração de equipamentos e tubulações na água: sais solúveis e gases dissolvidos

Os **sais dissolvidos** podem agir acelerando ou retardando a velocidade do processo corrosivo. Entre os sais que mais influenciam estão: cloretos, sulfatos, sais hidrolisáveis, sais oxidantes e bicarbonatos de cálcio magnésio e ferro. Quanto maior a concentração de sais maior a condutividade elétrica, por isto é usada como indicadora de salinidade.

Os **gases dissolvidos** podem influenciar na ação corrosiva das águas. Entre os gases mais comumente encontrados na água podemos destacar: oxigênio (O_2), gás sulfídrico (H_2S), dióxido de enxofre (SO_2), trióxido de enxofre (SO_3) e dióxido de carbono (CO_2).

O oxigênio é considerado um fator de controle no processo corrosivo, em ambiente aerado ocorre a redução do oxigênio nas áreas catódicas, acelerando o processo corrosivo. A presença de gás sulfídrico na água é devido a causas químicas ou biológicas podendo ocasionar a ação corrosiva sobre o ferro, aço e outros metais. Os gases SO_2 e SO_3 , dissolvidos na água ocasionam a diminuição do pH porque forma ácido sulfuroso e sulfúrico, respectivamente acelerando o processo corrosivo devido a ação dos ácidos sobre os metais. O dióxido de carbono solubilizado em água, forma o ácido carbônico, que mesmo sendo um ácido fraco ocasiona uma diminuição do pH, criando portanto condições para ocorrência da corrosão

Assim como nos solos úmidos, nas águas também podem existir bactérias que se desenvolvem na ausência de oxigênio, como o caso do gênero *Desulfovibrio* que são redutoras de sulfato como descrito anteriormente, que podem desencadear um processo corrosivo.

Em razão do que foi exposto até o momento, o comportamento corrosivo do solo será estimado pelos seguintes fatores: condutividade elétrica, pH, EH (potencial

redox) e teor de umidade, além da presença de sulfetos e sulfatos para áreas alagadas ou com N.A. próximo a superfície.

A classificação da agressividade dos solos será baseada no trabalho de Corcoran et al. (1977), mas os valores dos intervalos dos parâmetros de análise podem ser determinados por outros valores de outros autores.

4.4.2. Compressão

Solos submetidos a esforços de compressão, estão sujeitos a variações de volume. Considera-se que a compressibilidade da fase sólida (grãos) e da fase líquida (água) é praticamente desprezível, desta forma a variação de volume se dá em decorrência da redução dos vazios com a expulsão de água intersticial (COTTAS, 1983).

O resultado prático da compressibilidade dos solos é o recalque, que é a deformação vertical de uma superfície qualquer do terreno, resultante da aplicação de cargas ou peso de próprio terreno (VARGAS, 1978).

Vargas (1978) determina a existência de dois tipos de recalques normais: os provenientes de deformações que se dão a índices de vazios constantes (típicos de areias e carregamento rápidos de argilas sem possibilidade de drenagem da água intersticial); e os recalques por adensamento que se dão com a variação do índice de vazios (camadas argilosas quando sofrem carregamentos permanentes).

A carga admissível sobre o terreno de fundação é aquela que aplicada sobre a mesma provoca apenas recalques que a construção possa suportar, sem inconvenientes, e ao mesmo tempo oferece um coeficiente de segurança satisfatório contra a ruptura do solo. A sua determinação envolve portanto previsão da tensão de ruptura do solo, do comportamento tensão x recalque e do recalque admissível (ALBIERO et al., 1993).

4.4.2.1. Capacidade de carga

De acordo com a FIGURA 10 que mostra um gráfico pressão X recalque, que como indicado, para pequenas cargas os recalques são proporcionais. Das

duas curvas uma apresenta uma pressão de ruptura p_r bem definida, que quando atingida os recalques tornam-se incessantes, este caso é designado de ruptura generalizada e corresponde a solos pouco compressíveis (compactos ou rijos). Para a outra curva mostra que os recalques continuam crescendo com o aumento das pressões, porém a pressão de ruptura ($p'r$) não é tão evidente, está será arbitrária em função de um recalque máximo (r'), neste caso enquadram-se os solos muito compressíveis (fofos ou moles) (CAPUTO, 1977b).

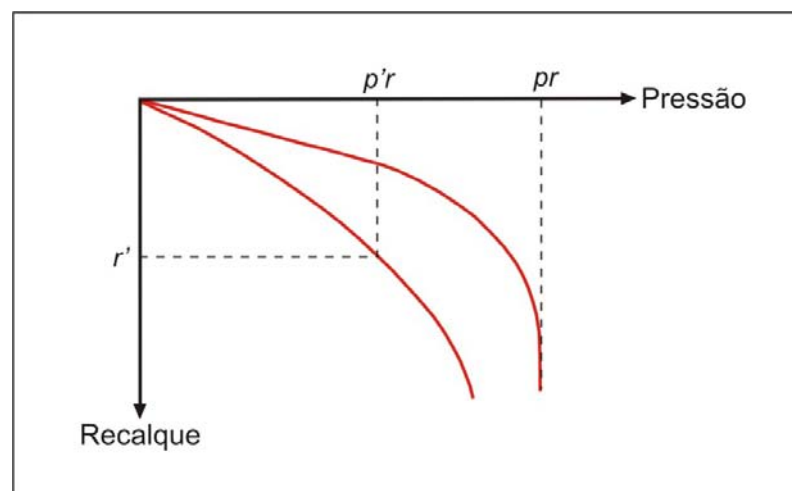


FIGURA 10: Gráfico pressão x recalque (CAPUTO, 1977b).

A pressão de ruptura ou **capacidade de carga** de um solo é a pressão que quando aplicada ao solo causa ruptura e depende principalmente da resistência ao cisalhamento, da compressibilidade do solo que a fundação se apoia e da posição do N.A. (ABRAHÃO e VELLOSO, 1998).

Para areias muito compactas antes mesmo dos recalques atingirem valores elevados a ruptura pode ocorrer. Para solos argilosos saturados o recalque é controlado pelo fenômeno de **adensamento** que representa a deformação do solo a medida que a água vai sendo expulsa pelo excesso de pressão aplicada pela fundação (ABRAHÃO e VELLOSO, 1998).

Para se obter informações sobre a carga admissível dos terrenos utilizam-se as sondagens de simples reconhecimento (SPT) e em número reduzido, é também realizada a sondagem de penetração estática (CPT). São realizados também ensaios laboratoriais com amostras indeformadas retiradas de poços abertos para estes fins.

No ensaio SPT é realizado uma sondagem de simples reconhecimento ou de percussão, em que se utiliza um amostrador de percussão que é cravado no solo por meio de uma energia padronizada, representada pela queda de um peso de 65kg em queda livre de uma altura de 75 cm. Este procedimento é repetido a cada metro perfurado, sendo escavados os primeiros 55 cm, com os 45 cm restantes destinados à realização do ensaio de penetração e amostragem. No decorrer do ensaio verifica-se o número de golpes do peso para o amostrador penetrar 15 cm até completar 45 cm. O índice de resistência a penetração IRP ou N, é definido como a soma de golpes necessários para penetrar os 30 cm finais do amostrador após a penetração dos 15 cm iniciais. Este ensaio deve ser realizado de acordo com as recomendações da ABGE (1990) e NBR-6484 (ABNT, 1980).

Desta forma os solos arenosos e silto-arenosos, com base no IRP, podem ser classificados quanto sua compactidade, ou quanto a sua consistência, em se tratando de solos argilosos ou argilo-siltosos. A classificação dos solos arenosos com base na compactidade em relação ao índice de resistência a penetração está baseada na NBR-7250 (ABNT, 1982) (QUADRO 05).

QUADRO 05: Classificação de compactidade e consistência dos solos pelo índice de resistência à penetração (IRP) (NBR 7250)

| Solo | Índice de resistência a penetração (IRP) | Designação |
|-------------------------|--|---------------------|
| Areia e silte arenoso | <4 | Fofo |
| | 5-8 | Pouco compacto |
| | 9-18 | Mediamente compacto |
| | 19-40 | Compacto |
| | >40 | Muito compacto |
| Argila e silte argiloso | <2 | Muito mole |
| | 3 a 5 | Mole |
| | 6 a 10 | Médio |
| | 11 a 19 | Rijo |
| | > 19 | Duro |

Com base nos valores do índice de resistência a penetração pode-se estimar as pressões admissíveis no terreno, para fins de fundações em solos argilosos e arenosos. Para Lima (1979) o QUADRO 06 traduz a relação entre IRP e tensões admissíveis, Chioffi (1975) faz a mesma correlação porém com valores diferentes (QUADRO 07).

Deve-se ressaltar que valores de resistência a penetração relacionados com a compactidade e consistência dos solos podem estar sujeitos à discrepância e têm cunho meramente orientativo devendo ser utilizado com critério.

QUADRO 06: Correlação entre índice de resistência à penetração e tensão admissível (modificado de LIMA, 1979).

| ARGILA | IRP (no. de golpes) | Tensões Admissíveis (Kg/cm²) |
|-----------------------|----------------------------|--|
| Muito mole | ≤ 2 | <29,42 kPa |
| Mole | 3 – 4 | 32,36 – 58,84 kPa |
| Média | 5 – 8 | 58,84 – 117,68 kPa |
| Rija | 9 – 15 | 117,68 – 235,36 kPa |
| Muito rija | 16 – 30 | 235,36 – 470,73 kPa |
| Dura | >30 | >470,73 kPa |
| AREIA | | |
| Fofa | ≤ 4 | <98,07 kPa |
| Pouco compacta | 5 – 10 | 98,07 – 196,14 kPa |
| Medianamente compacta | 11 – 30 | 196,14 – 392,28 kPa |
| Compacta | 31 – 50 | 392,28 kPa – 588,42 kPa |
| Muito compacta | >50 | >588,42 kPa |

QUADRO 07: Correlação entre índice de resistência à penetração e tensão admissível (modificado de CHIOSSI, 1975).

| ARGILAS | Número de golpes (N) | Pressão admissível (Kg/cm²) |
|------------------------|-----------------------------|---|
| Muito mole | - | - |
| Mole | <4 | <98,07 kPa |
| Média | 4 – 8 | 98,07 – 196,14 kPa |
| Rija | 8 – 15 | 196,14 – 343,25 kPa |
| Dura | >15 | > 343,25 kPa |
| AREIAS e SILTES | | |
| Fofa | <5 | 98,07 – 147,10 kPa |
| (média) pouco compacta | 5 – 10 | 98,07 – 294,21 kPa |
| Compacta | 10 – 25 | 245,17 – 490,35 kPa |
| Muito compacta | >25 | >490,35 kPa |

4.4.2.2. Determinação da compressibilidade

Para se obter informações sobre a compressibilidade dos terrenos leva-se em conta o comportamento tensão x deformação, para isto são realizados ensaios de adensamento que permitem determinar parâmetros de adensamento (ALBIERO et al., 1993), como valores de índice de compressão (Cc) e pressão de pré adensamento (Pa).

De forma geral o ensaio de adensamento (compressão odeométrica) consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico proveniente de uma amostra de

solo indeformada, confinado em um anel metálico e submetido a incrementos axiais de carregamento com a pressão sendo mantida constante em cada incremento.

A célula de adensamento consiste em uma base rígida, um anel para conter o corpo de prova, uma bacia de inundação para saturar a amostra, pedras porosas para permitir a drenagem do líquido e um cabeçote rígido de carregamento.

Durante a realização do ensaio são feitas medidas da variação de altura do corpo de prova por meio de um extensômetro, sendo as medidas efetuadas após 24 horas de aplicação de cada estágio de carregamento. Cada estágio de carregamento corresponde a uma redução do índice de vazios que é obtido através da fórmula $e = (H_i/H_f) - 1$, sendo H_i e H_f , a altura inicial e final respectivamente (NBR-12007 ABNT, 1990).

O índice de compressão é o coeficiente angular de reta de compressão sendo um parâmetro inerente ao próprio solo (COTTAS, 1983). Este índice pode classificar a compressibilidade em três níveis. Assim $C_c \leq 0,25$ é considerado solo com baixa compressibilidade, solos com C_c entre 0,25 e 0,50 são de média compressibilidade e solos com $C_c > 0,50$ são de alta compressibilidade.

A pressão de pré-adensamento é definida como a pressão limite da curva de recompressão. Corresponde ao estado de solitação a que a camada de solo esteve submetida anteriormente. Ao contrário do índice de compressão, a pressão de pré-adensamento é controlada por fatores externos tais como peso das camadas superiores, o fenômeno de ressecamento e a cimentação interpartículas.

A pressão de pré adensamento (P_a) quando comparada com a pressão que atua no local onde foi coletada a amostra (conseqüência do peso dos materiais subjacentes - P_e), permite classificar o solo em três tipos:

- *Normalmente adensado* ($P_a = P_e$): máxima pressão que o solo já suportou corresponde ao peso atual do solo subjacente;
- *Pré-adensado* ($P_a > P_e$): o solo já esteve sujeito a cargas maiores do que as atuais;
- *Parcialmente adensado* ($P_a < P_e$): solo que ainda não terminou de adensar-se sobre a ação do próprio peso.

Define-se “razão de pré-adensamento” ou “over consolidation ratio – OCR” , como a relação entre P_a e P_e , ou seja $OCR = P_a/P_e$. Desta maneira $OCR > 1$, solos pré-adensados, OCR igual ou próximo a 1, temos solos normalmente adensados e para $OCR < 1$, solos parcialmente adensados.

De acordo com Cottas (1983), independentemente do índice de compressão (Cc), os solos pré-adensados suportam sem sofrer recalques, pressões maiores do que os normalmente adensados, sendo que estes últimos recalcam mesmo sem pressões ocasionadas por estruturas sobrepostas. Assim unindo os parâmetros de pré-adensamento e índice de compressão, pode-se afirmar que solos que sofrem menos recalques são mais pré-adensados e menos compressíveis.

4.4.2.3. Tensão devido à sobrecarga

No caso de instalações em postos de serviços deve-se levar em conta as tensões aplicadas ao terreno do empreendimento.

Segundo Albuquerque (apud GIBOTTI JÚNIOR, 1999) um tanque de armazenamento subterrâneo de 30.000 l com gasolina (densidade $\approx 0,8 \text{ g/cm}^3$) situado a cima do nível d'água, juntamente com as cargas referentes ao material de recobrimento compactado, piso de concreto e colchão drenante de brita na base, (ABNT, 2001) resultam numa pressão de 43,83 kPa que corresponde à carga máxima aplicada no solo frente às condições descritas.

Vamos considerar aqui o conceito de bulbo de pressões (ORTIGÃO, 1995), que corresponde a porções do terreno na qual as tensões aplicadas em terrenos homogêneos e isotrópicos pelo carregamento externo são significativas. Pontos de igual tensão, decorrentes das cargas aplicadas, ocorrem em superfícies cilíndricas que são curvas de igual tensão, isóbaras.

O mesmo autor determina que a isóbara de 10% da carga aplicada deve ser tomada como referencia pois abrange a região do terreno que recebe a maior parte do carregamento aplicado, sendo assim mais suscetíveis a deformações. A profundidade atingida pelo bulbo é aproximadamente 2B, sendo B a largura total ou diâmetro do carregamento (FIGURA 11-a). Se o bulbo atingir camadas do solo mais compressíveis, a fundação está sujeita a recalques significativos.

Como visto, um tanque de armazenamento subterrâneo juntamente com as cargas referentes ao material de recobrimento compactado, piso colchão drenante de brita na base resultam numa pressão de 43,83 kPa. Albuquerque (apud GIBOTTI JÚNIOR, 1999) verifica, com a teoria do bulbo de pressões, a região do terreno que recebe a parcela mais significativa do carregamento. Assim, o carregamento imposto

pela cava de instalação, de altura $H = 4,0\text{m}$, é aplicado na base da cava, correspondente a $z = 0,0\text{ m}$ no bulbo de pressões. Localizando a curva referente a 10 % de pressão do carregamento, considerada de $4,3\text{ kPa}$, obtém-se $z = 8,5\text{ m}$, aproximadamente, como pode ser observado na FIGURA 11-b. Somando-se os $4,0\text{ m}$ referentes a cava de instalação têm-se a profundidade de $12,5\text{ m}$, região mais susceptível a deformações.

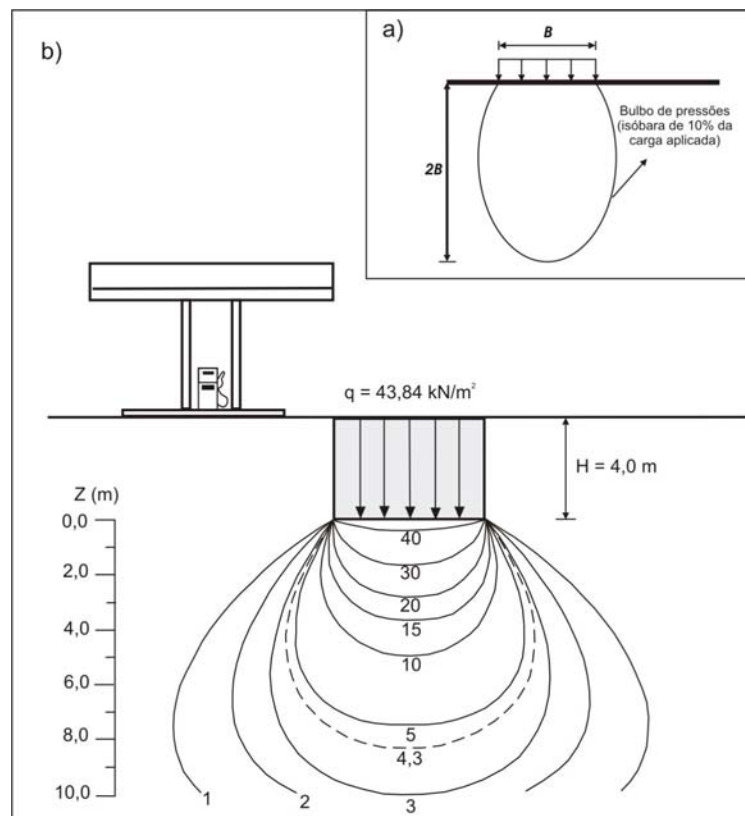


FIGURA 11: (a) Bulbo de pressões; (b) Bulbo de pressões para tanque de armazenamento subterrâneo de 30.000 l e, isóbara de 10% ($4,3\text{ kPa}$) (modificado de GIBOTTI, 1999).

4.4.3. Expansão

Certos solos em contato com a água apresentam o fenômeno de **expansão** que é causa freqüente de acidentes ou defeitos em construções sobre os mesmos. Nestes solos após período prolongado de seca, o nível d'água fica muito abaixo da superfície do terreno e aparecem trincas superficiais devido a contração volumétrica. Ocorrendo chuvas ou molhagem, mesmo devido a vazamentos em tubulações

observa-se o inchamento desses solos provocando defeitos em construções (ORTIGÃO, 1995).

A composição mineralógica dos solos expansivos tem grande importância no potencial de expansão com foi visto no item 4.1.5., onde as cargas elétricas da superfície dos minerais de argila, a resistência entre camadas e a capacidade de troca catiônica contribuem para o potencial de expansão (CHEN, 1975).

O aumento do volume dos solos expansivos se dá principalmente por sucção d'água para dentro dos poros do solo e depois por adsorção d'água para o interior da própria estrutura cristalina. Nesta segunda etapa a água é adsorvida por efeito da dupla camada de cargas elétricas da fração cristalina argilosa dos solos. Além disso, como a estrutura é mais ou menos complexa conforme a classe do mineral argila presente, a adsorção é máxima nas argilas de estrutura complexa, grupo das montmorilonitas, e mínima nas estruturas simples, como das caolinitas. É ainda maior ou menor segundo o cátion adsorvido (VARGAS, 1993).

Parte da expansão de um solo pode-se dar também por deformabilidade elástica. Esta fase é inteiramente mecânica, como quando pressões atuantes sobre uma camada argilosa não-expansiva é avaliada por efeito de escavação do solo sobrejacente e que originam uma pressão neutra negativa da água dos poros, a qual produz a sucção da água (VARGAS, 1993).

Os parâmetros de expansão das argilas são função do grupo e porcentagem do argilo-mineral presente e do cátion adsorvido que na prática podem ser representados pelo índice de atividade do solo, além disso esses parâmetros dependem da consistência ou compacidade do solo, representados pelo índice de vazios ou massa específica aparente seca e da sua estrutura (VARGAS 1993).

Segundo Chen (1975), Seed, Woodward e Lundgren demonstraram que o índice de plasticidade sozinho pode ser usado como indicador preliminar das características expansivas da maioria das argilas, aplicado apenas a solos com 8 a 65 por cento de argilas. Na TABELA 06 temos a relação entre o potencial de expansão e índice de plasticidade.

Quando o **teor de umidade** de uma argila é alterado haverá aumento de volume vertical e horizontalmente. A saturação completa não é necessária para desenvolver a expansão. Pequenas mudanças no teor de umidade, na magnitude de 1 a 2 por cento, são suficientes para causar expansão, onde o teor de umidade inicial controla a quantidade de expansão.

TABELA 06: Relação entre o potencial de expansão e índice de plasticidade (CHEN, 1975).

| Potencial de expansão | Índice de Plasticidade |
|-----------------------|------------------------|
| Baixo | 0 – 15 |
| Médio | 10 – 35 |
| Alto | 20 – 55 |
| Muito alto | 35 ou mais |

Argilas muito secas com teor de umidade natural abaixo de 15 % irão adsorver facilmente umidade, adsorvem mais de 35%, resultando numa expansão danosa para estruturas. Argilas com teor de umidade a cima de 30% indica que a maioria de expansão já ocorreu, aumentos futuros são pequenos.

Outro índice de expansão é a **densidade específica seca** das argilas relacionada diretamente com o teor de umidade inicial. Solos com densidade seca a cima de 110 pcf (lb/ft³) ou 1,76 g/cm³ geralmente exhibe alto potencial de expansão.

A densidade seca das argilas é refletida pelo ensaio SPT (standard penetration resistance test). Argilas com resistência a penetração acima de 15 geralmente possui algum potencial expansivo.

Segundo Chen (1975) é mais conveniente correlacionar as propriedades expansivas do solo com a porcentagem de silte e argila (<200), limite líquido e resistência a penetração. O QUADRO 08 fornece a estimativa das mudanças de volumes prováveis em solos expansivos e o grau de expansão.

A expansão é o processo inverso da compressão que se observa pelo aumento de volume do solo quando são retiradas as pressões atuantes (VARGAS, 1978).

QUADRO 08: Estimativa das mudanças de volume prováveis em solos expansivos e o grau de expansão (CHEN, 1975).

| Porcentagem que passa (peneira 200) | Limite líquido (%) | Resistência a penetração (N) | Expansão provável, porcentagem total de mudança de volume | Pressão de expansão ksf * | Grau de expansão |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------------|---|---------------------------|------------------|
| >95 | >60 | >30 | >10 | >20 | Muito alto |
| 60 – 95 | 40 – 60 | 20 – 30 | 3 – 10 | 5 – 20 | Alto |
| 30 – 60 | 30 – 40 | 10 – 20 | 1 – 5 | 3 – 5 | Médio |
| <30 | <30 | <30 | <1 | 1 | baixo |

* 1 ksf = 48 kPa

4.4.4. Colapso do solo

Alguns solos aumentando-se o conteúdo de água em seus vazios, ou ao serem carregados e posteriormente umedecidos, experimentam uma redução de volume, manifestada por uma brusca variação do índice de vazios sem aumento das cargas aplicadas. Existem também os solos que experimentam uma sensível modificação no comportamento tensão-deformação após atingido um valor limite de tensão (abaixo da tensão de ruptura do solo) (VILAR et al., 1981).

Os solos colapsíveis ocorrem em boa parte do Estado de São Paulo no planalto ocidental e depressão periférica sobre topos de terrenos aplainados. O fenômeno de colapso pode ocorrer em diferentes tipos de solo: os coluviais, aluviais, eólicos, os residuais, em depósitos decorrentes de fluxo de lama e até em aterros compactados (NAKAZAWA et al., 1995).

4.4.4.1. Aspectos Gerais

Cerri (2001) adota o conceito de solos colapsíveis como sendo solos com baixo grau de saturação e alto índice de vazios (estrutura macroporosa), distintos em duas categorias: 1) aqueles que, com o aumento do conteúdo de água em seus vazios, apresentam uma redução de volume, manifestada por uma rápida variação do índice de vazios, sem aumento das cargas aplicadas (tensões referentes somente ao próprio peso); 2) aqueles que após sofrerem um carregamento externo e posterior aumento do grau de saturação, também demonstram uma acentuada redução de volume de vazios, em consequência do colapso da estrutura.

Cintra (1995) explica que a estrutura porosa dos solos colapsíveis está associada a um agente cimentante que aliado a sucção elevada lhe confere uma resistência aparente. Para o colapso ocorrer efetivamente eleva-se o teor de umidade até um valor limite com atuação de um estado de tensões críticas. Assim com adição de água ao solo colapsível produz um efeito que dissipa a sucção e enfraquece a cimentação causando redução da resistência e o colapso do solo (CINTRA, 1995).

Esse fenômeno decorre de um colapso da estrutura do solo, provocando uma descontinuidade na curva tensão X deformação (FIGURA 12).

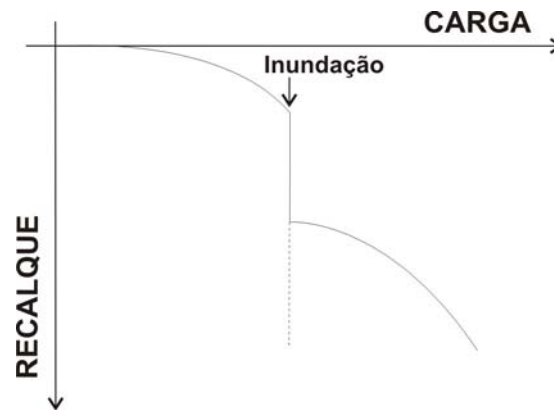


FIGURA 12: Ocorrência de colapso em prova de carga genérica (CINTRA, 1995).

Em consequência obras de fundações e obras enterradas implantadas em solos colapsíveis se comportam bem por algum tempo, mas podem sofrer um recalque adicional causado por aparecimento acidental de uma fonte de água (ruptura de condutos d'água, infiltração de águas de chuva, fissuras e trincas em reservatórios enterrados, ascensão do nível d'água inundando o solo) (CINTRA, 1995).

4.4.4.2. Formas de colapso

O comportamento dos solos colapsíveis varia bastante e depende de sua constituição. Situações em que podem ocorrer (VILAR et al., 1981):

- ◆ Alguns solos sofrerem colapso instantaneamente ao se aumentar o grau de saturação por umedecimento.
- ◆ Alguns solos experimentam colapso após o rebaixamento do nível d'água . A retirada de água do subsolo provoca a rebaixamento do nível d'água e conseqüentemente, essas camadas profundas têm sua tensão efetivas aumentadas, devido ao peso do solo sobrejacente, o que pode causar colapso de esqueleto sólido desses solos. Situações similares têm-se desenvolvidos em campos de petróleo devido ao bombeamento do óleo.
- ◆ Alguns solos sofrem expansão após saturados e depois da aplicação das cargas externas sofreram substanciais recalques. Essa situação deve ser atribuída à presença de argilo-minerais.

- ◆ Em alguns casos, o colapso pode estar relacionado com o líquido de saturação responsável pela dissolução dos agentes cimentantes, dispersão da fração argila ou ao isolamento ou eliminação das forças elétricas que unem as partículas dos solos. A influência do pH na magnitude do colapso foi constatada em trabalhos anteriores, onde demonstrou-se que valores de pHs > 7 (alcalinos) provocam um aumento na magnitude do colapso, que se deve à defloculação e ao rearranjo das partículas coloidais, responsáveis pela interligação da fração grossa do solo (AGNELLI e ALBIERO, 1997; CRUZ et al., 1994; GIBOTTI JÚNIOR, 1999).
- ◆ Os solos podem apresentar ainda, uma sensível modificação na sua relação tensão-deformação após determinado nível de tensão, o qual se situa abaixo da tensão de ruptura do solo, neste caso, a água não é o mecanismo deflagrador do processo.

4.4.4.3. Critérios de identificação

Os critérios para identificação de solos colapsíveis seguem basicamente três orientações: critérios regionais (desenvolvidos para determinadas ocorrências de solos ou regiões) a partir de conceitos empíricos ou testes rápidos, critérios baseados nos índices físicos e limites de Atterberg e os critérios que empregam ensaios de adensamento e compactação.

Os critérios baseados nos limites de consistência, na sua quase totalidade, buscam relacionar o índice de vazios necessário para conter a umidade do solo corresponde ao limite de liquidez e o índice natural de vazios. São os critérios que oferecem apenas informações qualitativas, não levando em conta o efeito das tensões aplicadas, da natureza dos contatos entre os grãos, do tipo de cimentação, da química do líquido inundante, dentre outros parâmetros. Dessa forma, esses critérios devem ser empregados apenas em análises preliminares (AGNELLI e ALBIERO, 1997).

O ensaio de compactação, através do grau de compactação (GC), indica a possibilidade de ocorrência de colapso do solo. O grau de compactação é um parâmetro usado no controle da compactação de aterros: relação entre a massa específica seca do aterro e a massa específica seca máxima.

Para as condições de solos colapsíveis o grau de compactação é de 75% ou inferior. Este ensaio consiste na redução de volume através da redução dos índices de vazios (ar) e aumento da massa específica via aplicação de determinada energia.

O ensaio de adensamento avalia a magnitude dos recalques provenientes da estrutura do solo. Este ensaio se baseia na redução do volume de água contido nos vazios do solo, podendo ser de 2 tipos: simples inundação e duplo adensamento (VILAR et al., 1981).

No ensaio de adensamento simples, depois da estabilização dos recalques decorrente do carregamento, inunda-se o corpo de prova e registra-se os recalques adicionais. Lutenegro e Saber (1988 apud GIBOTTI JÚNIOR, 1999) consideram este ensaio o mais adequado quando se tem como objetivo as medidas das variações volumétricas que ocorrem num solo quando parcialmente saturado torna-se saturado sob tensão constante.

No ensaio de duplo adensamento (JENNINGS e KNIGHT 1957 apud VILAR et al., 1981) conduzem-se paralelamente dois ensaios de adensamento: um a teor de umidade natural e outro com amostra inundada antes do primeiro carregamento. A variação volumétrica é calculada a partir da aproximação geométrica das curvas de compressão dos dois testes. Os resultados são plotados num gráfico onde as abscissas, em escala logarítmica, correspondem a pressão aplicada (KPa) em cada estágio e o eixo das ordenadas corresponde ao índice de vazios.

Lutenegro e Saber (1988 apud GIBOTTI JÚNIOR, 1999) definem o potencial de colapso de uma amostra de solo indeformada com umidade natural, a partir do carregamento em ensaios de adensamento sob tensão de 300 kPa e, então saturada para induzir o colapso da amostra. Assim o potencial de colapso pode ser definido por:

$$(I) = \frac{\Delta e}{1+e_i} \times 100\%$$

onde:

Δe = variação do índice de vazios
 e_i = índice de vazios anterior à saturação

A TABELA 07 apresenta o grau aproximado de susceptibilidade ao colapso com base no cálculo do potencial de colapso.

TABELA 07: Susceptibilidade ao colapso baseado no cálculo do potencial de colapso (*I*) segundo Lutenegeger & Saber (1988 apud GIBOTTI JÚNIOR, 1999).

| Grau de susceptibilidade ao colapso | <i>I</i> (%) |
|--|---------------------|
| Fraco | 2,0 |
| Moderado | 6,0 |
| Severo | 10,0 |

Segundo os autores citados o potencial de colapso (*I*) pode ser calculado para uma determinada tensão de interesse sendo, neste caso, definido como potencial de colapso específico. Vargas (1978) denomina o potencial de colapso específico de coeficiente de colapso estrutural considerando como critérios de identificação para solos colapsíveis valores maiores que 2%.

4.5. Interação entre Instalações enterradas, propriedades e processos atuantes no meio físico relevantes frente a vazamentos de hidrocarbonetos

A relação entre os processos do meio físico e tanques de armazenamento subterrâneo, determina a possibilidade de ocorrência de vazamento, uma vez que os processos atuam sobre os tanques induzindo danos e conseqüentes vazamentos. Quando o produto vazado atinge o solo, seu processo de migração está relacionado com as propriedades do meio físico (ex.: porosidade).

Para a ocorrência de um vazamento de hidrocarbonetos de um tanque de armazenamento enterrado, deve-se levar em conta a susceptibilidade a determinados processos do meio físico que atuam nos diferentes terrenos com características geotécnicas distintas. Estes processos podem encadear danos nas estruturas enterradas, como tanque e tubulações. No QUADRO 09 são apresentados alguns processos que influenciam os tanques de armazenamento enterrados.

QUADRO 09: Processos do meio físico que têm influência sobre os tanques de armazenamento subterrâneo.

| <i>Processos no meio Físico</i> | <i>Influência sobre os tanques de armazenamento subterrâneo</i> |
|---------------------------------|--|
| Corrosão (solos corrosivos) | Atua sobre o tanque de armazenamento subterrâneo, causando a corrosão do metal (quando sem proteção adequada), provocando vazamento de hidrocarboneto. A profundidade do N.A. pode contribuir para o desenvolvimento de processo corrosivo, caso o tanque fique parcialmente emerso. |
| Colapso do solo | Tanques instalados sobre solos colapsíveis, quando da adição de água (rompimento de tubulações enterradas) e sobre tensão (carga do tanque), sofrem colapso, danificando estruturas enterradas provocando rachaduras e trincas, além da possibilidade de indução de corrosão sob tensão. |
| Compressão | A aplicação de cargas (tanque), acima dos níveis de tensão admissíveis, provoca recalques no solo, ocasionando danos nas estruturas enterradas, provocando vazamentos. |
| Expansão | A hidratação de materiais, com minerais expansivos, desenvolve pressões de expansão, provocando a desestabilização de estruturas enterradas, como tanques subterrâneos. A flutuação do N.A. pode acarretar o desenvolvimento de expansão. |

A migração do hidrocarboneto em subsuperfície (zona não saturada) depende das propriedades do material encontrado sendo de um substrato geológico natural ou de um aterro construído. A caracterização deste meio pode determinar as rotas e o tempo de migração do produto (EPA, 2003b). O QUADRO 10, sumariza as propriedades do meio físico mais relevantes. A migração também depende de vários fatores que são funções das propriedades do fluido e do meio físico, que não serão abordadas nesta pesquisa

QUADRO 10: Características das propriedades do meio físico que influenciam a migração de contaminante (hidrocarboneto).

| <i>Propriedade</i> | <i>Característica</i> |
|-------------------------------------|---|
| Porosidade | Define a capacidade de armazenagem do meio (no caso hidrocarbonetos). Determina a quantidade de produto livre e residual, levando em conta a porosidade efetiva (EPA, 2003b), além de estar relacionada com condutividade hidráulica do meio. Deve-se levar em conta as descontinuidades (porosidade secundária), pois servem de via preferencial ao transporte de poluentes (LEITE & ZUQUETTE, 1996), podendo ter influências regionais. |
| Permeabilidade | Controla as taxas de migração do fluxo de água subterrânea e a migração de hidrocarboneto (EPA, 2003b) Quanto menor a condutividade hidráulica menor a velocidade de migração do contaminante. |
| Anisotropia | Anisotropia é a condição do meio na qual a medição de uma propriedade (ex.: condutividade hidráulica) depende da direção em que é feita a medição. A anisotropia pode fazer com que o fluxo de água subterrânea não seja na mesma direção do gradiente hidráulico (EPA, 2003b). |
| Heterogeneidade | A heterogeneidade (diferenças de permeabilidade, causadas por exemplo, por fraturas, textura, composição, porosidade) do meio dá caminhos preferenciais para a migração do fluido (EPA, 2003b). |
| CTC | Esse parâmetro constitui-se em fator bastante importante na retenção dos poluentes orgânicos e outros íons menos móveis, indicando a capacidade de retenção de poluentes pelo material inconsolidado. A CTC é a maior ou menor capacidade que a argila possui em trocar cátions para neutralizar as cargas negativas (LEITE e ZUQUETTE, 1996). |
| Profundidade e variação do N.A. | É relacionada com a distância máxima que o contaminante irá percorrer até atingir a zona saturada. As flutuações do N.A., quando não consideradas podem diluir e transportar os compostos que se encontram na zona não saturada causando a contaminação das águas subterrâneas (LEITE e ZUQUETTE, 1996). Além de estar relacionada com a influência que pode exercer na instalação de um TAS e durante a sua vida útil (bombeamento constante da água na cava do tanque). |
| Fluxo d'água subterrâneo | O conhecimento deste parâmetro interfere diretamente na propagação do contaminante, indicando a direção e o sentido que se deslocará a pluma de contaminante (LEITE e ZUQUETTE, 1996). |
| Espessura de material inconsolidado | A presença de uma camada de considerável espessura de material inconsolidado pode retardar em muito o tempo de chegada do poluente às águas subsuperficiais, desde que apresente CTC adequada e baixa condutividade hidráulica (LEITE e ZUQUETTE, 1996). |

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1. Localização

A área de estudo corresponde a faixa urbana e peri-urbana do Município de Rio Claro, centro-leste do Estado de São Paulo. Insere-se na folha topográfica na escala 1:50.000 (IBGE – SF-23-M-I-4, Folha Rio Claro) (FIGURA 13).

O Município de Rio Claro é circundado, a norte pelos municípios de Corumbataí e Leme, a sul por Iracemápolis e Piracicaba, a leste por Araras e Santa Gertrudes e a oeste pelos municípios de Ipeuna e Itirapina. Assistência e Ajapi são distritos e Batovi, Ferraz e Itapé são considerados bairros rurais.

A população total do município é de 163.341 habitantes, segundo o Censo do IBGE de 2000, deste total 97% residem na área urbana e 3% na área rural (NICOLETTI et al., 2001).

Rio Claro está a 173 km a noroeste da capital, com ligação através do sistema Anhanguera-Bandeirantes e rodovia Washington Luiz.

A Cidade de Rio Claro apresenta 40 estabelecimentos de revenda de combustíveis líquidos (FIGURA 14). Do total, 37 estão localizados na área urbana, nos domínios da Formação Rio Claro, e em áreas de depósitos aluvionares. Outros 2 na rodovia e 1 no distrito de Ajapi.

5.2. Aspectos Climáticos e hidrográficos

Rio Claro apresenta um aspecto de transição no que se refere a clima, pois ocorre, continuamente a alternância de avanços e recuos de massas polares e tropicais, implicando em mudanças bruscas em estados de tempo (TROPMAIR, 1992).

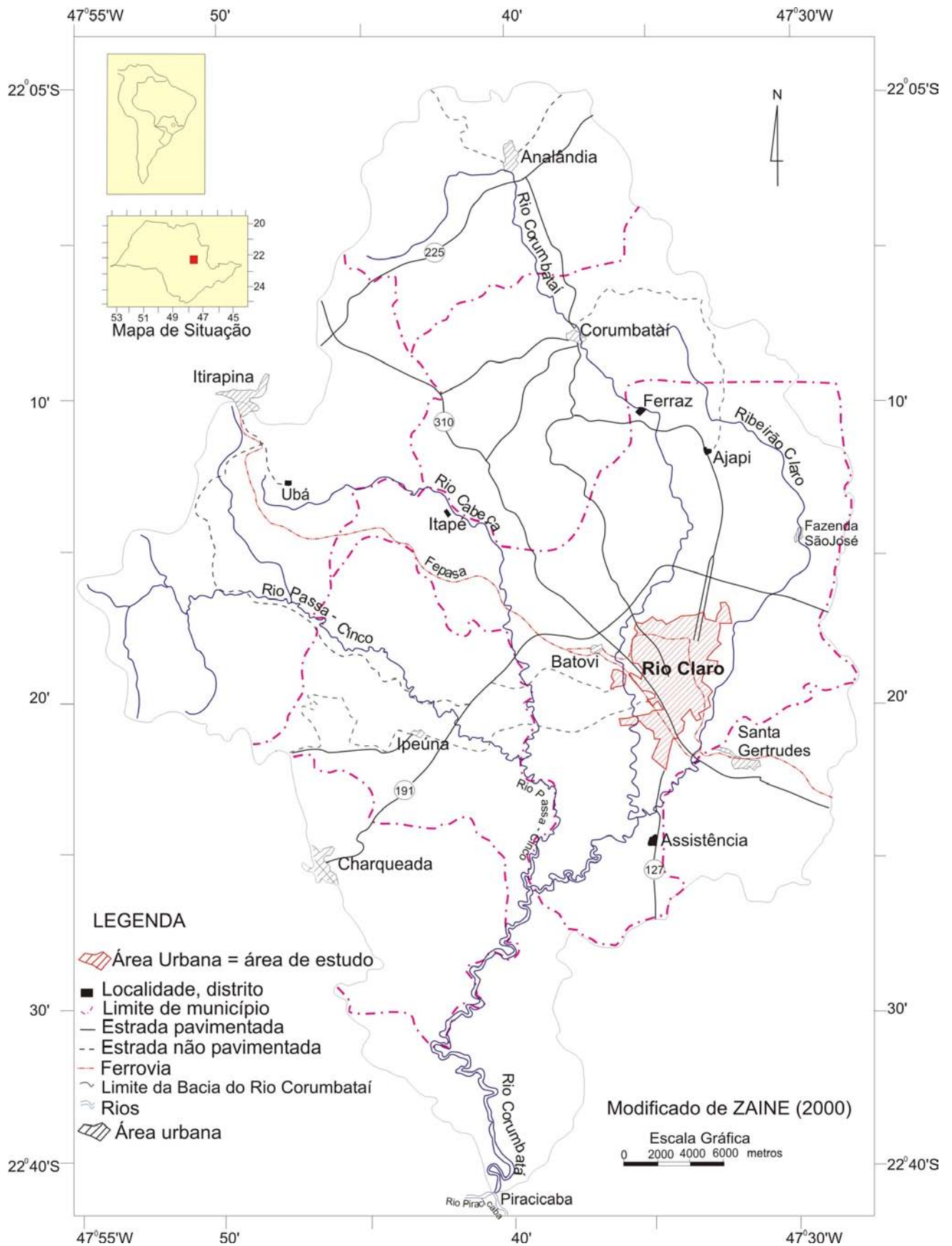


FIGURA 13: Mapa de localização da área de estudo.

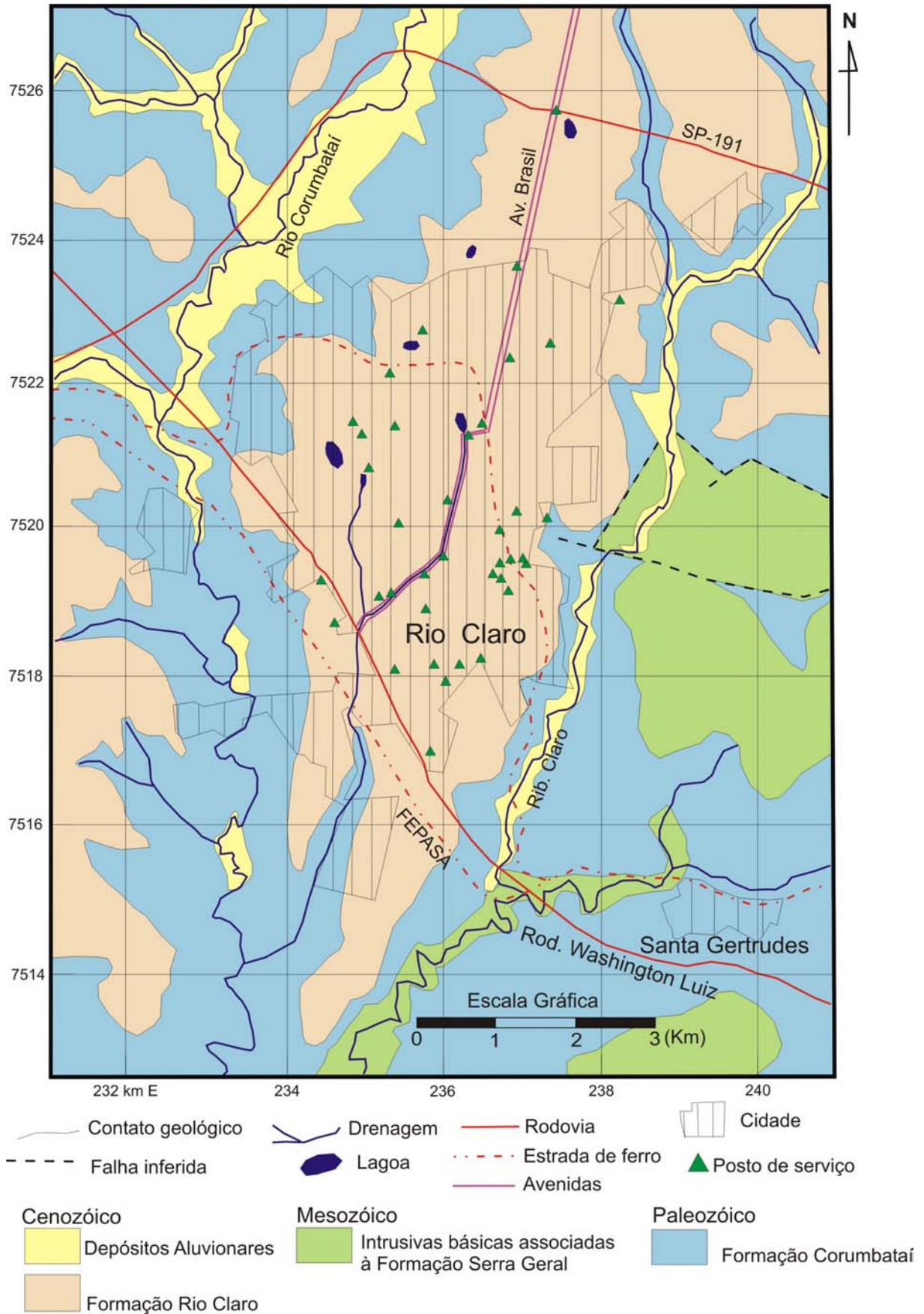


FIGURA 14: Mapa geológico com indicação da localização dos postos de combustíveis na área urbana do município de Rio Claro (modificado de ZAINE, 1994).

De acordo com Rosim (1997) os meses com maior incidência de chuvas são dezembro e janeiro, com médias mensais de até 250mm, em contraponto os meses com ausência de chuvas, que são julho e agosto. A média pluviométrica no Município de Rio Claro, registrada no período de 1955 a 1996, foi de 1.551,5 mm/ano, onde o valor mais baixo foi registrado no ano de 1963 com 960,6 mm e o valor mais alto em 1983 com 2.496,6mm, amplitudes térmicas entre 10° e 12°C e média de temperatura de 22°C (TROPMAIR, 1992).

O Município de Rio Claro está inserido na bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, que drena uma área de 171.050 ha e abrange parte dos municípios de Analândia, Itirapina, Corumbataí, Santa Gertrudes, Ipeúna, Charqueada, além de Piracicaba, onde o rio Corumbataí deságua no rio Piracicaba (ZAINE, 2000).

A cidade de Rio Claro localiza-se no médio curso do Rio Corumbataí, onde o declive do rio é pequeno com caimento de 2m/km correndo em vales abertos, com muitas curvas e meandros (TROPMAIR, 1992).

A jusante da cidade de Rio Claro, o Rio Corumbataí, recebe grande carga de poluentes vinda do afluente córrego da Servidão, que nasce no Parque do Lago Azul e corta a cidade canalizado, sob a Avenida Visconde do Rio Claro. Em diferentes pontos do córrego, ocorrem problemas com inundação, erosão e contaminação das águas, por esgoto de residências e indústrias (NICOLETTI et al., 2001).

Outro afluente do Rio Corumbataí é o ribeirão Claro que é considerado um rio quase que exclusivamente municipal. Tem seu curso de norte para sul, cortando a leste a área urbana de Rio Claro no sentido NNE-SSW, e deságua no Rio Corumbataí, alguns quilômetros a sul da cidade (ZAINE, 2000).

5.3. Contexto geomorfológico

Segundo Almeida (1964), o Município de Rio Claro insere-se na Província Geomorfológica da Depressão Periférica, na Zona do Médio Tietê.

A região de Rio Claro é constituída, segundo Penteado (1976), por um relevo de colinas tabuliformes de vertentes suavemente convexas e patamares de fraca inclinação, com altitudes entre 550 e 650 m, características de Depressão Periférica.

A Zona do médio Tietê é constituída por rochas sedimentares, com áreas expressivas de intrusões de rochas básicas com reflexo na sua topografia (IPT, 1981).

Segundo a classificação do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981) na região ocorrem relevos de degradação, em planaltos dissecados, característicos da Depressão Periférica, com sistemas do tipo colinas amplas (212), colinas médias (213) e morrotes alongados paralelos (234).

5.4. Contexto Pedológico

De acordo com o mapeamento pedológico, na escala 1:100.000, realizado na quadrícula de São Carlos (PRADO et al., 1981), identifica-se cinco tipos principais de solos no Município de Rio Claro.

Os podzólicos vermelho-amarelos possuem textura média/argilosa e aparecem em baixos topográficos. Foram formados a partir dos sedimentos finos do Grupo Passa Dois e Tubarão, sendo que no Município de Rio Claro as rochas originais são principalmente os siltitos da Formação Corumbataí (COTTAS, 1983).

Os latossolos vermelho-amarelos apresentam textura média, com profundidades entre 10 e 12m, ocorrendo em interflúvios tabuliformes. Este tipo de solo corresponde ao solo de alteração da Formação Rio Claro (PRADO et al., 1981).

A parte SE do município esta ocupada pelos latossolos roxos com textura argilosa a muito argilosa (PRADO et al., 1981).

Um outro tipo de solo encontrado na região, sem grande expressão, são os solos litólicos, com textura variada, relacionada com o substrato representado pelas formações Corumbataí, Irati e intrusões de diabásio. Sua principal característica é a pequena espessura, em geral inferior a 30cm (PRADO et al., 1981).

Restritos aos vales do rio Corumbataí e ribeirão Claro, aparecem os solos hidromórficos, relacionados a sedimentos aluvionares destes vales (PRADO et al., 1981).

Os solos designados terra roxa estruturada são originados de rochas básicas e são diferentes do latossolo roxo por apresentar um horizonte B textural, aparecendo em áreas com relevo um pouco mais movimentado. Na área, estão ligados à ocorrência de soleiras e diques de diabásio (ZAINÉ, 2000).

5.5. Geologia Local

A área de estudo localiza-se, geologicamente, no setor paulista do flanco nordeste da bacia sedimentar do Paraná, representada por rochas sedimentares e vulcânicas das eras Paleozóica (Grupo Itararé; formações Tatuí, Iratí e Corumbataí), Mesozóica (formações Pirambóia, e Serra Geral) e Cenozóica (Formação Rio Claro e depósitos recentes).

A maior parte do Município de Rio Claro está assentada, sobre as formações Corumbataí e Rio Claro e, parcialmente sobre rochas intrusivas básicas e depósitos recentes (FIGURA 14).

5.5.1. Formação Corumbataí

A Formação Corumbataí, representa a unidade superior do Grupo Passa Dois (Permiano), com área de ocorrência bastante extensa no vale do rio Corumbataí, no Estado de São Paulo. Bordeja quase todo sítio urbano de Rio Claro, com predomínio nos setores norte e noroeste.

A espessura da Formação Corumbataí, em sua faixa aflorante no território paulista, situa-se em torno de 30m (SCHINEIDER et al., 1974). Na região de Rio Claro admite-se uma espessura máxima de 130m, adelgaçando-se para norte, não ultrapassando a 60 m nas proximidades de Leme/Pirassununga (LANDIM, 1970).

Constituí-se, em sua parte inferior, de argilitos, folhelhos e siltitos de cores cinza escuro, em parte superior, em argilitos, folhelhos e siltitos arroxeados a avermelhados, com intercalações de arenitos finos, leitos carbonáticos e coquinas (SCHINEIDER et al., 1974). Em seus espessos pacotes lamíticos ocorrem atividades de mineração, voltadas para o fornecimento de matéria prima para a fabricação de cerâmica vermelha. O contato com o topo de Formação Iratí é concordante (SCHINEIDER et al., 1974).

5.5.2. Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral pertence ao Grupo São Bento (triássico-cretáceo), caracterizado por uma sedimentação exclusivamente continental encerrada por um intenso vulcanismo (magmatismo) basáltico (ZAINÉ, 1994).

A Formação Serra Geral compreende uma seqüência de derrames de lavas basálticas com intercalações de lentes arenosas. As lavas são de composição toleítica, com coloração cinza a preta, com amígdalas no topo dos derrames (SCHNEIDER et al., 1974).

Na folha de Rio Claro (1:50.000) ocorrem sills e diques de diabásio nas Serras de Santana, no Horto Florestal, junto a cidade no ribeirão Claro e nos leitos dos rios Corumbataí e Passa Cinco. Estes corpos são incluídos na Formação Serra Geral, embora não sejam sincrônicos (ZAINÉ, 1994).

5.5.3. Formação Rio Claro

A área urbana do Município de Rio Claro está assentada, predominantemente, sobre a Formação Rio Claro o mais antigo registro Cenozóico. Capeia grandes interflúvios planos de 50 a 60 m acima do Rio Corumbataí, entre as cotas de 580 a 670 m. A área de ocorrência desta formação, com direção NW-SE, possui 30 km de extensão por 10 km de largura (ZAINÉ, 1994).

A Formação Rio Claro apresenta espessura máxima da ordem de 20 a 40 m na área do platô de Rio Claro (COTTAS 1983; ZAINÉ 1994).

Na região da área de estudo, a Formação Rio Claro assenta-se sobre rochas mais antigas, que são na maior parte rochas da Formação Corumbataí, onde o contato é marcado por um nível conglomerático. Em alguns pontos, a Formação Rio Claro recobre corpos de diabásio penetrados na Formação Corumbataí. A influência destas rochas é observada no solo de alteração da Formação Rio Claro, apresentando coloração escura e pela presença de lateritas ferruginosas (ZAINÉ, 1994).

Os sedimentos da Formação Rio Claro são predominantemente arenosos, esbranquiçados, amarelados e róseos, mal consolidados, com solo (latossolo areno argilosos) bastante desenvolvido nos topos de interflúvios, sendo comuns lentes

argilosas e níveis conglomeráticos (ZAINÉ, 1994). Na porção basal desta unidade ocorrem níveis conglomeráticos e arenitos argilosos. Os níveis conglomeráticos possuem espessura entre 0,1 e 0,3m, compostos de seixos de quartzo, clastos de lamitos e crosta ferruginosas associadas.

Zaine (1994) atribui o desenvolvimento de solos profundos pelo fato de os depósitos de Formação Rio Claro serem arenosos e de fraca litificação, contribuindo para os processos pedogenéticos e com grande influência climática.

Associadas a Formação Rio Claro estão algumas lagoas e lagoas secas, características de relevo de colina ampla e tabuliforme.

5.5.4. Depósitos Quaternários

Na área estudada os depósitos aluvionares quaternários têm grande expressão no rio Corumbataí, ribeirão Claro e afluentes, correspondendo á extensas áreas planas, com nível d'água subterrâneo raso. Associados às planícies aluvionares ocorrem os terraços de baixa vertente (COTTAS 1983; ZAINÉ 2000).

Os aluviões são compostos por sedimentos arenosos e argilosos, com espessura inferior a 5 m, geralmente hidromórficos e orgânicos associados, formando planícies de inundação (ZAINÉ, 2000). São freqüentes intercalações de turfa negra com espessura que varia de alguns centímetros a 1 metro (COTTAS, 1983).

5.6. Contexto Geológico-Geotécnico

Na área urbana do município de Rio Claro, assentada sobre diferentes tipos de terrenos, podem ocorrer diferentes processos da dinâmica externa atuantes no meio ambiente. A compreensão desses processos é feita através da definição de atributos geotécnicos, ou seja, características próprias dos solos e rochas existentes na área.

Os solos da Formação Corumbataí, com grande expressão na área, podem apresentar problemas relacionados a capacidade de suporte, com materiais de pouca competência para alicerces rasos, sendo descritos solos plásticos e

expansivos (ZAINÉ, 2000). Para Cottas (1983) solos residuais da Formação Corumbataí são considerados bons materiais para base de construções residenciais e edificações pois apresentam valores de índice de compressão no início do intervalo “média compressão” e pelo fato de apresentarem pequenas espessuras. As rochas (siltitos e argilitos) da Formação Corumbataí apresentam um processo de empastilhamento relacionado ao desconfinamento associados a ciclos de umedecimento e secagem (CAMPOS et al., 1987). Por apresentar nível d’água raso (estação de chuvas) e pouca espessura de solo não é recomendado para obras enterradas, disposição de resíduos e cemitérios (ZAINÉ, 2000; COTTAS 1983). A existência de fácies mais endurecidas de coloração cinza representam dificuldade de escavação para obras e tubulações enterradas (ZAINÉ 2000). O QUADRO 11 apresenta uma síntese das principais características, processos e problemas da Formação Corumbataí de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

QUADRO 11: Síntese das principais características, processos e problemas da Formação Corumbataí de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

| | <i>COTTAS, 1983</i> | <i>ZAINÉ, 2000</i> |
|---|---|--|
| Unidades definidas | Formação Corumbataí | Domínio da Formação Corumbataí |
| Critérios | Definida com base em critérios geológicos | Definidas com base no relevo, contexto geomorfológico e comportamento geológico-geotécnico |
| Principais Características | Solo residual silto-arenoso, de cor acinzentada, com espessuras menores que 2m. | Apresenta solos pouco espessos, declividade baixa a média, baixa permeabilidade, presença de anfiteatros de nascente como elementos morfológicos característicos |
| Processos/Registro de processos e Problemas ambientais de natureza geológico-geotécnica | Solos com média compressibilidade, baixa permeabilidade | Presença de solos plásticos e expansivos influenciando na capacidade de suporte, desagregabilidade, fácies mais endurecidas dificultam escavações |

Áreas com relevo residual e domínio de diabásio, são definidas por Zaine (2000) como áreas com corpos de intrusivos básicos ou seja um relevo residual suportado pelo maciço intrusivo, na área representado pelo morro do horto Florestal Navarro de Andrade (Floresta Estadual). Outra situação encontrada são rochas básicas na média encosta, fundos de vales e leitos de rios. Um dos principais problemas encontrados nesta unidade está relacionado com a escavabilidade dos

terrenos, a presença de blocos e “lajes” de diabásio não alterados dificultam a execução de obras que exijam terraplanagem e escavações. Cottas (1983) define esta unidade como corpos intrusivos de diabásio e analisa as características geotécnicas do solo residual deste material.

Cottas (1983) define outra unidade, os depósitos coluviais de vertente, que são depósitos quaternários resultantes do retrabalhamento de areias da Formação Rio Claro com solos de rochas básicas nas encostas adjacentes aos corpos de diabásio. A colapso do solo é um dos problemas presentes nesta unidade. O QUADRO 12 apresenta uma síntese das principais características, processos e problemas das áreas de domínio de diabásio de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

QUADRO 12: Síntese das principais características, processos e problemas das áreas de domínio de diabásio, de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

| | <i>COTTAS, 1983</i> | <i>ZAINE, 2000</i> |
|---|--|---|
| Unidades definidas | Corpos intrusivos de diabásio | Áreas com relevo residual e domínio de diabásio |
| Critérios | Definidas com base em critérios geológicos e comportamento geotécnico do material residual | Definida a partir de relevo residual suportado por maciço intrusivo de diabásio e rochas básicas em situação de média para baixa encosta e fundos de vales e leitos de rios |
| Principais Características | Presença de solo residual argiloso de cor vermelha escura | Apresenta declividade média a alta, latossolo roxo e terra-roxa estruturada, |
| Processos/Registro de processos e Problemas ambientais de natureza geológico-geotécnica | Média compressibilidade e permeabilidade difícil | Apresenta problemas relacionados com a escavabilidade (presença de “lajes” e blocos de diabásio) |

Zaine (2000) define duas unidades geológico-geotécnicas para a área de ocorrência da Formação Rio Claro com base no relevo e contexto geomorfológico, assim tem-se a Formação Rio Claro na meia encosta e Formação Rio Claro com relevo de colinas tabuliformes.

A Formação Rio Claro de meia encosta tem seu limite superior marcado por ruptura de relevo positiva, que marca a borda da formação Rio Claro de colina tabuliforme e sua base é delimitada pelo contato com a Formação Corumbataí. Um

dos principais problemas registrados é a presença de boçorocas e ravinas localizadas muitas vezes no contato entre Formação Rio Claro e Formação Corumbataí impermeável, com contribuição de declividades mais acentuadas (COTTAS, 1983).

A Formação Rio Claro com relevo de colinas tabuliformes atribuída por Zaine (2000), é subdividida por Cottas (1983) em Formação Rio Claro laterizada (porção superior) e Formação Rio Claro estruturada (porção inferior). A gênese da parte superior desta unidade é atribuída a uma profunda alteração pedogenética de sedimentos predominantemente arenosos de fraca litificação (FÚLFARO e SUGUIO 1968, ZAINE, 1994). O colapso do solo é um dos processos atuantes nesta unidade, estes solos quando submetidos a adição de água e sobrecarga, pode ocorrer redução do volume ocasionando danos estruturais em construções. O QUADRO 13 apresenta uma síntese das principais características, processos e problemas da Formação Rio Claro de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

QUADRO 13: Síntese das principais características, processos e problemas da Formação Rio Claro de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

| | <i>COTTAS, 1983</i> | <i>ZAINE, 2000</i> |
|---|--|--|
| Unidades definidas | Formação Rio Claro – laterizada e estruturada | Formação Rio Claro de colinas tabuliformes Formação Rio Claro de meia encosta |
| Critérios | Definidas com base no comportamento geológico-geotécnico | Definidas com base no relevo e contexto geomorfológico e comportamento geológico-geotécnico |
| Principais Características | Estruturada: parte inferior com arenitos inconsolidados amarelados Laterizada: parte superior, solos da Formação Rio Claro, com presença de lateritas | Fm Rio Claro de colinas tabuliformes: grandes espessuras de material inconsolidado baixa declividade, em vales instalados nesta unidade podem ocorrer solos hidromórficos e orgânicos Fm Rio Claro de meia encosta: declividade média a alta, diminuindo com a passagem para a Fm. Corumbataí |
| Processos/Registro de processos e Problemas ambientais de natureza geológico-geotécnica | Ocorrência de colapso nos solos laterizados da Fm Rio Claro e processos erosivos na borda da Fm Rio Claro estruturada | Ocorrência de colapso do solo e alagamentos (colinas tabuliformes) e erosão (meia encosta) |

Zaine (2000) definiu outras unidades geológico-geotécnicas: terraços de baixa vertente e aluviões. Os terraços de baixa vertente na área de estudo são

superfícies esculpidas por erosão fluvial sobre um substrato mais antigo, como formações Corumbataí, Irati ou soleiras de diabásio, situadas cerca de 10 a 15 m acima do nível atual dos rios (Corumbataí e ribeirão Claro). Os aluviões são representados por sedimentos arenosos e argilosos compondo as planícies de inundação dos principais cursos d'água da área. Para Cottas (1983) os aluviões são uma das unidades mais inadequadas para quase todos os tipos de obras, devido a presença de lentes de turfa negra extremamente compressíveis e por apresentar nível d'água próximo à superfície. Cottas (1983) apenas defini os aluviões em seu trabalho. O QUADRO 14 apresenta uma síntese das principais características, processos e problemas da Formação Corumbataí de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

QUADRO 14: Síntese das principais características, processos e problemas dos aluviões de acordo com Cottas (1983) e Zaine (2000).

| | <i>COTTAS, 1983</i> | <i>ZAINE, 2000</i> |
|---|---|---|
| Unidades definidas | Aluviões | Terraços de baixa vertente Aluviões |
| Critérios | Definida com base em critérios geológicos | Definidas com base no relevo e contexto geomorfológico e critérios geológicos |
| Principais Características | Sedimentos de deposição quaternária material areno-argiloso, com intercalações de turfa negra | Terraços: superfícies erosivas aplainadas que modelam predominantemente rochas permianas da Fm Corumbataí, situam-se de 10 a 15 m acima do nível atual dos rios. Por vezes ocorrem registros de depósitos arenosos e turfás. Aluviões: depósitos aluvionares quaternários representados por material arenoso e argiloso, solos hidromórficos e orgânicos |
| Processos/Registro de processos e Problemas ambientais de natureza geológico-geotécnica | Presença de lentes turfa negra extremamente compressíveis e nível d'água raso que inviabilizam determinadas obras | As enchentes e inundações periódicas são os maiores problemas nas áreas de aluvião |

Serão adotadas neste trabalho as unidades geológico-geotécnicas definidas por Zaine (2000) (FIGURA 14), uma vez que o autor individualiza as unidades através da caracterização do meio físico com a identificação de suas limitações e

potencialidades ante as necessidades impostas pelo uso urbano do solo, onde como resultado obteve-se mapa geológico-geotécnico representativo destas unidades

O trabalho de Cottas (1983), por outro lado, trabalha com as características geotécnicas de províncias geológicas e tem como resultado, mapas estabelecendo índices de adequabilidade, potenciais de uso e indicações para a ocupação da área urbana de Rio Claro, sem o uso de um mapa específico de unidades geotécnicas.

6. RESULTADOS DAS INVESTIGAÇÕES E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às investigações realizadas pela pesquisa, juntamente com a análise das características dos diferentes tipos de terrenos encontrados na área urbana de Rio Claro, com relação à instalação de postos de combustíveis, referindo-se a terceira, quarta e quinta etapas da pesquisa, observadas no fluxograma do método de trabalho (FIGURA 02).

6.1. Definição das unidades de análise

Visando a instalação de postos de combustíveis, foram reconhecidas e analisadas as unidades geológico-geotécnicas definidas por Zaine (2000) para a área urbana de Rio Claro, por meio de pesquisa bibliográfica, descrições e observações de campo com elaboração de uma síntese das características destas unidades. Nesta análise foram levantados dados já existentes de alguns atributos como: profundidade do nível d'água, tipo de solo, declividade do terreno, espessura de material inconsolidados e processos do meio físico, que atuam na área de estudo (QUADRO15). As unidades estabelecidas por aquele autor foram definidas numa escala geral (1^a etapa do Método do Detalhamento progressivo), caracterizada de forma qualitativa.

Assim, através do agrupamento das unidades geológico-geotécnicas definidas por Zaine (2000), foram estabelecidas quatro unidades de análise que são as unidades geológicas presentes na área urbana de Rio Claro, sendo elas: Unidade de análise 1 - Formação Corumbataí, Unidade de análise 2 - Diabásio, Unidade de análise 3 - Formação Rio Claro e Unidade de análise 4 - Aluviões (QUADRO 16) (FIGURA 15). Para isto foram utilizados os seguintes elementos de análise: processos atuantes, propriedades e características das unidades geológico-geotécnicas de Zaine (2000) e resultado das observações de campo.

QUADRO 15: Síntese das unidades geológico-geotécnicas da área urbana de Rio Claro (modificado de ZAINE, 2000).

| Unidade | Profundidade Nível d'água | Declividade | Tipo de solo | Material inconsolidado | Principais processos e problemas |
|---|--|--------------------|---|--|---|
| I Domínio da Formação Corumbataí | Raso, oscilando com período de chuvas e de estiagem | Baixa/média | Argiloso | Delgado (<2m, em média, <1m em parte litólico) | Solo plástico expansivo, escavabilidade |
| II Relevo residual e domínio de diabásio | Variável | Média/alta | Argiloso | variável | escavabilidade |
| III Formação Rio Claro de meia encosta | Variável (5 a 20m) | Média/alta | Areno-argiloso | Variável (5 a 20m) | Erosão |
| IV Formação Rio Claro de colinas tabuliformes | Profundo (10 a 25 m) | Baixa (< 2%) | Areno-argiloso | Espesso (10 a 30m) | Colapso, alagamento |
| IV-A Vale instalado na unidade IV | Raso, próximos a córregos e cabeceiras (2 a 4m) | Média (2 a 15%) | Orgânico hidromórfico | Espesso 10 a 25m) | Solo plástico enchentes |
| IV-B passagem gradual p/ unidade III | Profundo (10 a 20) | Média (2 a 10%) | Areno/argiloso | Espesso (10 a 20m) | Erosão (sulcos e ravinas escavabilidade (local)) |
| V Terraços de baixa vertente | Raso | Baixa | Hidromórfico orgânico, subordinadament e litólicos e podzólicos | Delgado (<5 m) | |
| VI Aluvião | Raso | Baixa | Hidromórfico orgânico | Delgado (<2 m) | enchentes |

Neste contexto a **Unidade de análise 1 - Formação Corumbataí**, corresponde à faixa de afloramentos da Formação Corumbataí na cidade de Rio Claro, ressalta-se que a unidade “Terraços – V” definida por Zaine (2000) foi agrupada nesta unidade de análise, em se tratando apenas de uma feição erosiva desenvolvida principalmente na Formação Corumbataí.

A **Unidade de análise 2 - Diabásio** corresponde às áreas com relevo residual e domínio de ocorrência de diabásio.

Na **Unidade de análise 3 - Formação Rio Claro** foram agrupadas as unidades geológico-geotécnicas estabelecidas por Zaine (2000), dentre elas: unidade IV (colinas tabuliformes), sub-unidade IV-B (passagem gradual para unidade III), unidade III (área de meia encosta), sub-unidade IV-A (vales instalados na formação Rio Claro, situações de meia encosta). Foi verificado em diferentes

situações de relevo, conforme as linhas de trado realizadas ao longo do perfil da encosta (relevo de colinas tabuliformes e de meia encosta), um perfil de solo homogêneo até a profundidade de 4,00m, sem variações observadas. Para a instalação de postos de combustíveis, no que se refere ao tipo de material amostrado, as duas unidades geológico-geotécnicas da Formação Rio Claro (IV e III) possuem as mesmas características, o que definiu o agrupamento.

Para a **Unidade de análise 4 - Aluviões** foram agrupadas as unidades denominadas: aluvião (VI) e áreas de baixa encosta dos vales instalados na unidade Formação Rio Claro (VI-A), por apresentarem como características principais, nível d'água raso, baixas declividades e a presença de solo hidromórfico e orgânico.

Para cada unidade estabeleceram-se quais os problemas relacionados com a instalação de tanques de armazenamento subterrâneo, ligados aos processos atuantes no meio físico que podem interferir no equipamento, e as propriedades e características do meio físico que regem o comportamento de um contaminante (hidrocarboneto) decorrente de vazamentos. Para isso utilizou-se da relação entre tanque de armazenamento enterrado, propriedades do meio e processos atuantes, como visto no item 4.5..

QUADRO 16: Agrupamento da unidades geológico-geotécnicas em unidades de análise com a definição dos principais problemas envolvendo tanques de armazenamento subterrâneo.

| Unidades de análise | Unidades geológico-geotécnicas (ZAINÉ, 2000) | Problemas (propriedades e processos atuantes) |
|----------------------------|---|---|
| <i>Unidade 1</i> | Formação Corumbataí (I) terraços de baixa vertente (V) | Expansão, escavabilidade, corrosividade, profundidade do N.A. |
| <i>Unidade 2</i> | Relevo residual e domínio de diabásio (II) | Escavabilidade, corrosividade |
| <i>Unidade 3</i> | Formação Rio Claro de colinas tabuliformes (IV, IV-B) e de meia encosta (III) | Colapso, corrosividade, condutividade hidráulica |
| <i>Unidade 4</i> | Aluvião (VI), e os vales instalados na unidade IV (VI-A) | Enchentes, profundidade do N.A., capacidade de carga, corrosividade, condutividade hidráulica |

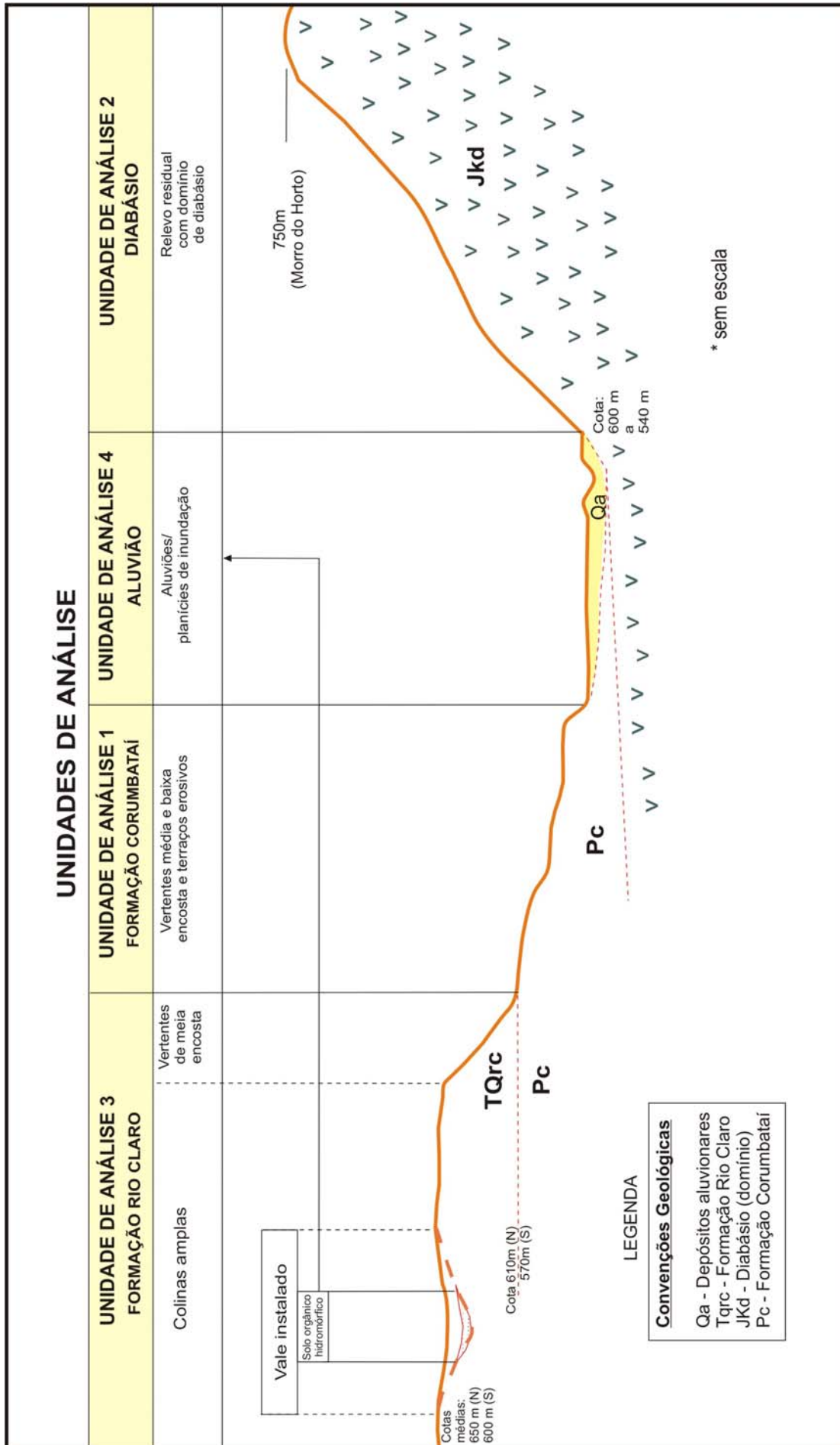


FIGURA 15: Perfil esquemático das unidades de análise definidas para Rio Claro (SP) (modificado de ZAINE, 2000).

6.2. Descrição geológica, geomorfológica e hidrogeológica das unidades de análise

São abordados neste item as descrições das unidades de análise definidas na área de estudo quanto às suas características geológicas e geomorfológicas e hidrogeológicas num contexto mais geral.

6.2.1. Unidade de análise 1 – Formação Corumbataí

Como visto, a Formação Corumbataí ocorre na área urbana de Rio Claro representada por siltitos e argilitos arroxeados e marrons. Apresenta geralmente solos pouco profundos, entre 1 a 2m, podzólicos e por vezes litólicos (ZAINÉ, 2000) (FOTO 01). Devido a esta litologia de baixa permeabilidade, apresenta alta densidade de drenagem.



FOTO 01: Perfil de solo, transição entre podzólico e litólico com siltitos arroxeados na porção inferior (P-3, ANEXO 1).

O nível freático observado em alguns poços e em escavações é muito raso no período de chuvas, em geral < 2m, com profundidade variando nos períodos de estiagem (ZAINÉ, 2000).

Apresenta em geral, declividades baixas a médias (<5% e entre 5% a 15%) (ZAINÉ, 2000) compreendidas entre a média e baixa vertente do ribeirão Claro e rio Corumbataí.

6.2.2. Unidade de Análise 2 - Diabásio

Áreas com relevo residual e domínio de diabásio, são definidas por Zaine (2000) como áreas com corpos de rochas básicas com destaque na topografia, ou seja, um relevo residual suportado pelo maciço composto por diabásio. Na área é representado pelo morro do horto Florestal Navarro de Andrade (Floresta Estadual). Outra situação encontrada são rochas básicas na média encosta, fundos de vales e leitos de rios.

A espessura de solo e de materiais inconsolidados podem ser variáveis dependendo da topografia e forma de encosta (ZAINÉ, 2000). Segundo o autor citado, encostas íngremes com perfil retilíneo apresentam pequenas espessuras, já em situações de média e baixa vertente foi registrado um solo coluvionar com blocos de rochas, apresentando maiores espessuras de cobertura. Foi verificada uma ocorrência de um vasto lajeado, sem a presença de solo, na encosta norte do morro do horto (FOTO 02). Segundo o mapa de espessura de material inconsolidado de Cottas (1983), na área de relevo residual e domínio de diabásio encontram-se espessuras entre 13 a 4 m e espessuras inferiores a 4m em situações de fundo de vale (ribeirão Claro), ao sul da área de estudo.

De acordo com o mapa de profundidade do nível d'água subterrâneo de Cottas (1983), a profundidade varia entre 13 a 3 m, para a região correspondente a área de domínio de diabásio.



FOTO 02: Lajeado, sem a presença de solo, na encosta norte do morro do horto (fonte: J.E. Zaine).

6.2.3. Unidade de Análise 3 - Formação Rio Claro

Esta unidade é representada pelos sedimentos cenozóicos da Formação Rio Claro, caracterizada pelo domínio de litotipos arenosos com intercalações de camadas de conglomerados e sedimentos argilosos. É marcada por fraca litificação e profunda alteração pedogenética com solo espesso (latossolo areno-argiloso) (FOTO 03) (ZAINÉ, 1994).

Investigações anteriores mostram que a espessura de material inconsolidado apresenta valores máximos da ordem de 30 m, na região norte da cidade, adelgçando para a região sul com valores entre 20 e 15 m. Para áreas onde a Formação Rio Claro ocorre associada a relevo de meia encosta, encontram-se espessuras menores, por volta de 5 m nas porções mais baixas do relevo (ZAINÉ, 2000).

A profundidade do nível d'água subterrâneo, pode ser estimada acompanhando a base da Formação Rio Claro com profundidades de cerca de 25 m a norte e entre 20 a 15 m para sul, até profundidades menores que 5m próximo aos córregos e cabeceiras de drenagens e lagoas (ZAINÉ, 2000).



FOTO 03: Perfil de solo característico da Formação Rio Claro (P-2, ANEXO 1).

De acordo com Oliva (2002) a superfície do nível d'água subterrâneo, para área de ocorrência da Formação Rio Claro na área urbana de Rio Claro, está situada entre as cotas 575 m ao Sul e 625 m ao Norte, com fluxo das águas subterrâneas orientado acompanhando a topografia local (de norte para sul e sudeste). A Formação Rio Claro caracteriza-se por ser um aquífero livre onde localmente ocorrem níveis d'água suspensos mantidos por materiais de baixa permeabilidade com profundidades de 1 a 2 m, formando lagoas.

Esta unidade apresenta declividades variadas de acordo com a posição de relevo que está associada. Em áreas onde ocorre em relevo de colinas tabuliformes a declividade é bastante baixa inferior a 2 %, já em situações de meia encosta encontra-se declividades médias (5 a 15%) a altas (>15%) (ZAINÉ, 2000).

Nas áreas com relevo mais aplainado, apesar do solo permeável, o escoamento superficial das águas da chuva é bastante lento, causando alagamento em vários pontos devido a crescente impermeabilização do solo e falta de arborização.

Inserida na unidade da Formação Rio Claro encontram-se vales abertos instalados num relevo de colinas amplas tabuliforme tendo como substrato geológico

a própria Formação Rio Claro. São áreas de média declividade com passagem gradual da porção aplainada para o caimento até o talvegue (ZAINÉ, 2000).

6.2.4. Unidade de Análise 4 - Aluviões

Na área estudada os depósitos aluvionares quaternários têm grande expressão nos vales dos rio Corumbataí, ribeirão Claro e afluentes, correspondendo á extensas áreas planas com nível d'água subterrâneo raso, inferior a 3 m (FOTO 04).

Os aluviões são compostos por sedimentos arenosos e argilosos, com espessura inferior a 5 m, geralmente ocorrem solos hidromórficos e orgânicos associados, formando planícies de inundação (ZAINÉ, 2000). São freqüentes intercalações de turfa negra com espessura que varia de alguns centímetros a 1 metro (COTTAS, 1983).

Dentro da área de ocorrência dos sedimentos da Formação Rio Claro, os corpos hídricos modelaram vales abertos inseridos num relevo de colinas amplas e tabuliformes. Associados aos fundos de vales (FOTO 05) podem ocorrer registros de depósitos fluviais (aluviões restritos) e solos podzólicos, hidromórficos e orgânicos. Estes tipos de solos também ocorrem ao redor de lagoas de cabeceira de drenagem tendo como característica principal nível d'água subterrâneo próximo a superfície.



FOTO 04: Planície aluvionar do rio Corumbataí (ST-15, ANEXO 1).



FOTO 05: Vale instalado na Formação Rio Claro com solo hidromórfico (córrego Wenzel) (ST-12, ANEXO 1).

6.3. Caracterização Geotécnica das unidade de análise

Para a definição das propriedades e processos mais importantes das unidades de análise quanto à instalação de postos de combustíveis na área urbana de Rio Claro, foram considerados as interações entre tanques de armazenamento subterrâneo (TAS), os processos do meio físico que contribuem para a indução de vazamentos e as propriedades e características do meio físico relevantes frente aos vazamentos de hidrocarbonetos.

Neste item são apresentados e discutidos os resultados de análises realizadas, em conjunto com resultados obtidos anteriormente por outro autores para que se possa definir a caracterização geológico-geotécnica das unidades. Os dados serão tratados de forma a determinar os processo e fatores importantes para a implantação de postos de combustíveis.

6.3.1. Unidade de Análise 1 – Formação Corumbataí

Christofolletti (2003), em estudos na Formação Corumbataí no município de Rio Claro e cidades vizinhas para fins cerâmicos, determinou a composição

mineralógica para este material. Assim dentre os minerais encontrados o quartzo é o mais representativo, seguido pela albita, calcita, hematita e dolomita. O argilo-mineral predominante é a illita seguida da caolinita, a montmorilonita também pode ocorrer.

Segundo Christofletti (2003) foi identificada em todas as jazidas cerâmicas estudadas, uma litofácies de siltito muito alterado caracterizado por material argilo-arenoso fino, ocorrendo muitas vezes abaixo do solo residual com espessura variável, atingindo no máximo 3m. A composição mineralógica apresenta predomínio dos argilo-minerais illita e caolinita. Masson (1998) define um nível logo abaixo do solo residual da Formação Corumbataí caracterizado por níveis claro compostos por caolinita e níveis escuros definido por argilo-minerais do tipo illita e montmorilonita.

Por apresentarem argilo-minerais como illitas e caolinitas em sua composição, para os materiais da Formação Corumbataí, pode-se estimar valores de CTC próximos aos estabelecidos por classificações como a de Leite e Zuquette (1996), onde a CTC indicada, favorável à retenção de contaminantes, é maior ou igual a 10 meq/100g.

TABELA 08: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados da Formação Corumbataí, baseado em Cottas (1983).

| | | |
|--|-----------|---------------------|
| Teor de umidade (%) | | 32,4 |
| Massa específica seca (g/cm³) | | 1,44* |
| Massa específica natural (g/cm³) | | 1,59 |
| Massa específica dos sólidos (g/cm³) | | 2,76 |
| Limites de consistência | LL | 52 |
| | LP | 34 |
| | IP | 18 |
| Condutividade hidráulica (cm/s) | | $6,5 \cdot 10^{-7}$ |

*calculado feito a partir de massa específica natural e teor de umidade

Os valores de condutividade hidráulica são da ordem de $6,5 \times 10^{-7}$ cm/s (TABELA 08) para solos residuais da Fm Corumbataí (COTTAS, 1983). Segundo Duarte (1980) os valores de condutividade para as rochas desta formação se encontram em torno de 10^{-8} cm/s, classificados como “praticamente impermeável” na classificação de Casagrande e Fadum e para Zuquette (1987) é classificado como “baixa” permeabilidade (item 4.1.2.). Neste tipo de material as condições de

propagação de uma possível contaminação é quase nula permanecendo localizadas próximas a fonte de ocorrência (DUARTE, 1980).

6.3.1.1. Análise da Unidade 1 quanto à compressão e a capacidade de carga

Campos et al. (1987) realizaram ensaios de compressão uniaxial em rochas da Formação Corumbataí para análise da resistência a compressão (σ_c) e obtiveram resultados que variavam de resistência baixa a extremamente alta para rochas sedimentares, valores entre 9,6 MPa a 147,2 Mpa.

Devido a pequena espessura dos solos residuais da Formação Corumbataí, a eventual instalação de tanques de armazenamento subterrâneo (TAS) nesta unidade, será a uma profundidade de 4 m onde todo solo será retirado e o tanque se apoiará em rocha alterada. Assim de uma forma orientativa, se analisarmos os dados de IRP obtidos em ensaios SPT, acordo com as classificações de Chiossi (1975) e Lima (1979), teremos as tensões admissíveis para este terreno. Para a classificação de Lima (1979) as tensões admissíveis estão entre 335,36 kPa até valores maiores que 470,73 kPa, para IRP entre 13 a 49, já Chiossi (1975) admite valores de tensão maiores que 196,14 kPa para a mesma faixa de valores de IRP. Para ambas classificações as tensões admissíveis estão entre 335,36 e 470,73 kPa. Um tanque de armazenamento subterrâneo, juntamente com as cargas que o envolve resultam numa pressão de 43,83 kPa, isto é, valor inferior às tensões obtidas.

De acordo com o dados de Cottas (1983) os solos residuais da Formação Corumbataí apresentam média compressibilidade ($C_c = 0,26$) e são caracterizados como pré-adensados (TABELA 09), considerados pelo autor com bons materiais para base de fundações.

TABELA 09: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais da Formação Corumbataí, referentes à compressão, colapso e a tensão admissível.

| Compressibilidade | | Colapso do solo | IRP | Tensão admissível* | Tanque subterrâneo Carga aplicada ** |
|----------------------|------------------------------|--------------------|--|--|--------------------------------------|
| Índice de compressão | Razão de pré-adensamento | | | | |
| 0,26 ^(a) | > 1 pré-adens ^(a) | não ^(a) | 47 ^(a) 13 a 49 – rocha alterada/rocha ^(b) 6 – solo residual ^(b) | 335,36 a 470,73 kPa (rocha e rocha alterada) | 43,83 kPa |

* Intervalo estabelecido pelas classificações de Chioffi (1975) e Lima (1979)

** tanque de gasolina, 30.000 l (0,8 g/cm³), mais carga de recobrimento, piso de concreto, colchão drenante de brita.

(a) Cottas (1983)

(b) Braga (1994), valores médios

6.3.1.2. Análise da Unidade 1 quanto à expansão

A expansibilidade das rochas da Formação Corumbataí foi analisada por Campos et al. (1987) através de ensaios de expansão livre uniaxial não confinada lateralmente, onde foi confirmada a baixa expansibilidade do material, que apresentou expansão livre “E” entre 0,10% e 1,36%. Vale ressaltar que rochas com altos valores de resistência a compressão simples também apresentam baixa expansibilidade.

Para Campos et al. (1987) os principais problemas apresentados pelas rochas da Formação Corumbataí relacionam-se a situações especiais de climatização. Conforme o referido autor, o parâmetro que exige melhor definição é o desconfinamento da rocha associado a ciclos de umedecimento e secagem. Como foi verificado pelos autores citados, a expansibilidade das rochas estudadas não é significativa, levando-se a admitir que as pressões de expansão não são elevadas. É possível que as pressões de expansão inexpressivas na rocha, tornem-se apreciáveis na medida de sua degradação pelos agentes intempéricos. Para Campos (1989), nos solos da Formação Corumbataí (forma final dos produtos do intemperismo), a presença e o comportamento dos argilo-minerais passa ser a causa de elevadas pressões de expansão.

Em áreas da Formação Corumbataí, argilo-minerais como as ilitas geraram as esmectitas por processo da alteração devido a antiga situação do nível d’água subterrâneo. As esmectitas ocorrem como filmes ou películas no plano de acamamento, que junto com o alívio de pressões (desconfinamento) causam a

desagregação (“empastilhamento”) do material. Este fenômeno é auxiliado pela oscilação sazonal atual do nível d’água subterrâneo causando o aumento e redução do volume das rochas (ZANARDO, 2003) (informação verbal).

De acordo com Chen (1975) o índice de plasticidade (IP) pode indicar o potencial de expansão. Assim com base na TABELA 08, para IP = 18, tem-se um médio potencial de expansão (vide QUADRO 06, p. 46). Outro índice de expansão é a massa específica seca das argilas relacionadas com o teor de umidade. Solos com densidade seca a cima de $1,76 \text{ g/cm}^3$ ($110 \text{ pcf (lb/ft}^3)$) geralmente exibem alto potencial de expansão. Baseado nos índices físicos obtidos por Cottas (1983) pode-se definir a massa específica seca (ρ_d), através da fórmula $\rho_d = \rho / 1 + w$, onde ρ é a massa específica natural e w corresponde ao teor de umidade. Assim temos $\rho_d = 1,44 \text{ g/cm}^3$ valor inferior em relação ao alto potencial de expansão.

6.3.1.3. Análise da Unidade 1 quanto à dificuldade de escavação

Com relação a escavabilidade, a ocorrência de algumas fácies mais endurecidas de coloração cinza podem representar dificuldades de escavações em obras de tubulações e até para exploração mineral, no caso desta pesquisa a abertura da cava para a instalação do tanque subterrâneo. A rocha subjacente ao solo residual apresenta zona de alteração escarificável ou até mesmo escavável em determinados locais (COTTAS, 1983). Segundo a classificação de Redaelli e Cerello (1998) estaria representada por “materiais brandos” (solo argiloso) e “rocha branda” (rocha razoavelmente dura, que se separam em fragmentos ao longo de fissuras). Com menor frequência podem ser escavadas camadas com maior resistência (arenitos muito finos e siltitos carbonáticos) (SCHNEIDER et al., 1974), estas classificadas como “rocha dura” (REDAELLI e CERELLO, 1998).

6.3.1.4. Análise da Unidade 1 quanto à corrosão

A agressividade dos solos da Formação Corumbataí a materiais metálicos enterrados não foi analisada, pois a instalação do tanque seria feita sobre rocha, devido a pequena espessura destes solos, e esta pesquisa se baseou apenas na agressividade dos solos.

6.3.1.5. Análise da Unidade 1 quanto ao fraturamento estrutural

Segundo Facincani (2000) o padrão de fraturamento da Formação Corumbataí é denso, marcado por diáclases com mergulhos subverticais (entre 70° a 90°), geralmente com 3 a 4 sistemas de juntas. Os espaçamentos das famílias de juntas dessa unidade são densos, variando de centimétrico a decimétricos. As descontinuidades de direção NW-SE são caracterizadas por apresentarem-se localmente abertas e freqüentemente preenchidas por calcita, podendo atingir alguns centímetros de largura. As famílias mais representativas da Formação Corumbataí têm seus máximos de concentração N225/88 e N135/88.

Segundo Christofolletti (2003) são encontrados veios silico-carbonáticos e carbonáticos preenchendo as descontinuidades, além de argilo-minerais como caolinita, illita e esmectitas (MASSONI, 2001).

O fraturamento tem grande importância no que tange a contaminação da água subterrânea pois são caminhos preferencias para o transporte de contaminantes. Quando as descontinuidades estão fechadas ou preenchidas o transporte de contaminantes fica prejudicado, impedido de se propagar.

6.3.2. Unidade de Análise 2 – Diabásio

O solo desta unidade é constituído por um material argiloso (ANEXO 2) com coloração vermelha arroxeadada (QUADRO 17), tendo como minerais predominantes quartzo, caolinita, gibsitita, hematita e goetita, ocorre também a presença de argilo-mineral interestratificado podendo ser originado da alterações de micas verificado pela difração de raio-x (ANEXO 3).

QUADRO 17: Descrição do perfil de solo encontrado na área de estudo – Unidade 2.

| Unidade de Análise 2 Diabásio | Síntese |
|---|---|
| Perfil de solo característico (até profundidade de 4,00m) | Solo residual (latossolo roxo) argilo-arenoso com tonalidades vermelho arroxeadado grãos de quartzo com película de oxido de Fe, perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação. Ocorrências localizadas de solo saprolítico (ponto ST-17 – ANEXO 1). |

Os valores de CTC, verificados em análises, encontram-se entre 3,65, 4,14 e 7,37 meq/100g (ST-3, ST-16 e ST-17) valores inferiores aos estabelecidos por Leite e Zuquette (1996), mas se relacionarmos com as outras unidades estes são maiores, apresentando maior capacidade de retenção de contaminantes que as demais unidades analisadas na área.

No que se refere à condutividade hidráulica, os valores obtidos por Cottas (1983) (TABELA 10) podem ser classificados como sendo de “drenabilidade difícil” de acordo com Casagrande e Fadun (TERZAGHI e PECK, 1962) ou de “razoável” permeabilidade segundo Zuquette (1987). Duarte (1980) caracteriza solos desta unidade como não tendo uma condutividade hidráulica definida, devido a variação local das características granulométricas. Por se tratar de rocha ígnea é praticamente impermeável quando são e pode-se esperar água em subsuperfície no limite solo-rocha ou rocha alterada – rocha são em épocas de chuva e, em maior profundidade, associadas às fraturas no maciço (ZAINÉ, 2000).

TABELA 10: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados do diabásio, baseado em Cottas (1983).

| | | |
|--|-----------|----------------------|
| Teor de umidade (%) | | 23,9 18,3 – 27,1* |
| Massa específica. seca g/cm³ | | 1,11** |
| Massa específica Natural g/cm³ | | 1,38 |
| Massa específica dos Sólidos g/cm³ | | 3,1 2,83 – 2,86* |
| Limites de consistência | LL | 47 48* |
| | LP | 32 37 * |
| | IP | 15 11 e NP* |
| Condutividade hidráulica (cm/s) | | 5,1.10 ⁻⁵ |

*Dados obtidos nesta pesquisa

**Calculo feito a partir de massa específica natural e teor de umidade

6.3.2.1. Análise da Unidade 2 quanto à compressão e capacidade de carga

A capacidade de carga para esta unidade pode ser analisada de forma orientativa, verificando-se a relação entre o IRP e a tensão admissível através da classificação de Chiossi (1975) e Lima (1979). Assim para um IRP=11 tem-se

valores entre 117,68 e 343,25 kPa, valores superiores a carga exigida pelo tanque de armazenamento subterrâneo (TAS) e seus complementos (43,83 kPa). Com índice de compressibilidade (Cc) igual a 0,28 a unidade é classificada como “média compressibilidade” (início do intervalo), para Cottas (1983) bons materiais para base de fundações (TABELA 11).

TABELA 11: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados do diabásio, referentes à compressão, colapso e às tensões admissíveis baseado em Cottas (1983).

| Compressibilidade | | Colapso do solo | IRP | Tensão admissível* | Tanque subterrâneo Carga aplicada ** |
|----------------------|--------------------------|-----------------|-----|---------------------|---|
| Índice de compressão | Razão de pré-adensamento | | | | |
| 0,28 | >1 pré-adens. | não | 11 | 117,68 a 343,25 kPa | 43,83 kPa |

* Intervalo estabelecido pelas classificações de Chiossi (1975) e Lima (1979)

** tanque de gasolina, 30.000 l (0,8 g/cm³), mais carga de recobrimento, piso de concreto, colchão drenante de brita.

6.3.2.2. Análise da Unidade 2 quanto à expansão

Quanto ao potencial de expansão, o índice de plasticidade (IP) de acordo com Chen (1975), pode indicar o potencial de expansão. O índice IP observado na TABELA 10 refere-se a um potencial de expansão baixo a médio e a massa específica seca ($\rho_d = 1,11 \text{ g/cm}^3$) também indica valor inferior ao alto potencial de expansão estabelecido (item 4.4.3.). Os minerais de argila presentes nesta unidade como caolinita e gibsita não favorecem a expansão (ANEXO 3).

6.3.2.3. Análise da Unidade 2 quanto à dificuldade de escavação

Um dos principais problemas encontrados nesta unidade está relacionado com a escavabilidade dos terrenos, a presença de blocos e “lajes” de diabásio não alterados dificultam a execução de obras que exijam terraplanagem e escavações por se tratarem de rochas “muito duras”, segundo a classificação de Redaelli e Cerello (1998), sendo necessária adequar o planejamento da obra às características do meio físico.

6.3.2.4. Análise da Unidade 2 quanto à corrosão

Com relação a agressividade dos solos de alteração do diabásio foram analisados os seguintes parâmetros: condutividade elétrica (mmho.cm), pH, teor de umidade e EH (potencial redox) (TABELA 12).

Segundo aos valores de condutividade elétrica medidos para esta unidade, estes podem classificar os solos como *corrosivos*, com base em Zuquette (1993) (vide QUADRO 04, p.37). Os valores obtidos apresentam-se mais elevados em relação aos valores das outras unidades de análise onde este fator foi analisado. Desta forma a **Unidade de análise 2**, com características argilosas, apresenta maior capacidade de propagação de corrente elétrica e por conseqüência maior potencialidade para o desenvolvimento de processos corrosivos. Isto pode ser comprovado no gráfico comparando os valores de condutividade elétrica com as diferentes unidades, mostrando que a condutividade aumenta com a quantidade de argila ou materiais finos presentes no solo (ANEXO 5).

Com base em Steinrath (1968 apud CORCORAN et. al., 1977) e Trabanelli (1972, apud SEBRÃO e SERRA, 1993), para valores de umidade acima de 20%, o solo passa a ser um meio corrosivo. O teor de umidade (*w*) para as amostras analisadas encontram-se acima ou próximos de 20% fazendo do solo um meio eletroquímico ativo. Os valores de pH inferiores a 6 e os valores de EH (potencial redox) indicando a presença de oxigênio no solo, contribuem para o desenvolvimento de processo corrosivo, elevando a taxa de corrosão (item 4.4.1.2.).

Assim depois da análise dos resultados de condutividade elétrica, teor de umidade, potencial redox (EH) e pH, a **Unidade de análise 2** apresenta-se favorável ao desenvolvimento de processos corrosivos.

TABELA 12: Parâmetros utilizados para definição da agressividade do solo na Unidade de Análise 2.

| Parâmetros | |
|--|---|
| Unidade de Análise 2 (material analisado: solo de alteração do diabásio) | Condutividade elétrica 0,32 e 0,41 mmho.cm (ST-16 e ST-17) |
| | pH : 4,8 a 6,0 |
| | EH por volta de 350 mV |
| | Teor de umidade: 18,34% a 27,48% |

6.3.2.5. Análise da Unidade 2 quanto ao fraturamento estrutural

Segundo Cottas (1983) o substrato dos solos de diabásio apresenta-se altamente fraturado, condições que propiciam a fácil poluição das águas subterrâneas pela percolação de contaminantes.

Segundo Duarte (1980), os derrames basálticos da Formação Serra Geral são geralmente constituídos de tres camadas, a inferior e superior caracterizadas por fraturamento horizontal com grande abertura, e a porção central com diaclasamento vertical pouco denso preenchidas por argilo-minerais, calcedônias e calcitas, ocorrem também descontinuidades de contato entre a porção central e as outras camadas. Na escala dos derrames as possibilidades hidrogeológicas são condicionas principalmente pela descontinuidades de contato e o desenvolvimento de juntas horizontais, que também são caminhos preferencias para o deslocamento de contaminantes.

6.3.3. Unidade de Análise 3 – Formação Rio Claro

O solo encontrado na Formação Rio Claro (no horizonte estudado 0 – 4 m) é arenoso e pouco argiloso com coloração marrom avermelhada. Até a profundidade de 4,00m, amostrada nesta pesquisa, foi descrito um perfil de solo homogêneo (QUADRO 18). Apresenta índice de resistência a penetração (IRP) por volta de 4 com compactidade variando entre fofa a medianamente compacta, conforme dados obtidos por Cottas (1983) e Braga (1994). Verifica-se um aumento gradual na compactidade entre medianamente compacta a compacta, a medida em que aprofunda no perfil, correspondendo aos arenitos inconsolidados da Formação Rio Claro.

As curvas granulométricas obtidas em ensaio de peneiramento e sedimentação mostram um material com granulometria fina a média, pouco argilosa, com aproximadamente de 75% de areia, 4% de silte e 21% de argila (ANEXO 2). A fração areia é constituída basicamente por grãos de quartzo arredondados a subarredondados e a fração fina, é composta predominantemente pelo argilo-mineral caolinita envolvendo os grãos de quartzo e preenchendo os poros (OLIVA, 2002).

QUADRO 18: Descrição do perfil de solo encontrado na área de estudo – Unidade 3.

| Unidade de Análise 3 Formação Rio Claro | Síntese |
|---|--|
| Perfil de solo característico (até a profundidade de 4,00m) | Perfil de solo residual composto de areia argilosa de coloração marrom avermelhada com tonalidades mais escuras nos primeiros 0,5 m, granulação fina a média, bem selecionada (ou selecionada) com poucos grãos grossos esparsos sub arredondados, com película de óxido de Fe, e matriz argilosa. Presença de carvão pode ocorrer. A medida que se aproximam zonas mais úmidas no perfil, ocorrem manchas acinzentadas. Perfil de solo homogêneo, sem variação. |

Com relação a capacidade de troca catiônica (CTC) para os solos da Formação Rio Claro, os valores obtidos em análises variam de 1,04 a 1,76 meq/100g (ANEXO 4). Assim no que se refere à capacidade de retenção de contaminantes, de acordo com a classificação de Leite e Zuquette (1996) (\geq a 10 meq/100g), a CTC indicada não é favorável a retenção de contaminantes, mesmo quando comparado aos valores da classificação de Souza e Zuquette (1993) para disposição de resíduos (ver item 4.1.5.1.).

Quanto à condutividade hidráulica, os valores expostos na TABELA 13, obtidos por vários autores, são classificados como sendo de “boa drenabilidade” de acordo com Casagrande e Fadun (TERZAGHI e PECK, 1962) e como de “razoável” a “alta” permeabilidade de acordo com o intervalo estabelecido por Zuquette (1987).

TABELA 13: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados da Formação Rio claro baseado em diferentes autores.

| | |
|--|---|
| Teor de umidade (%) | 8,76 a 22,08 * 13,0 ^(a) |
| Massa específica natural (g/cm³) | 1,64 ^(a) 1,54 - 1,77 ^(b) |
| Massa específica dos Sólidos (g/cm³) | 2,7 ^(a) 2,65 ^(c) 2,64 * |
| Limites de consistência | LL 24 ^(a) 27,6 ^(d) 24,3 – 40,5* |
| | LP 22 ^(d) 18,6 – 24,6* |
| | IP 7 ^(a) 5,6 ^(d) 5,7 – 15,9* |
| Porosidade (%) | 35 a 52% ^{(a)(b)(c)(d)(e)} |
| Índice de vazios | 0,5 a 1,1 ^{(a)(b)(c)(d)(e)} |
| Condutividade hidráulica (cm/s) | 2,3.10 ⁻⁴ ^(a) 8.10 ⁻³ – 1.10 ⁻² ^(f) 5,15.10 ⁻³ a 5,65.10 ⁻³ ^(d) |

*Dados obtidos nesta pesquisa

(a) Cottas (1983)

(b) Campos e Vicelli Neto (1987)

(c) Gibotti Júnior (1999)

(d) Campos (1979)

(e) Fundunesp (1999 e 2000)

(f) Oliva (2002)

6.3.3.1. Análise da Unidade 3 quanto à compressão

De acordo com Gibotti Júnior (1999) no ensaio de duplo adensamento, corpos de prova a umidade natural se assemelham a materiais incompressíveis, devido a presença das forças de sucção, denotada pela baixa umidade natural. Campos (1979), Campos e Vicelli Neto (1987) e Cottas (1983) obtiveram C_c (índice de compressão) indicando média a baixa compressibilidade para os solos da Formação Rio Claro. A razão de pré-adensamento ($OCR > 1$) obtida do ensaio de adensamento mostrou que o solo é normalmente adensado (TABELA 14).

TABELA 14: Valores representativos de dados geotécnicos de materiais inconsolidados da Formação Rio claro, referentes à compressão, colapso e tensão admissível baseado em diferentes autores.

| Compressibilidade | | Colapso do solo | IRP | Tensão admissível * | Tanque subterrâneo Carga aplicada ** |
|---|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Índice de compressão | Razão de pré-adensamento | | | | |
| 0,22 ^(a) 0,15 a 0,31 ^(b) 0,33 a 0,45 ^(c) | = 1 norm-adens ^(a) | I = 1,95 a 4,95 ^(d) | 04 ^{(a) (e) (f)} | de < 98,07 – 147,11 kPa | 43,83 kPa |

* Intervalo estabelecido pelas classificações de Chiossi (1975) e Lima (1979)

** tanque de gasolina, 30.000 l ($0,8 \text{ g/cm}^3$), mais carga de recobrimento, piso de concreto, colchão drenante de brita.

(a) Cottas (1983)

(b) Campos e Vicelli Neto (1987)

(c) Campos (1979)

(d) Gibotti (1999)

(e) Braga (1994)

(f) Fundunesp (1999 e 2000)

6.3.3.2. Análise da Unidade 3 quanto ao colapso do solo e capacidade de carga

Gibotti Júnior (1999) para identificação do comportamento colapsível empregou o ensaio de adensamento simples com inundação, sob a tensão de 40 kPa, em corpo de prova situado logo abaixo da profundidade onde se situa a base de um tanque subterrâneo. A carga definida corresponde às tensões admitidas por um conjunto tanque, aterro, pavimento etc. conforme previsto em norma técnica NBR-13781 (ABNT, 2001).

Provas de carga realizadas sobre solos arenosos superficiais, nas cidades de Ilha Solteira, São Carlos e Bauru indicaram valores de tensões admissíveis da ordem de 50 kPa, para o primeiro metro de profundidade (AGNELLI, 1992; CINTRA

e CINTRA, 1992; MELLIOS, 1985 apud ALBIERO et al., 1993). Provas de carga direta realizadas a 2 m de profundidade na cidade de Bauru indicaram para o primeiro metro valores de tensões admissíveis da ordem de 60 kPa (AGNELLI, 1992 apud ALBIERO et al., 1993). Estes valores foram obtidos com solos em seu estado natural. Havendo um aumento de umidade o comportamento dos solos se modifica, pois os mesmos são colapsíveis, mesmas características do solos da Formação Rio Claro.

Conforme o coeficiente de colapso estrutural de Vargas (1978) (item 4.4.4.3.) Gibotti Júnior (1999) obtém valores muito próximos do valor limite, > 2%, considerando o solo como tendo comportamento colapsível (TABELA 14), pois em condições reais pode estar exposto a uma possível percolação de líquidos com características alcalinas ($\text{pH} > 7$) que tendem a aumentar o coeficiente de colapso atuando como defloculante da fração argila do solo (AGNELLI & ALBIERO, 1997).

ALBIERO et al. (1993) enfoca o efeito da colapsividade no resultado de sondagens de simples reconhecimento no comportamento de fundações, em estudos realizados na área de um conjunto habitacional em Bauru (SP). No ano de 1987 foram realizadas sondagens a profundidade de 20 m com IRP = 20, onde o N.A. não foi encontrado, no ano seguinte novas sondagens foram feitas e o N.A. foi encontrado a 18 m e o IRP caiu para 10. Nos primeiros 5 m não apresentaram muita discrepância no IRP entre um ano e outro estando por volta de 3. Assim a variação do nível freático altera de forma significativa os valores obtidos com o SPT, fazendo supor que interferirá na capacidade de carga de fundações.

Os solos da Formação Rio Claro apresentam as mesmas características dos solos de Bauru, colapsível e com nível d'água subterrâneo profundo. Como o tanque subterrâneo tem sua base a 4m de profundidade e a variação do freático não exerce influência, é possível a utilização da relação IRP X tensões admissíveis (utilizando a classificação de Chiossi, 1975 e Lima, 1979 (item 4.4.2.1.)), no caso IRP = 4 as tensões admissíveis podem variar de < 98,07 kPa a 147,11 kPa. Mas deve ser levado em conta que vazamentos de tubulações de água e esgoto podem ocorrer reduzindo o IRP, induzindo o colapso do solo e portanto esta correlação empírica não corresponderá a situação instalada.

6.3.3.3. Análise da Unidade 3 quanto à corrosão

Para o solo da Formação Rio Claro, amostrado a uma profundidade de aproximadamente 4,00m, foram analisados condutividade elétrica, pH, EH e teor de umidade, para determinação da agressividade ou corrosividade do solo (TABELA 15).

Os valores de condutividade elétrica obtidos para esta unidade (TABELA 15) podem ser classificados como *não corrosivos*, baseado na classificação de Zuquette (1993) (QUADRO 04). O fato não indica que não haja condições de propagação de corrente elétrica, refletindo apenas a baixa concentração de eletrólitos (íons) disponíveis no meio que poderiam induzir o processo corrosivo. A baixa condutividade está relacionada também com o elevado teor de areia presente neste solo que reduz o valor da condutividade elétrica (BRAGA, 2003) (ANEXO 5).

TABELA 15: Parâmetros utilizados para determinação da agressividade do solo na Unidade de Análise 3.

| Unidade de Análise 3 (solo residual da Fm Rio Claro) | Parâmetros |
|---|--|
| | Condutividade elétrica 0,003 a 0,012 mmho.cm |
| | pH : 4,9 e 6,1 |
| | EH > 400mV |
| | Teor de umidade: 8,76% a 22,08% |

A condutividade elétrica não foi um fator decisivo para o estabelecimento da agressividade do solo da Formação Rio Claro, sendo o pH e o teor de umidade os fatores que mais influenciaram, como será visto a seguir.

De acordo com Uhlig (1968 apud NOGUEIRA JÚNIOR e SILVA, 1990), os critérios de identificação de solos corrosivos a materiais metálicos considera valores de $\text{pH} < 6$ como solos corrosivos. Autores como Kelly e Mares (1993), consideram que esta faixa de valores de pH apresenta um grau de corrosividade muito alto. Todos os valores medidos de pH estão abaixo de 6 nesta unidade (valores entre 4,9 e 6,1 – TABELA 15).

Segundo Gibotti Júnior (1999), para o solo da Formação Rio Claro, os valores de pH tendem a diminuir com o aumento da profundidade conferindo um caracter corrosivo ao solo nos horizontes mais inferiores.

O alto grau de aeração determinado pelo EH (potencial redox), não favorece do desenvolvimento de bactérias redutoras de sulfatos, portanto a corrosão induzida por estes microrganismos pode ser descartada, uma vez que estas bactérias necessitam de ambientes redutores. O alto valor de EH representa um elevado grau de aeração, que como visto anteriormente (item 4.4.1.2.) pode elevar a taxa de corrosão no solo.

Steinrath (1968 apud CORCORAN et. al., 1977) e Trabaneli (1972 apud SEBRÃO e SERRA, 1993) determinam que para valores de umidade acima de 20%, o solo passa a ser um meio corrosivo. Conforme observado os teores de umidade natural (w) para esta unidade estão abaixo de 20% (TABELA 13), não favorecendo o desenvolvimento de processo corrosivo.

Gibotti Júnior (1999) parte do princípio de que solos podem estar saturados, devido a vazamentos de rede de água, esgoto, ou infiltração de águas pluviais ou de lavagem (postos de combustíveis), desta forma o autor calculou o teor de umidade na saturação ($S_r = 100\%$), onde todos os resultados apresentaram um teor de umidade acima de 20%. Para os solos desta unidade, os teores de umidade acima de 20% associados com os baixos valores de pH se caracterizam como um meio corrosivo.

Segundo Gibotti Júnior (1999) o processo corrosivo pode ser corroborado pela eventual presença de tensões (corrosão sob tensão item 4.4.1.2.) em tubulações metálicas anexas ao tanque decorrentes de movimentos descendentes, devido ao processo de colapso do solo.

Assim os solos desta unidade podem ser considerados como propícios ao desenvolvimento de processos corrosivos de acordo com os resultados de pH, teor de umidade e EH (potencial redox), além de estarem sujeitos à corrosão sob tensão (TABELA 15).

6.3.4. Unidade de Análise 4 – Aluviões

Os materiais desta unidade são constituídos preferencialmente de areias finas brancas, bem selecionadas com pouco material fino e de material arenoso com alto teor de argila, às vezes conglomerático na base, nas cores cinza e amarelo-clara (COTTAS, 1983). As sondagens realizadas por esta pesquisa identificou

apenas o material mais arenoso (ANEXO 2) cuja descrição está no QUADRO 19. Foram descritos também aluviões restritos e solos podzólicos, hidromórficos e orgânicos associados aos vales abertos e lagoas de cabeceira de drenagem, dentro da área de ocorrência da Formação Rio Claro.

De acordo com os resultados de análise de difração de raio-x, a mineralogia predominante é composta de quartzo, caulinita, mica, e podem estar presentes argilo-minerais interestratificados (ST-18, ANEXO 3).

Quanto a CTC desta unidade, os resultados obtidos variam entre 1,58 a 5,35 meq/100g valores inferiores aos indicados por Leite e Zuquette (1996) (≥ 10 , meq/100g) mesmo quando comparado com os valores de classificação de Souza e Zuquette (1993) para disposição de resíduos, isto é, com pouca capacidade para a retenção de contaminantes.

QUADRO 19: Descrição do perfil de solo encontrado na área de estudo – Unidade 4.

| Unidade de Análise 4 Aluviões | Síntese |
|--|---|
| <p>Perfil de solo característico (até a profundidade de 4,00m)</p> | <p>Areia variando entre muito fina a média quartzosa, grãos arredondados a subarredondados, bem selecionado, limpos Apresenta coloração amarelada. Com o aumento da umidade o material passa a apresentar manchas avermelhadas, cinza e ocre e abaixo do N.A., ocorre o predomínio de colorações ocre. Para os materiais associados aos vales e cabeceiras de drenagem foram identificados sedimento arenosos quartzoso sub-arredondado selecionado, granulação fina a média, cor avermelhada com manchas cinza e ocre ao longo do perfil. Solo orgânico foi observado no ST-18, cor cinza (siltico) e branca (lentes de areia fina).</p> |

Para a condutividade hidráulica, os valores obtidos pelo autor da TABELA 16 podem ser classificados como sendo de “difícil drenabilidade” de acordo com Casagrande e Fadun (TERZAGHI e PECK, 1962) e para a classificação de Zuquette (1987) as áreas arenosas são de “razoável” permeabilidade, e “baixa permeabilidade” para os aluviões argilosos.

TABELA16: Valores representativos de dados geotécnicos dos Aluviões, baseado em Cottas (1983).

| | | Arenoso | Argiloso |
|--|----|--------------------------|---------------------|
| Teor de umidade (%) | | 32,7% 21,84 a 37,62%* | 16,4 |
| Massa específica seca g/cm ³ | | 1,30** | 1,74** |
| Massa específica natural g/cm ³ | | 1,73 | 2,03 |
| Massa específica dos sólidos g/cm ³ | | 2,71 2,64 – 2,69 * | 2,65 |
| Limite de consistência | LL | 21 | 29 |
| | LP | 15 | 22 |
| | IP | 06 NP* | 07 |
| Condutividade hidráulica (cm/s) | | $4,2 \cdot 10^{-4}$ | $9,0 \cdot 10^{-6}$ |

* valores obtidos nesta pesquisa

** calculo feito a partir da massa específica natural e teor de umidade

6.3.4.1. Análise da Unidade 4 Quanto à compressão e capacidade de carga

De acordo com os valores de IRP esta unidade é caracterizada como pouco compacta no que se refere a parte das areias, e rija no material com maior teor de argila (TABELA 17). Assim se analisarmos os valores de IRP de acordo com a classificação de Chiossi (1975) e Lima (1979) temos as tensões admissíveis para esta unidade, entre 98,07 e 294,21 kPa, inferior às tensões resultantes da instalação de TAS (43,83 kPa). Os valores do índice de compressão (Cc) da TABELA 17 indicam baixa compressibilidade ($Cc \leq 0,25$). Para Cottas (1983) os parâmetros de compressibilidade e capacidade de carga são excelentes como suporte de fundação, mas apresentam lentes de turfa compressíveis que inverte a situação.

TABELA 17: Valores representativos de dados geotécnicos dos Aluviões, referentes à compressão, colapsividade e tensão admissível, baseado em Cottas (1983).

| Aluvião | Compressibilidade | | Colapso do solo | IRP | Tensão admissível* | Tanque subterrâneo Carga aplicada ** |
|----------|----------------------|--------------------------|-----------------|-----|--------------------|--------------------------------------|
| | Índice de compressão | Razão de pré-adensamento | | | | |
| Arenoso | 0,08 | >1 pré-adens. | Não | 8 | 98,07 a 294,21 kPa | 43,83 kPa |
| Argiloso | 0,12 | >1 pré-adens. | não | 12 | | |

* Intervalo estabelecido pelas classificações de Chiossi (1975) e Lima (1979)

** tanque de gasolina, 30.000 l (0,8 g/cm³), mais carga de recobrimento, piso de concreto, colchão drenante de brita.

6.3.4.2. Análise da Unidade 4 quanto à expansão

Para analisar o potencial de expansão dos materiais da Unidade de Análise 4 foi utilizado o IP, de acordo com Chen (1975), que aplica uma correlação entre ambos. Assim, com base na TABELA 16, para IP igual a 6 (arenoso) e 7 (argilosos) tem-se um baixo potencial de expansão (vide TABELA 06, p.51). Como já foi visto a massa específica seca das argilas relacionadas com o teor de umidade fornece o índice de expansão. Solos com densidade seca acima de $1,76 \text{ g/cm}^3$ ($110 \text{ pcf (lb/ft}^3)$) geralmente exibem alto potencial de expansão. Baseado nos índices físicos obtidos por Cottas (1983) pode-se definir a massa específica seca (ρ_d), através da fórmula $\rho_d = \rho / 1 + w$, onde ρ é a massa específica natural e w corresponde ao teor de umidade. Assim temos $\rho_d = 1,74 \text{ g/cm}^3$ para material mais argiloso, valores próximos em relação ao alto potencial de expansão ($\rho_d = 1,76 \text{ g/cm}^3$). Em termos mineralógicos o material arenoso desta unidade não favorece a expansão pois apresenta minerais como quartzo e caolinita (ANEXO 3).

6.3.4.3. Análise da Unidade 4 quanto à dificuldade de escavação

Para esta unidade, a dificuldade de escavação está relacionada à implantação do tanque de armazenamento subterrâneo. Em solos instáveis como areia e turfa pode ocorrer a desestabilização das paredes da cava de instalação do tanque, ocasionada devido a pouca profundidade do nível d'água subterrâneo. Assim como previsto na NBR-13781 (ABNT, 2001) deve ser realizado o escoramento das paredes da cava para a prevenção de acidentes com trabalhadores.

6.3.4.4. Análise da Unidade 4 quanto à corrosão

Para os sedimentos aluvionares, amostrados em uma profundidade de aproximadamente 4,00m, foram analisados condutividade elétrica, pH, EH (potencial redox), teor de umidade e teor de sulfato e sulfeto para determinação da agressividade ou corrosividade do solo (TABELA 18).

TABELA 18: Parâmetros utilizados para determinação da agressividade do solo na Unidade de Análise 4.

| Unidade de análise 4 (material analisado: solo aluvionar) | Parâmetros |
|--|---|
| | Condutividade elétrica 0,018 a 0,44 mmho.cm |
| | pH : 5,0 a 6,3 |
| | EH < 400mV – 318 a 410 mV |
| | Teor de umidade: 21,84% a 37,62% |
| | Teor de sulfato: 2016 a 2544 (>300mg/Kg) (prof. 4,00m), ST-18 36mg/Kg |
| Teor de sulfeto: <0,5 mg/Kg | |

Os valores de condutividade elétrica obtidos podem classificar esta unidade como *não corrosivas* até *corrosiva* (vide QUADRO 04, p.37), pela classificação de Zuquette (1993), devido a ampla variação dos valores.

O material mais arenoso da Unidade de análise 4 apresenta valores mais baixos de condutividade elétrica em relação ao material argiloso, que possui valores próximos aos encontrados na Unidade de Análise 2 (Diabásio) (ANEXO 5).

Com relação ao pH, os valores mantêm-se entre 5, 6 e 6,3 (ANEXO 4) indicando um caracter corrosivo do solo baseado em Uhlig (1968 apud NOGUEIRA JÚNIOR e SILVA, 1990).

O teor de umidade natural em todos os pontos amostrados apresentam valores superiores a 20% (entre 18,38 a 37,62%) favorecendo o processo corrosivo (TABELA 18, ANEXO 4).

Bactérias como *Desulfovibrio* e *Desulfotomaculum* podem influenciar na reação de corrosão, estas são anaeróbias e a ausência de oxigênio é necessária para sua sobrevivência, tendo como fonte de energia a redução do sulfato para sulfeto. A presença de sulfato solúvel e sulfeto junto com baixos valores de EH (potencial redox) indicam condições favoráveis a atividade destas bactérias. As amostras analisadas nesta unidade revelaram a presença de sulfato e sulfeto, onde a quantidade acima de 300 mg/Kg de sulfato tem um peso significativo na classificação de TrabANELLI (1972 apud SEBRÃO e SERRA, 1993) e quantidades menores que 0,5 mg/Kg de sulfeto apresentam um peso intermediário nesta classificação. Estes valores foram observados nas análise, que juntamente com

valores inferiores a 400 mV de EH podem enquadrar esta unidade como sendo potencialmente agressiva (MILLER e TILLER, 1970 apud GENTIL, 1996).

Vale destacar que a determinação dos teores de sulfato e sulfeto, apenas foram levantados para as áreas com nível d'água subterrâneo próximo a superfície por se acreditar que áreas alagadas ou saturadas em água seriam ambientes redutores favoráveis ao desenvolvimento de bactérias, o que não é verdadeiro pois a água pode conter oxigênio dissolvido não caracterizando um ambiente redutor (GENTIL, 1996).

Para os resultados das análises de amostras de água, em áreas aluvionares e fundos de vale, os valores de pH encontrados foram da ordem de 5,8 a 6,75, podendo ser classificadas como praticamente neutras. Para que este tipo de água ataque o ferro (TAS - tanque de armazenamento subterrâneo) é necessário que ela contenha oxigênio dissolvido. O ferro em meios deaerados, tanto águas ou solos, normalmente não sofrem corrosão considerável (GENTIL, 1996).

Entretanto, como visto anteriormente, mesmo em ausência de aeração, observa-se corrosão acentuada, pois as águas podem conter bactérias que não sobrevivem na presença de oxigênio, no caso as bactérias redutoras de sulfato. Se observarmos a TABELA 19, os pontos de amostragem ST-13, 14 e 15 apresentam valores de pH favoráveis ao crescimento destas bactérias e valores de EH (potencial redox) mais baixos, desta forma, de acordo com a classificação de Miller e Tiller (apud GENTIL 1996) (vide TABELA 05, p.40) representam uma corrosividade "intensa". Apesar da análise do teor de sulfato ter sido feita apenas nas amostras de solo, a presença de sulfato pode corroborar para o desenvolvimento da corrosão.

TABELA 19: Valores de pH, EH (potencial redox) e condutividade elétrica para as amostras de água (Unidade de Análise 4).

| LOCAL | ponto | pH | EH(mV) | Condutividade elétrica (mmhos/cm) |
|---|-------|------|--------|-----------------------------------|
| Fundo de vales instalados na Formação rio Claro | ST-11 | 5,8 | 388,1 | 0,0601 |
| | ST-18 | 6,04 | 301,7 | 0,0266 |
| Depósito aluvionares | ST-13 | 6,75 | 87,7 | 0,106 |
| | ST-14 | 6,4 | 135,2 | 0,143 |
| | ST-15 | 6,3 | 61,2 | 0,145 |

Para os pontos ST-11 e ST- 18 foram constatados valores de pH onde é admitido o desenvolvimento de bactérias, juntamente com a presença de sulfato no solo e com potencial redox por volta de 300mV, podemos considerar as águas da unidade de análise 4 como de corrosividade “discreta” segundo a classificação de Miller e Tiller (apud GENTIL 1996) (vide TABELA 05, p.40).

Outro fator que contribui para o desenvolvimento de processo corrosivo é a condutividade elétrica da água, que caracteriza a presença de sais solúveis e podem acelerar o processo corrosivo.

Em resumo as áreas de aluvião com base nos valores de condutividade, pH, EH, teor de sulfato e sulfeto, e teor de umidade, tanto para os solos como para as águas, conforme os critérios expostos no (item 4.4.1.2.), podem ser consideradas como áreas favoráveis ao desenvolvimento de processos corrosivos.

6.4. Avaliação das unidades de análise quanto à instalação de postos de combustíveis

Neste item é feita uma síntese da caracterização e análise dos principais atributos para a avaliação da implantação de postos de combustíveis, para as diferentes unidades de análise definidas por esta pesquisa.

6.4.1. Avaliação da Unidade de Análise 1 – Formação Corumbataí

São listados a seguir os principais atributos definidos na caracterização e análise da unidade para a avaliação quanto à instalação de postos de combustíveis.

- Tipo de material: siltitos e argilitos, solo residual argiloso;
- CTC: por apresentar em sua composição, minerais como illita e montmorilonitas pode-se estimar valores de CTC favoráveis a retenção de contaminantes;
- Espessura de material inconsolidado: pouco espesso entre 1 e 2 m;
- Profundidade do N.A.: raso < 2m em épocas de chuva, variando na estiagem;
- Condutividade hidráulica: $6,5 \times 10^{-7}$ cm/s para o solo residual e da ordem de 10^{-8} para as rochas, classificadas como impermeáveis segundo Zuquette (1987);

- Declividade: baixas (<5%) a médias (5 – 15 %);
- Quanto à compressão: média compressibilidade ($C_c=0,26$), com resistência a compressão baixa a extremamente alta para rochas sedimentares entre 9,6 MPa a 147,2 Mpa;
- Capacidade de carga: suporta as solicitações impostas pelo tanque;
- Quanto à expansão: baixa expansibilidade (rocha) (CHEN, 1975), potencialmente expansivo (níveis aflorantes);
- Quanto a corrosão: não foi avaliada;
- Dificuldade de escavação: devido a pequena espessura de solo, pode-se encontrar alguma dificuldade na escavação, quando encontra-se a rocha subjacente;
- Fraturamento estrutural: muito fraturado, com descontinuidades preenchidas. Não favorece a percolação do contaminante.

Analisando a instalação de tanques de armazenamento subterrâneo (TAS) neste contexto geológico geotécnico composto por um perfil de rochas silto-argilosas alteradas e um perfil de solo argiloso pouco espesso, a caracterização desta unidade demonstra que podem ocorrer algumas dificuldades, tanto no momento da instalação quanto no decorrer de sua vida útil. A dificuldade de escavação está relacionada com a escavabilidade do material que pode apresentar intercalações de camadas mais resistentes (arenitos, siltitos carbonáticos), além do nível d'água subterrâneo (N.A.) ocorrer na profundidade da cava de instalação do tanque dificultando os trabalhos. A variação do N.A. é um fator que pode causar a expansão do material ocasionando danos nas instalações de tubulações e conexões do sistema de abastecimento de combustíveis.

Ao se tratar de possíveis vazamentos de hidrocarbonetos, esta unidade apresenta características para conter o contaminante, isto é, apresenta baixa condutividade hidráulica e presença de argilo-minerais como illita e montmorilonita. Apesar de apresentar um intenso fraturamento a maioria das descontinuidades estão preenchidas.

Devido a baixa permeabilidade dos materiais da Unidade 1 as condições para a propagação dos hidrocarbonetos são quase nulas, permanecendo localizada próximo à fonte de vazamento. Caso a contaminação atinja zonas aquífera a recuperação da substância será difícil devido a baixa permeabilidade.

6.4.2. Avaliação da Unidade de Análise 2 - Diabásio

São listados a seguir os principais atributos definidos na caracterização e análise da unidade para a avaliação quanto à instalação de postos de combustíveis.

- Tipo de material: material argiloso;
- CTC: 3,65, 4,14 e 7,37 meq/100g, não favorece a retenção de contaminantes (LEITE E ZUQUETTE, 1996), porém apresenta maior capacidade de retenção que as demais unidades analisadas na área;
- Espessura de material inconsolidado: 4 – 13 m , latossolo e solo litólico;
- Profundidade do N.A.: variável entre 3 a 13m;
- Condutividade hidráulica: $5,1 \cdot 10^{-5}$ cm/s (“razoável” segundo classificação de Zuquette (1987));
- Declividade: entre 5 – 10% e 10 – 20%
- Quanto à compressão: média compressibilidade ($C_c=0,28$);
- Capacidade de carga: suporta as solicitações impostas pelo tanque;
- Quanto à expansão: baixo a médio potencial de expansão (CHEN, 1975);
- Dificuldade de escavação: presença de blocos e lajes de diabásio ;
- Quanto à corrosão: favorável ao desenvolvimento de processos corrosivos;
- Fraturamento estrutural: propicia a percolação de contaminantes.

No que se refere a instalação do TAS esta unidade pode apresentar dificuldade de escavação uma vez que são encontrados blocos e lajes de diabásio tornando-se importante investigações complementares. O desenvolvimento de processos corrosivos é favorável nesta unidade o que faz com que cuidados adicionais na execução da obra e escolha de equipamentos sejam necessários

O tipo de material argiloso com condutividade baixa e CTC mais elevadas comparativamente que as outras unidades, pode se considerar esta unidade favorável a retenção de contaminantes.

Quando o topo da rocha são fraturada encontra-se próximo a superfície ou a poucos metros da base do tanque de armazenamento subterrâneo, torna-se um fator agravante pois no caso de vazamentos de hidrocarbonetos, as fraturas servem como caminho mais rápido para o transporte da contaminação.

Quando o nível d'água subterrâneo próximo a superfície também torna-se um agravante, pois além de dificultar a obra, caso esteja na profundidade da cava de instalação do TAS, em caso de vazamento será imediatamente contaminado. Segundo Duarte (1980) a espessura do solo entre a superfície do solo e o nível freático pode em certos casos diminuir o perigo da poluição ou mesmo retardá-la, já que o solo apresenta uma permeabilidade mais homogênea menor que a das zonas fraturadas ou fissuradas dificultando a chegada dos poluentes ao aquífero.

6.4.3. Avaliação da Unidade de análise 3 – Formação Rio Claro

São listados a seguir os principais atributos definidos na caracterização e análise da unidade para a avaliação quanto à instalação de postos de combustíveis.

- Tipo de material: solo areno-argiloso;
- CTC: 1,04 a 1,76 meq/100g, não favorável a retenção de contaminantes, segundo a classificação de Leite e Zuquette (1996);
- Espessura de material inconsolidado: 15 – 30 m;
- Profundidade do N.A.: 15 – 25 m, por volta de 5m no limite com a Unidade de análise 4 (próximos aos fundos vales lagoas e cabeceiras de drenagem);
- Condutividade hidráulica: valores variando entre 10^{-3} e 10^{-2} cm/s, classificados como “alta” permeabilidade (ZUQUETTE, 1987);
- Declividade: <2%, áreas de topo; 5 – 15% e >15% em situações de média encosta;
- Quanto à compressão: apresenta baixa a média compressibilidade (C_c entre 0,15 a 0,45);
- Quanto ao colapso do solo: é colapsível;
- Capacidade de carga: suporta as solicitações impostas pelo tanque;
- Quanto à corrosão: a unidade não é corrosiva em umidade natural; corrosiva quando saturada.

Com base nestes atributos esta unidade não apresenta nenhum problema quanto a instalações subterrâneas (tanque de armazenamento subterrâneo). O potencial de colapso do solo e a agressividade, mostram a necessidade da escolha de medidas de segurança e obras de engenharia adequadas, compatíveis com a

situação local, evitando vazamentos de tubulações de água e esgoto e escolhendo tanques de armazenamento subterrâneo com proteção contra corrosão.

Por ser um material areno-argiloso com condutividades hidráulica classificada como “alta” permeabilidade (item 4.1.2.) e CTC fora dos padrões estabelecidos por classificações (item 4.1.5.1.) esta unidade não apresenta condições para a retenção de contaminantes, caso haja vazamentos. Mas deve-se ressaltar que as grandes espessuras de material inconsolidado e nível d’água profundo são características da unidade que retardam a contaminação das águas subterrâneas.

Dentro desta unidade, áreas próximas à baixa encosta, no limite com a Unidade de Análise 4 e próximas às lagoas e cabeceiras de drenagem onde o N.A. está mais raso ou mais próximos a base do TAS, são mais susceptíveis a contaminação em relação àquelas com N.A. mais profundo. Cabe ressaltar que a flutuação do nível freático dever ser considerada pois podem diluir e transportar possíveis compostos que se encontram na zona não saturada causando a contaminação da água de subsuperfície.

6.4.4. Avaliação da Unidade de análise 4 - Aluviões

São listados a seguir os principais atributos definidos para a caracterização e análise da unidade quanto à instalação de postos de combustíveis.

- Tipo de material: arenoso e argiloso;
- CTC: 1,58 a 5,35 meq/100g, não favorável à retenção de contaminantes segundo classificação de Leite e Zuquette (1996);
- Espessura de material inconsolidado: por volta de 5 m;
- Profundidade do N.A.: inferior a 3 m;
- Condutividade hidráulica: arenoso $4,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s, argiloso $9,0 \cdot 10^{-6}$ cm/s, materiais de “razoável” a “baixa” permeabilidade (ZUQUETTE, 1987);
- Área de inundação: influência dos processos fluviais;
- Quanto à compressão: Baixo índice de compressão ($C_c \leq 0,25$) para aluviões arenosos e argilosos, presença de lentes turfa com alta compressibilidade;
- Capacidade de Carga: suporta as solicitações impostas pelo tanque;

- Quanto à expansão: Baixo potencial de expansão (CHEN, 1975) para material arenoso podendo apresentar potencial expansivo para material argiloso);
- Dificuldade de escavação: instabilidade do material ocasionando a desestabilização das paredes da cava de instalação do tanque;
- Quanto à corrosão: favoráveis ao desenvolvimento de processos corrosivos.

Por apresentar elementos favoráveis ao desenvolvimento de processos corrosivos, presença de lentes de turfa compreensíveis e principalmente nível d'água subterrâneo próximo a superfície (dificuldade de escavação e facilidade de contaminação das água) esta unidade apresenta algumas restrições para a instalação de postos de serviço. Assim existe a necessidade de medidas preventivas, estudos complementares e obras de engenharia corretivas que adequem o projeto de instalação do TAS às características do terreno.

Deve-se ressaltar que a turfa serve como uma camada protetora contra possíveis vazamentos, já que a matéria orgânica tem a capacidade de adsorver íons de hidrocarbonetos. Portanto a aplicação de obras de engenharia que mantenham a camada de turfa e ao mesmo tempo a estabilidade da obra são necessárias.

Por apresentar N.A. próximo a superfície e estar em áreas sujeitas a inundações (várzea), esta unidade está em comunicação quase direta com cursos d'água superficiais, principais condutores e receptores de poluentes, além de apresentar baixa capacidade de retenção contaminantes e condutividade hidráulica elevadas (material arenoso). Na ocorrência de um vazamento de combustível de um TAS nesta área, as águas subterrâneas e superficiais seriam imediatamente contaminadas.

Assim, esta situação impõe a necessidade de dispositivos de monitoramento e controle mais rígidos e freqüentes nos postos de combustíveis.

7. CONCLUSÕES

O Método das Hipóteses Progressivas proposto por Santos (1994) e adotado para esta pesquisa, permitiu que os objetivos iniciais fossem alcançados. Partiu-se da formulação de uma hipótese orientativa, referente à primeira fase do método, baseada em levantamento de dados e bibliográfico.

A hipótese definida partiu do terceiro conceito da Geologia de engenharia, isto é, materiais com características intrínsecas distintas irão responder de forma diferente as mesmas solicitações impostas. Para a confirmação da hipótese foram realizadas investigações de campo e levantamento de dados geológicos e geotécnicos sobre a área de estudo, tendo vista a implantação de postos de combustíveis.

A partir deste procedimento confirmou-se a hipótese inicial, e foi elaborado um diagnóstico definitivo da área de estudo, através da descrição das características e dos diferentes problemas encontrados (processos e propriedades do meio físico), em cada unidade geológico-geotécnica, relacionados ao tanque de armazenamento subterrâneo de combustíveis e possíveis vazamentos. Desta forma, fornecendo subsídios para a escolha de áreas para a implantação de postos de combustíveis na área urbana de Rio Claro, prevendo possíveis problemas intrínsecos para cada tipo de material (solo). De acordo com que foi exposto conclui-se tratar da segunda e terceira fases do Método das Hipóteses Progressivas.

A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas pelo desenvolvimento da pesquisa:

- Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram realizadas investigações de campo através de pontos de observação e 18 sondagens a trado na área urbana de Rio Claro, onde foram coletadas 64 amostras de solo para a realização de análises físicas e químicas e 5 amostras de água para análise física “in situ”.

- Foram identificados e estudados os principais processos atuantes no meio físico que exercem influência sobre o tanque de armazenamento subterrâneo, processos esses que podem induzir danos estruturais e possíveis vazamentos, além da identificação das características e propriedades do meio físico que regem a migração do contaminante vazado (FIGURA 16)

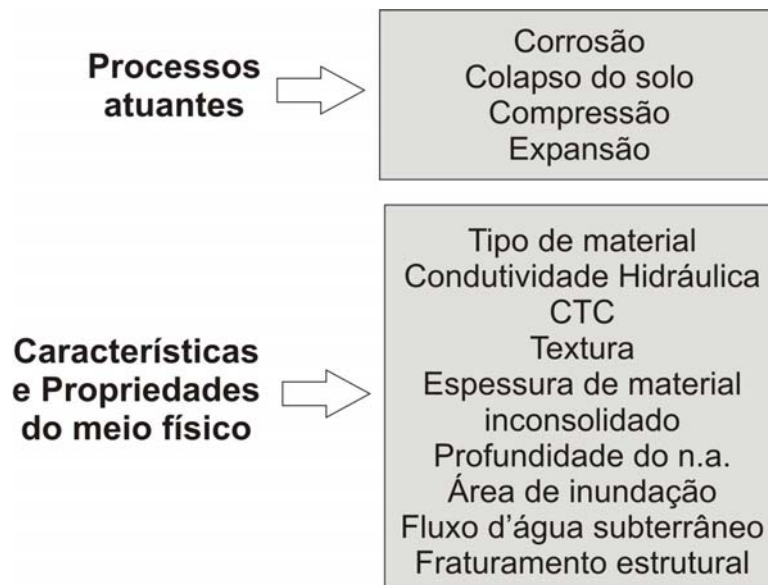


FIGURA 16: Processos atuantes no meio físico que exercem influência sobre o tanque de armazenamento subterrâneo e características e propriedades do meio físico que regem a migração do contaminante vazado.

- As unidades geológico-geotécnicas definidas por Zaine (2000) foram a base para a pesquisa. Para cada unidade foram levantados os principais problemas que poderiam influenciar a implantação e o decorrer da vida útil do empreendimento. Assim de acordo com os trabalhos de campo realizados e os problemas levantados, as unidades foram agrupadas e estabeleceram-se quatro **unidades de análise** que apresentam características distintas. Para cada unidade foram e levantados parâmetros geotécnicos, com base na literatura, e nos ensaios físicos e químicos realizados nesta pesquisa. Assim podemos sintetizar na TABELA 20, por unidade de análise, as principais informações necessárias para orientar um projeto de instalação de tanque de armazenamento subterrâneo em postos de combustíveis:

TABELA 20: Principais atributos necessários para orientar a instalação de tanque de armazenamento subterrâneo em postos de combustíveis.

| UNIDADE DE ANÁLISE | UNIDADE 1 Formação Corumbataí | UNIDADE 2 Diabásio | UNIDADE 3 Formação Rio Claro | UNIDADE 4 Aluvião |
|--|---|---|---|--|
| Tipos de material | Siltitos e argilitos, solo residual argiloso | Argiloso, latossolo e solo litólico | Solo Areno-argiloso | Solo Arenoso e argiloso |
| CTC | Por apresentar em sua composição, minerais como illita e montmorilonitas pode-se estimar valores de CTC favoráveis a retenção de contaminantes | 3,65 a 7,37 meq/100g, não favorável a retenção de contaminantes (Classificação de Leite e Zuquette, 1996) | 1,04 a 1,76 meq/100g, não favorável a retenção de contaminantes (Classificação de Leite e Zuquette, 1996) | 1,58 a 5,35 meq/100g, não favorável à retenção de contaminantes (Classificação de Leite e Zuquette, 1996) |
| Espessura de material inconsolidado | 1 a 2 m, solo pouco espesso | 4 a 13 m | 15 a 30m | Por volta de 5 m |
| Profundidade do nível d'água | Raso, < 2m em épocas de chuva, variando na estiagem | Variável, entre 3 a 13m | 15 a 25m e por volta de 5m próximo ao limite com a Unidade 4 (fundos vales lagoas e cabeceiras de drenagem) | Inferior a 3 m |
| Condutividade hidráulica | $6,5 \times 10^{-7}$ cm/s (solo residual) e da ordem de 10^{-8} cm/s (rochas), classificados como "baixa" permeabilidade (ZUQUETTE, 1987) | $5,1 \cdot 10^{-5}$ cm/s (solo), classificado como "razoável" permeabilidade (ZUQUETTE, 1987) | Valores entre 10^{-3} e 10^{-2} cm/s, "alta" permeabilidade (ZUQUETTE, 1987) | Arenoso $4,2 \cdot 10^{-4}$, argiloso $9,0 \cdot 10^{-6}$, classificados como razoável e baixa permeabilidade (ZUQUETTE, 1987) |
| Declividade | <5% e entre 5 – 15% | 5 – 10% e 10 – 20% | <2%, áreas de colina; 5 – 15% e >15% em situações de média encosta | Área de inundação: influência dos processos fluviais |
| Compressão | Média compressibilidade ($C_c=0,26$), com resistência a compressão baixa a extremamente alta para rochas sedimentares variando entre 9,6 MPa a 147,2 Mpa. | Média compressibilidade ($C_c=0,28$) | Apresenta baixa a média compressibilidade (C_c entre 0,15 a 0,45), assemelha-se a material incompressivo a teor de umidade natural (GIBOTTI, 1999) | Baixo índice de compressão ($C_c = 0,08$ e $0,12$) para aluviões arenosos e argilosos, presença de lentes turfa com alta compressibilidade |
| Capacidade de carga | Suporta as solicitações impostas pelo tanque 3,5 a 4,8 kg/cm ² , classificação de Chiossi (1975) e Lima (1979) | Suporta as solicitações impostas pelo tanque 1,20 a 3,5 Kg/cm ² classificação de Chiossi (1975) e Lima (1979) | Suporta as solicitações impostas pelo tanque de <1,0 - 1,5 Kg/cm ² , classificação de Chiossi (1975) e Lima (1979) | Suporta as solicitações impostas pelo tanque 1,0 e 3,0 kg/cm ² , classificação de Chiossi (1975) e Lima (1979) |
| Colapso do solo | Não colapsível | Não colapsível | Colapsível | Não colapsível |
| Expansão | Baixa expansibilidade (rocha), potencialmente expansivo (níveis aflorantes) | Baixo a médio potencial de expansão (para IP=15, classificação de Chen (1975)) | Não verificado | Baixo potencial de expansão (tanto para material arenoso quanto argiloso) para IP= 6 e 7 (classificação de CHEN, 1975) |
| Dificuldade de escavação | Pode-se encontrar alguma dificuldade na escavação, quando encontra-se a rocha subjacente, classificada como "branda" a "dura" (REDAELLI e CERELLO, 1998). | Dificuldade de escavação devido a presença de blocos e lajes de diabásio, classificadas como "muito duras" (REDAELLI e CERELLO, 1998) | Não verificado | Inestabilidade do material ocasionando a desestabilização das paredes da cava de instalação do tanque |
| Corrosão | Não foi avaliada | Favorável ao desenvolvimento de processos corrosivos | Não corrosiva a umidade natural; corrosiva quando saturada | Favoráveis ao desenvolvimento de processos corrosivos |
| Faturamento estrutural | Muito fraturado, com descontinuidades preenchidas. Não favorece a percolação do contaminante | Propicia a percolação de contaminantes | Não verificado | Não verificado |

Unidade de análise 1 – Formação Corumbataí: Para a instalação de tanque de armazenamento subterrâneo (TAS) esta unidade apresenta como característica pouca espessura de solo e a presença de rochas classificadas como branda a dura (REDAELLI e CERELLO, 1998) o que pode apresentar um certo grau de dificuldade para escavação. A presença de nível d'água próximo da superfície ou próximo ao tanque de armazenamento subterrâneo e a variação sazonal do nível d'água, podem ocasionar a expansão do material que resulta em danos para as instalações enterradas (conexões e tubulações) ocasionando vazamento de hidrocarbonetos. Quanto à capacidade de carga esta Unidade suporta as solicitações impostas pelo TAS (TABELA 20). Por se um material composto por argilo-minerais como illita e montmorilonita e apresentar condutividade hidráulica da ordem de 10^{-7} e 10^{-8} cm/s, é favorável a retenção de contaminantes (TABELA 20).

Unidade de análise 2 – Diabásio: A presença de blocos e lajes de diabásio, gera problemas de escavabilidade na obra de instalação do tanque de armazenamento subterrâneo (TAS), assim a instalação deve ser precedida de investigações complementares (geofísica, sondagens) para definição da presença de blocos e verificação do topo rochoso. Cuidados escolha de equipamentos adequados são necessários pois esta unidade apresenta-se favorável ao desenvolvimento de processos corrosivos. Apresenta média compressibilidade, baixo a médio potencial de expansão e suporta as solicitações impostas pelo tanque (TAS) (TABELA 20). São obtidos valores de CTC não favoráveis a retenção de contaminantes (abaixo dos valores estabelecidos por Leite e Zuquette (1996) (TABELA 20), porém estes valores são os maiores obtidos em relação as unidade 3 e 4. Por se tratar de um solo argiloso com condutividade hidráulica classificada como de “razoável permeabilidade” ou “difícil drenabilidade” retarda a migração do hidrocarboneto, na ocorrência um vazamento (TABELA 20). No caso de topo rochoso próximo a base do TAS, deve-se atentar para o fraturamento da rocha que são caminhos preferenciais para o deslocamento dos contaminantes.

Unidade de análise 3 – Formação Rio Claro: Apresenta poucos aspectos restritivos quanto à instalação de obras enterradas, tanque de armazenamento subterrâneo. Apresenta baixa a média compressibilidade assemelha-se a materiais incompressíveis a teor de umidade natural, e suporta as solicitações impostas pelo tanque (TABELA 20), entretanto o potencial colapsível do solo mostra a necessidade de medidas preventivas, como um controle efetivo de tubulações de água e esgoto nos postos de gasolina. Deve-se ressaltar também que o solo desta unidade é favorável ao processo corrosivo e a escolha de equipamentos com proteção contra corrosão são necessários. Por se tratar de um solo areno argiloso com condutividade hidráulica classificada como “alta permeabilidade (ZUQUETTE, 1987) (TABELA 20), apresenta baixa capacidade de retenção de contaminantes como hidrocarbonetos. Áreas próximas à baixa encosta, no limite com a unidade de análise 4 e próximas às lagoas e cabeceiras de drenagem onde o N.A. (< 5m) está mais próximo a base do TAS, também podem ser consideradas mais susceptíveis a contaminação em relação àquelas com N.A. mais profundo.

Unidade de análise 4 – Aluviões: O material areno e argiloso encontrado apresentam baixo índice de compressão e suportam as solicitações impostas pelo tanque, não apresentando restrições quanto a instalação do tanque de armazenamento subterrâneo (TABELA 20), entretanto a presença de camadas de turfa compressíveis e o material argiloso encontrado, com potencial para expansão, levam a escolha de obras de engenharia compatíveis com esta situação. Por ser favorável ao desenvolvimento de processos corrosivos o emprego de equipamentos com proteção contra corrosão devem ser utilizados. Com nível d’água subterrâneo próximo a superfície (< 3m), na abertura da cava, desta forma de instalação do tanque podem ocorrer problemas com a instabilidade do material ocasionando a desestabilização das paredes da cava, o escoramento das paredes deve ser feito. Segundo a NBR-13781 (ABNT, 2001) proteções contra flutuação do tanque devem ser tomadas durante e após a instalação do tanque, através do rebaixamento do nível d’água ou ancoragem, evitando-se a ação do empuxo. Como se trata de uma unidade com materiais de “difícil drenabilidade” ou razoável a baixa permeabilidade, e CTC com baixos valores segundo a classificação de Leite e Zuquette (1996) (TABELA 20) não é favorável a retenção de contaminantes, assim a situação apresentada juntamente com a pouca profundidade do nível d’água ocasionam a

rápida contaminação das águas, por estar em comunicação quase que direta com os cursos d'água superficiais, principais condutores e receptores de poluentes. Neste contexto esta unidade de análise pode ser considerada como bastante restritiva à instalação postos de combustíveis.

- Vale ressaltar que para todas as unidades de análise apresentadas nesta pesquisa os resultados de análises físicas e químicas de amostras de água e solo e a avaliação realizada comprova que a profundidade do nível d'água é o fator mais determinante para a implantação de postos de combustíveis, no que se refere aos tanques de armazenamento subterrâneo. A profundidade do N.A. irá influenciar tanto na instalação do TAS, dificultando as obras, quanto no decorrer da vida útil do equipamento, originando processos como corrosão, além de estar mais susceptível a contaminação caso haja um vazamento de hidrocarboneto.
- Apartir do que foi apresentado para cada unidade de análise, isto é, suas características e propriedades, pode-se estabelecer um quadro síntese conclusivo (QUADRO 20), indicando as restrições e potencialidades de cada unidade para a instalação de postos de combustíveis, na área urbana de Rio Claro. As restrições e potencialidades fornecem orientações que ajudam na elaboração do projeto de postos de combustíveis auxiliando na previsão dos custos da obra, assim como no momento de sua implantação.
- Podemos considerar que os resultados desta pesquisa são essencialmente orientativos e estão baseados nas características intrínsecas dos materiais, significando que materiais diferentes quando submetidos as mesmas solicitações irão demonstrar comportamentos diferenciados. Desta forma, para cada unidade de análise definida para a área de estudo foram determinados ensaios e análises específicos cujos resultados direcionam os estudos necessários para a instalação de postos de combustíveis (FIGURA 17).
- Com as informações apresentadas no Capítulo 6 (Resultados das Investigações e Análises) e as conclusões descritas neste capítulo pode-se constatar que o método científico adotado para esta pesquisa permitiu que os objetivos propostos fossem plenamente atingidos.

QUADRO 20: Síntese das Unidades de análise com indicação das principais restrições e potencialidades para a implantação de postos de combustíveis em Rio Claro – SP.

| Unidades de Análise | Restrições | Potencialidades |
|---|---|--|
| <p><i>Unidade 1</i> Formação Corumbataí</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Apresenta potencial para desenvolvimento de processo expansivo. - N.A. pouco profundo (<2m) - Dificuldade de escavação (solo pouco espesso, rochas branda a dura) | <ul style="list-style-type: none"> - Unidade que suporta as solicitações impostas pelo tanque - Favorável a retenção de contaminantes (condutividade hidráulica e CTC) |
| <p><i>Unidade 2</i> Diabásio</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade de escavação (blocos e lajes de diabásio) - Solo com potencial para o desenvolvimento de corrosão - Fraturamento estrutural (topo rochoso próximo a base do TAS) | <ul style="list-style-type: none"> - Média compressibilidade do solo - Baixo a médio potencial de expansão do solo - Suporta as solicitações impostas pelo tanque - Favorável a retenção de contaminantes (condutividade hidráulica e CTC) |
| <p><i>Unidade 3</i> Formação Rio Claro</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Solo colapsível - Solo favorável ao desenvolvimento de processo corrosivo - Não favorável a retenção de contaminantes (condutividade hidráulica e CTC) - Pouca profundidade do N.A. em áreas de baixa encosta | <ul style="list-style-type: none"> - Baixa a média compressibilidade do solo (incompressivo a teor de umidade natural) - Suporta solicitações impostas pelo tanque |
| <p><i>Unidade 4</i> Aluvião</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Presença de camadas de turfa compressíveis - Solo favorável ao desenvolvimento de processo corrosivo - N.A. pouco profundo (<3m) - Dificuldade de escavação (material instável) - Não favorável a retenção de contaminantes (condutividade hidráulica e CTC) - Necessidade de rebaixamento do N.A. e ancoragem do TAS (flutuação) - No caso de vazamentos, rápida contaminação das águas (subterrânea e de superfície) | <ul style="list-style-type: none"> - Baixo potencial de expansão – material arenoso; pode apresentar expansão para material argiloso - Baixa compressibilidade do solo - Suporta solicitações impostas pelo tanque |

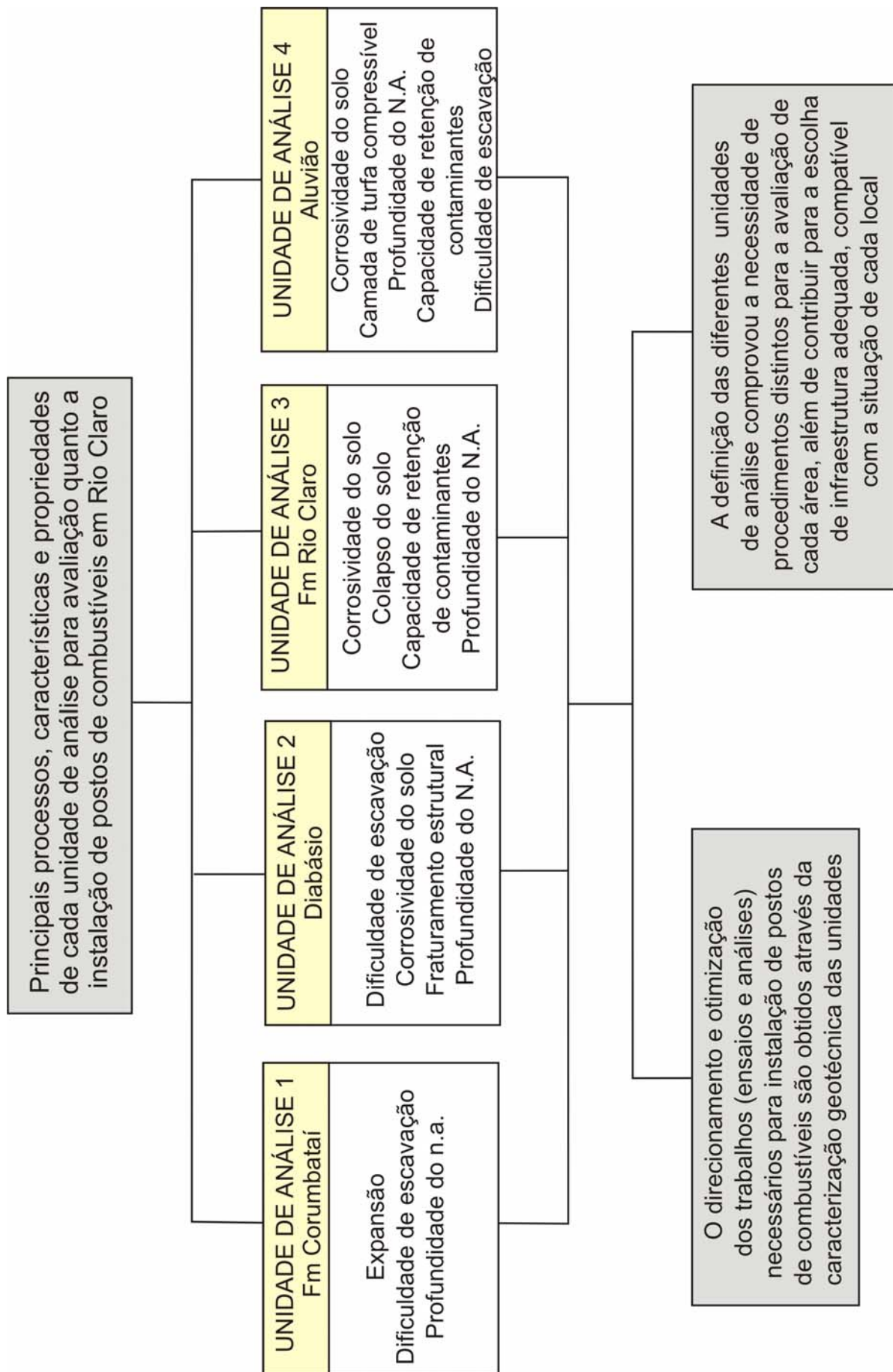


FIGURA 17: Fluxograma com a análise final dos resultados obtidos pela pesquisa

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, R.A.; VELLOSO D.A. Fundações. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 381-396.

AGNELLI, N.; ALBIERO, J.H. Aspectos físicos, químicos e mecânicos de um solo colapsível, inundado com diferentes líquidos. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v.20, n.2, p. 79-95, 1997.

ALBIERO, J.H.; CARVALHO, D.; LOBO, A.S. Fundações. In: Mesa Redonda sobre os Solos do Interior do Estado de São Paulo, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS / EESC – USP, 1993, p. 243-275.

ALMEIDA, F.F.M. de. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, n.41, p. 169-263, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA – ABGE. **Diretrizes para execução de sondagens**. São Paulo: ABGE / CNPq, 1990. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6484**: Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, 1980. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7250**: 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. **Norma-7181**: Análise Granulométrica dos solos. Rio de Janeiro, 1987. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12007**: Ensaio de adensamento unidirecional. Rio de Janeiro, 1990.13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13781**: Postos de serviços – manuseio e instalação de tanque subterrâneo de combustíveis. Rio de Janeiro, 2001. 16p.

AZAMBUJA, E.; CANCELIER, C.B.; NANNI, A.S. **Contaminação dos solos por LNAPL**: discussão sobre diagnóstico e remediação. 2002. Disponível em: <<http://www.azambuja.com.br/acervo/geosul2000.pdf>> Acesso em 2.mai.2003.

AZEVEDO, A.A.; ALBUQUERQUE FILHO, J.L. Águas Subterrâneas. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 111-130.

BOULDING, J.R. **Practical handbook of soil vadose zone and groundwater contamination**: assessment, prevention and remediation. Boca Ranton: Lewis Publishers, 1995. 948 p.

BRAGA, A.C.O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro, SP.** 1994. 169 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

BRAGA, A.C.O. **Métodos geoeletricos aplicados: Módulo hidrogeologia.** 2003. Disponível em: <<http://ns.rc.unesp.br/igce/aplicada/geoeletricos-v3.pdf>> Acesso em 18.mar.2003.

CABRAL, J. Água Subterrânea: histórico e importância. In: Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. (Coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** Fortaleza: CPRM / REFO, LABHID – UFPE, 2000. Cap. 3. p. 3-12.

CABRAL JÚNIOR., M. **Avaliação do potencial metalogenético da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo para depósitos sedimentares fosfáticos, evaporíticos e de metais-base.** 1991. 124 p. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CAMITZ, G.; VINKA, T. Corrosion of steel and metal-coated steel in swedish soils – effects of soil parameters. In: CHARKER, V.; PALMER, D. (Ed.). **Effects of soil characteristics on corrosion.** Filadélfia: ASTM, 1989. p. 37-53.

CAMPOS, J.O. **A desagregabilidade dos siltitos da Formação Corumbataí – conseqüências práticas fenomenologia provável e experimentação pertinente.** 1989. 120p. Tese (Livre-Docência), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CAMPOS, J.O. Formação Rio Claro – Aspectos geotécnicos. In: Simpósio Regional de Geologia, 2, 1979, Rio Claro. **Atas...** Rio Claro: SBG, 1979, p. 35-49.

CAMPOS, J.O.; VICELLI NETO, P. Ponderações sobre o comportamento geotécnico da Formação Rio Claro. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987. v.2, p. 323-335.

CAMPOS, J.O.; VICELI NETO, P.; FÚLFARO, V.J.; NÓBREGA, C.A.; VILLAR, O.M.; BORTOLUCCI, A.A. Formação Corumbataí – Caracterização geotécnica de suas propriedades: os exemplos de Piracicaba e Rio Claro. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987. v.2, p. 163-173.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977a. v.1. 242 p.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977b. v.2. 488 p.

CERRI, L.E.S. **Subsídios para seleção de alternativas de medidas de prevenção de acidentes geológicos.** 2001. 78 p. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CHEN, F.H. **Foundations on expansive soils.** Amsterdã: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 280 p. (Developments in Geotechnical Engineering, 12).

CHIOSSI, N.J. **Geologia Aplicada à Engenharia.** São Paulo: Grêmio Politécnico, 1975. 427 p.

CHRISTOFOLETTI, S.R. **Um modelo de classificação geológico-tecnológica das argilas da Formação Corumbataí utilizadas nas indústrias do pólo cerâmico de Santa Gertrudes.** 2003. 187 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CINTRA, J.C.C. **Fundações em solos colapsíveis.** 1995. 124 p. Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. Postos de combustíveis. 2003. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Servicos/licenciamento/postos_combustiveis.asp> Acesso em: 5.mai.2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Dispõe sobre a prevenção e controle de poluição em postos de combustíveis e serviços. Resolução n. 273, de 29 de novembro de 2000. **Diário Oficial da União.** República Federativa do Brasil: Poder Legislativo, DF, 08 jan. 2001. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama>. Acesso em: 14 abr. 2004.

CORCORAN, P.; JARVIS, M.G.; MACNEY, D.; STEVENS, K.W. Soil corrosiveness in Oxfordshire. **Journal of Soil Science**, [S.l.], n. 28, p. 473-484. 1977.

COTTAS, L.R. **Estudos geológico-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro – SP.** 1983. 171 p., 2v. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CRUZ, P.T.; FERREIRA, R.C.; PERES, J.E.E. Análise de alguns fatores que afetam a colapsividade dos solos porosos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. de Fundações, 10, 1994, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS, 1994. v.4, p. 1127-1134.

DUARTE, U. **Geologia ambiental das áreas de São Pedro (SP) – vetor águas subterrâneas.** 1980. 73 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ENVIRONMENTAL PROTECTING AGENCY - EPA. **Overview of the federal underground storage tank program.** 2003a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/swrust1/overview.htm>> Acesso em: 4.fev.2003.

ENVIRONMENTAL PROTECTING AGENCY - EPA. **Behavior of hydrocarbons in the subsurface.** Cap. III. 2003b Disponível em: <http://www.epa.gov/oust/pubs/fpr_c3.pdf>. Acesso em: 21mai.2003.

FACINCANI, E.M. **Morfotectônica da Depressão Periférica Paulista e Cuestas Basálticas:** regiões de São Carlos e Piracicaba, SP. 2000. 222 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

FERREIRA, J.; ZUQUETTE, L.V. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. **Geociências**, São Paulo, v. 2, n. 17, p. 527-557, 1998.

FETTER, C.W. **Contaminant Hidrogeology.** 2.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 500 p.

FORNASARI FILHO, N.; BRAGA, T.O.; GALVES, M.L.; BITAR, O.Y.; AMARENTE, A. **Alterações no meio físico decorrentes de obras de engenharia.** São Paulo: IPT. 1992. 162 p. (Publicação 1972, Boletim 61).

FRASCÁ, M.H.B.O.; SARTORI, P.L.P. Minerais e Rochas. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 39-56.

FÚLFARO, V.J.; SUGUIO, K. A Formação Rio Claro (Neo-cenozóico) e seu ambiente de deposição. **Boletim Instituto Geográfico e Geológico**, n. 20, p. 45-60, 1968.

FUNDUNESP – FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA UNESP. **Estudos geológico-geotécnicos de detalhe na área de implantação de posto de abastecimento de combustíveis e derivados na Av. Brasil, esquina com Av. M-19, Rio Claro (SP)**. Rio Claro, 1999. 21 p. (Relatório Técnico).

FUNDUNESP – FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA UNESP – **Caracterização geológico-geotécnica em área de implantação de postos de abastecimento de veículos na Av. Conde Francisco Matarazzo, esquina com Av. P-& (Shopping Center Rio Claro), Rio Claro (SP)**. Rio Claro, 2000. 16 p. (Relatório Técnico).

GAMA JR, E.G.; BANDEIRA JR, A.N.; FRANÇA A.B. Distribuição espacial e temporal das unidades litoestratigráficas paleozóicas na parte central da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 1-16. 1982.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1996. 338 p.

GIBOTTI JÚNIOR, M. **Subsídios geológico-geotécnicos para a implantação de tanques de armazenagem subterrânea de combustíveis: estudo de caso em um solo da Formação Rio Claro. Rio Claro, SP**. 1999. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

GILLOTT, J.E. **Clay in engineering geology**. Amsterdã: Elsevier Scientific Publishing Company, 1987. 468 p. (Developments in Geotechnical Engineering, 41).

GOMES, L.P. Sistemas de Proteção catódica para postos de serviço. In: Encontro técnico sobre questões ambientais em postos de serviços, 2, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CETESB, 1993. 9 p.

GOMES, L.P. **Diagnóstico de corrosão e proteção catódica em tubulações enterradas de plantas industriais**. 2003. Disponível em: <<http://www.iecengenharia.com.br/publicacoes.html>> Acesso em: 5.mai.2003.

GUIGUER, N. **Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento**. Ontario: Waterloo Hydrogeologic Inc., 2000. 356 p.

GUIMARÃES, L. **Utilização do sistema de informação geográfica (SIG) para identificação de áreas potenciais para disposição de resíduos na bacia do Paquequer, Município de Teresópolis – RJ**. 2000. 172 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000**. São Paulo: IPT, 1981. 2v. (Séries Monografias).

KELLY, W.E.; MARES, S. (Ed.). **Applied geophysics in hidrogeological and engineering practice**. Amsterdã: Elsevier Science Publisher, 1993. 289 p. (Developments in Water Science, 44).

LAMBE, T.W. **Soil Mechanics**. Nova Iorque: John Wiley & Sons Inc., 1979. 553 p.

LANDIM, P.M.B. **O Grupo Passa Dois na Bacia do Rio Corumbataí (SP).** Rio de Janeiro: Divisão Geologia e Mineralogia / DNPM, 1970. 103 p. (Boletim 252).

LANDIM, P.M.B.; SOARES, P.C.; GAMA JÚNIOR, E. **Estratigrafia do nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná.** Rio Claro: Convênio IPT – Unesp, 1980. 45 p. (Curso de especialização).

LEITE, J.C.; ZUQUETTE, L.V. Atributos fundamentais à elaboração da carta de susceptibilidade à contaminação e poluição das águas subsuperficiais. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 8, 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE, 1996. v.2, p. 647-657.

LIMA, M.J.C.P.A. **Prospecção geotécnica do subsolo.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 104 p.

MASSON, M.R. **Rochas da Formação Corumbataí como matéria-prima para indústria cerâmica de revestimentos: sua influência na qualidade dos produtos.** 1998 143 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

MASSONI, F. **Levantamento de frentes de lavras com destaque para as descontinuidades e suas influências na qualidade da matéria-prima para as cerâmicas da região de Rio Claro – SP.** 2001. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

MELLO, V.F.B.; TEIXEIRA, A.H. **Mecânica dos solos – Fundações e obras de terra.** São Carlos: EESC - USP, 1960. v1. 205 p.

MILLER, E.P.; FOSS, J.E.; WOLF, D.C. Soil Surveys: Their Synthesis, confidence limits, and utilization for corrosion assessment of soil. In: **Underground Corrosion.** Philadelphia: Edward Escalante / American Society for Testing and Materials, 1981. p. 3-23.

MITCHELL, J.K. **Fundamental of soil behavior.** Nova Iorque: John Wiley & Sons Inc., 1993. 437 p.

NAKAZAWA, V.A.; PRANDINI, F.L.; DINIZ, N.C. Subsistência e colapso de solo em áreas urbanas. In: **Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente.** São Paulo: ABGE. 1995. p. 101-133.

NICOLETTI, F.; AGUIAR, L.M.B.; HOFLING, M.A.Z.; CARREIRO, M.S.A.; CAZETTA, V. **Atlas Municipal Escolar: Geografia, Histórico e Ambiental – Rio Claro.** Almeida, R. D. (Coord.). Rio Claro: Fapesp / Prefeitura Municipal de Rio Claro / Unesp – Rio Claro, 2001. 112 p.

NOGUEIRA, J.B. **Mecânica dos Solos.** São Paulo: EESC - USP, 1988. 197 p.

NOGUEIRA JÚNIOR, J.; SILVA, E.F. Agressividade dos solos da bacia do Jatobá – diagnóstico para as fundações das adutoras metálicas enterradas do sistema de irrigação de Itaparica-PE. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 6, 1990, Salvador. **Anais...** Salvador: ABGE, 1990. v. 1, p. 519-524.

NOGUEIRA JÚNIOR., J.; KUPERMAN, S.C.; TANIGUCHI, H.; KATSUTANI, J.H. Agressividade dos solos da Bacia do Paraná. Metodologia de estudos e medidas de projeto para as fundações das torres da linha de transmissão Areia-Curitiba. In: Congresso

Brasileiro de Geologia de Engenharia, 3, 1981, Itapema – SC. **Anais...** Itapema: ABGE, 1981. v. 1, p. 287-300.

OLIVA, A. **Estudo hidrogeológico da Formação Rio Claro no Município de Rio Claro – SP.** 2002. 71 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

OLIVEIRA, E. de. **Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo.** 1992. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1995. 377 p.

PENTEADO, M.M. **Geomorfologia do Setor Centro-Occidental da Depressão Periférica Paulista.** São Paulo: Instituto de Geografia – USP, 1976. 86 p. (Série Teses e Monografia, 22).

PRADO, H. do; OLIVEIRA, J.B. de; ALMEIDA, C.L.F. de. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo.** Quadrícula de São Carlos, Escala 1:100.000. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1981.

REDAELLI, L.L.; CERELLO, L. Escavações. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. p. 311-330.

RIO CLARO. Prefeitura Municipal. Lei n.2492, de 13 de janeiro 1998. Regula a construção de Postos de Abastecimento e de Serviço de Veículos. 9p. Publicada na Secretaria da Câmara Municipal de Rio Claro, em 13 de janeiro de 1998.

ROSCOE MOSS COMPANY. **Handbook of groundwater development.** Nova Iorque: Wiley, 1990. 493 p.

ROSIM, P. **Características Climáticas do Município de Rio Claro (SP) no período de 1955 a 1996.** 1997. 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SANTOS, A.R. dos. **Fundamentos filosóficos e metodológicos da Geologia de Engenharia.** São Paulo: IPT, 1994. 5 p. (Publicação 2088 - Comunicação técnica).

SANTOS, A.R. dos. **Geologia de Engenharia: conceitos, métodos e prática.** São Paulo: ABGE / IPT, 2002. 222 p.

SANTOS, A.R. dos; PRANDIN, F.L.; OLIVEIRA, A.M.S. **Limites ambientais do desenvolvimento:** Geociências aplicadas, uma abordagem tecnológica da biosfera. São Paulo: ABGE, 1990. 20 p. (Artigo técnico).

SCHNEIDER, R.L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, E.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974. v. 1, p. 41-65.

SEBRÃO, M.Z.; SERRA, E.T. Avaliação do emprego de sistemas adicionais de proteção anticorrosiva em tubulações de aço galvanizado enterradas. In: Congresso Brasileiro de Corrosão, 17, 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, v.1, p. 411-425.

SEPE, P.M. **Comportamento do Aquífero Itararé no Município de Piracicaba e áreas vizinhas.** 1990. 182 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SOARES, P.C. O limite glacial / pós-glacial do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. In: Academia Brasileira de Ciências, 44. **Anais...** 1972. p. 333-342. (Suplemento).

SOUZA, N.C.D.C.; ZUQUETTE, L.V. Critérios de avaliação geotécnica de unidades de terreno no planejamento urbano. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7, 1993, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: ABGE, 1993. v. 1, p. 101-108.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B.; VILAR, O.M. **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos.** São Carlos: Departamento de Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1981. 208 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia.** Tradução de A.J. Costa Nunes e M.L.C. Campello. Rio de Janeiro: Editora do Livro Técnico – S.A., 1962. 659 p.

TRESSOLDI, M.; CONSONI, A.J. Disposição de Resíduos. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. p. 343-360.

TROPPEMAYER, H. **Atlas da qualidade ambiental e de vida de Rio Claro – SP.** Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Unesp, 1992. 72 p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: McGraw-Hill / Edusp, 1978. 509 p.

VARGAS, M. Solos expansivos da região de Campinas, SP. In: Mesa Redonda sobre os Solos do Interior do Estado de São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS / EESC – USP, 1993. p. 337-356.

VILAR, O.M.; RODRIGUES, J.E.; NOGUEIRA, J.B. Solos colapsíveis: um problema para a engenharia de solos tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. 1981, Rio de Janeiro. **Atas...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1981. p. 107-122.

VLACK, L.H.V. **Princípios de Ciências dos Materiais.** Tradução de L.P.C. Ferrão. São Paulo: Edgard Blücher / MEC, 1973. 473 p.

YONG, R.N.; WARKENTIN, B.P. **Soil properties and behavior.** Amsterdã: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 449 p. (Developments in Geotechnical Engineering, 5).

ZAINE, J.E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP).** 1994. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

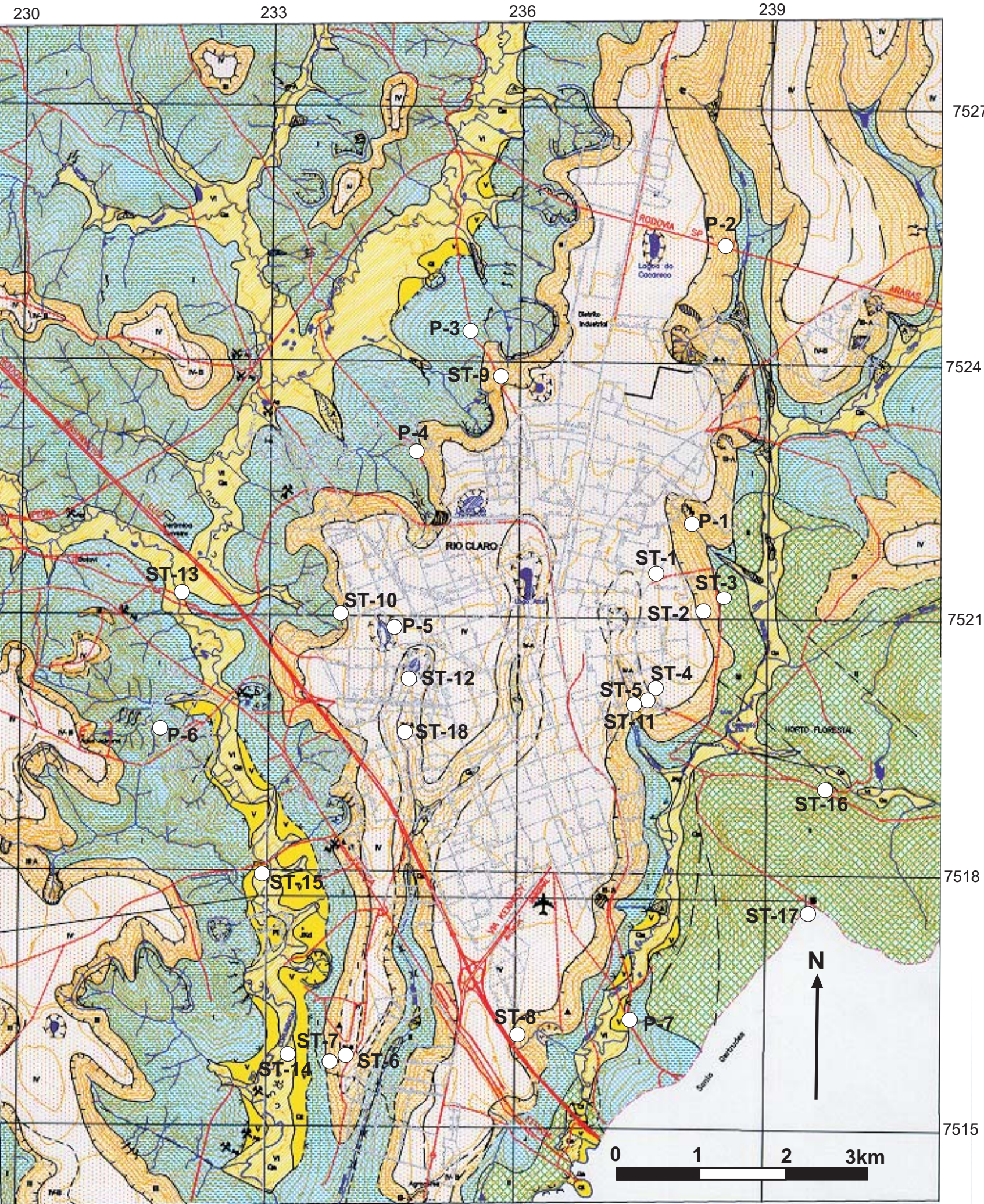
ZAINE, J.E. **Mapeamento Geológico-Geotécnico por meio do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do Município de Rio Claro (SP).** 2000. 149 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** 1987. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.** 2v. 1993. Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ANEXO 1

- Mapa geológico-geotécnico (ZAINÉ, 2000) com a localização dos pontos de observação e sondagens a trado
 - Síntese da descrição das sondagens



Mapa Geológico-geotécnico de Zaine (2000) com a localização dos pontos de observação e sondagens a trado

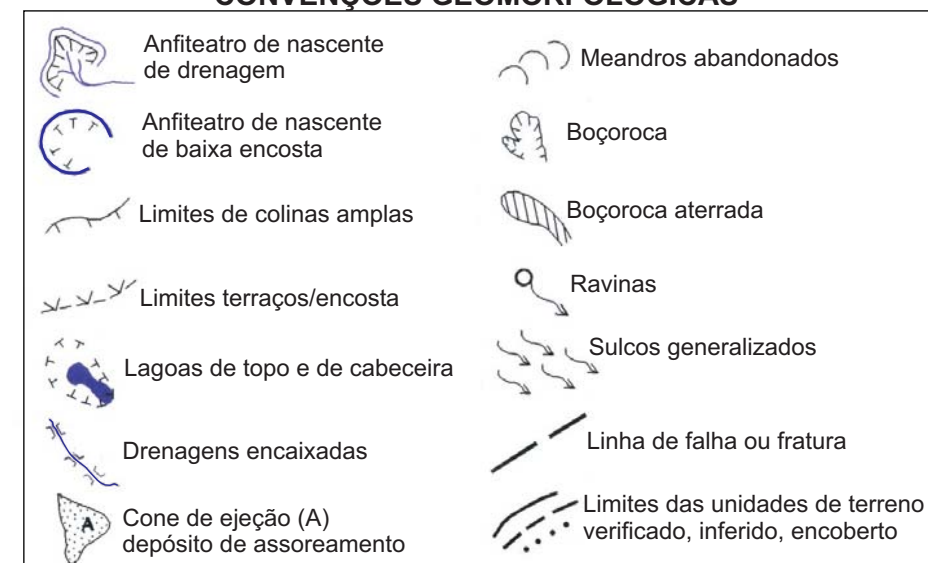
UNIDADES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS



CONVENÇÕES TOPOGRÁFICAS



CONVENÇÕES GEOMORFOLÓGICAS



Síntese da descrição das Sondagens a trado realizadas

| Sondagem | Localização | Unidades (ZAINÉ, 2000) | Prof. (m) | Unidades de Análise | Descrição tátil-visual |
|----------|--|-------------------------------|-----------|---------------------|--|
| ST-1 | Campus Unesp – Bela Vista | IV | 4,5 | Unidade 3 | Areia argilosa de coloração marrom avermelhada, com tonalidades mais escura nos primeiros 0,60 m granulação fina média, bem selecionada, com poucos grãos grossos esparsos, sub arredondados, com película de óxido de Fe, e matriz argilosa. Perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação. |
| ST-2 | Campus Unesp – Bela Vista | III | 4,0 | Unidade 3 | Areia argilosa (quantidade mais significativa de argila), com coloração marrom avermelhada, granulação fina, bem selecionada, grãos sub arredondados a arredondados., com película de óxido de ferro. Perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação. |
| ST-3 | Campus Unesp – Bela Vista | II | 3,9 | Unidade 2 | Solo argiloso com coloração vermelho escura, granulação fina a siltica, bem selecionada, grãos sub arredondados a arredondados. Perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação. |
| ST-4 | Jd. Nossa Sra. Saúde- R.11B c/ Av. 1A.. | IV | 4,0 | Unidade 3 | Areia argilosa de coloração avermelhada com os primeiros 0,70 m com tonalidades mais escuras, granulação fina média, bem selecionada, com poucos grãos grossos esparsos, sub arredondados, com película de óxido de Fe, e matriz argilosa. Perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação. |
| ST-5 | Jd. Nossa Sra. Saúde- Av. 3A próx. a Av. Ulisses Guimarães | IV-A situação de meia encosta | 4,0 | Unidade 3 | Areia argilosa de coloração avermelhada granulação fina, bem selecionado, com poucos grãos maiores esparsos, sub arredondados a arredondados, com película de óxido de Fe, matriz argilosa.. Ao longo do perfil, ocorrem manchas acinzentadas. |
| ST-6 | Estrada dos Costas - antiga área destinada a loteamentos | IV-B | 4,0 | Unidade 3 | Areia argilosa de coloração marrom avermalhada, com tonalidades mais escuras nos primeiros 0,3 m, granulação fina média, bem selecionada, com poucos grãos grossos esparsos, sub arredondados, com película de óxido de Fe, e matriz argilosa. Perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação |
| ST-7 | Estrada dos Costas - antiga área destinada a loteamentos | III | 3,9 | Unidade 3 | Areia argilosa de coloração avermelhada, com tonalidades acinzentadas nos primeiros 0,3 m. granulação fina média, bem selecionada, com grãos grossos esparsos, sub arredondados a arredondados, com película de óxido de Fe, e matriz argilosa. A 3,7 m presença de nível conglomerático de aproximadamente 30 cm ,(início do contato com a Fm Corumbataí) |

| | | | | | |
|-------|--|-----|-----|-----------|--|
| ST-8 | Jd. Kennedy próx. a R. 20 e Av. 67 | III | 4,1 | Unidade 3 | Areia argilosa de coloração marrom amarelada, com tonalidades mais cinzas próximo à superfície (nos primeiros 100 cm), granulação fina, bem selecionado, com poucos grãos maiores esparsos, arredondados com matriz argilosa. A partir de 1,80 m mostra um mosqueamento com manchas amareladas e avermelhadas. A 2,80m atinge n.a. areia argilosa avermelhada e amarelada. |
| ST-9 | Final do Jd. Hipódromo, estrada p/ o centro hípico Sobradão | III | 4,0 | Unidade 3 | Areia argilosa de coloração marrom avermelhada, com tonalidade mais escuras nos primeiros (0,80 cm), granulação fina média, bem selecionada, com poucos grãos grossos esparsos, sub arredondados, com película de óxido de Fe, e matriz argilosa. Presença de carvão. Perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação |
| ST-10 | Jd. Wenzel, próx. a R. 22 | III | 4,0 | Unidade 3 | Areia argilosa, de coloração marrom avermelhada granulação fina, bem selecionada, com poucos grãos grossos esparsos, sub arredondados, com película de óxido de Fe, e matriz argilosa. Perfil de solo homogêneo, sem nenhuma variação |
| ST-11 | Jd. N. Sra. Saúde Av. Ulisses entre Av. 3 e 1A | IV | 4,1 | Unidade 4 | Areia fina média, sem matriz, selecionada, com grânulos de quartzo subarredondado, coloração avermelhada com manchas cinzas, a 2,40m ocorre manchas ocre. A profundidade de 2,70m camada silto-argilosa amarela com pequenas manchas cinzas e vermelha. N.A. a 3,90m |
| ST-12 | Jd. São Paulo (Rua 18JSP entre as ruas 20 e 21) | IV | 3,3 | Unidade 4 | Material arenoso quartzoso, com película de óxido de Fe, grãos subarredondados, bem selecionados, apresenta clastos de laterita. Até 1,50m solo com coloração marrom clara, a 1,80m passa para tonalidades mais ocre com manchas vermelhas (até final do furo) |
| ST-13 | Estrada para Batovi | VI | 2,4 | Unidade 4 | Areia fina a muito fina quartzosa, grãos arredondados a subarredondados, bem selecionado, limpos. Apresenta coloração marrom a amarelo pálido. A 80 cm passa a ocorrer pontos oxidados vermelhos, acompanhado do aumento da umidade. A 1,90m encontra o n.a. com solo cinza claro. Contato com Fm Corumbataí a 2,40m |
| ST-14 | Estrada dos Costa - antiga área destinada a loteamentos | VI | 3,9 | Unidade 4 | Areia quartzosa fina a média, grãos subarredondados, selecionados. Apresenta coloração amarelada, a 1,80m ocorrem manchas bem vermelha, Por volta de 2,10m as manchas ficam mais pronunciadas e aparecem manchas cinzas (maior umidade), Segue a 2,50m uma camada de 30 cm de muita matéria orgânica (carvão). 3,20m n.a. Abaixo do n.a. aparecem tonalidade ocre. |
| ST-15 | Estrada para Ipeúna próximo a ponte do rio Corumbataí | VI | 3,5 | Unidade 4 | Sedimento arenoso fino quartzoso, com grãos arredondado e bem selecionados, de coloração amarelo claro, a 0,9m aparecem bandas marrom escuro e avermelhadas (mais úmido). A 1,70m solo fica mais úmido com tonalidades mais claras. A 2,40m encontra n.a. Por volta de 3,00m sedimento cinza com manchas ocre alaranjada |

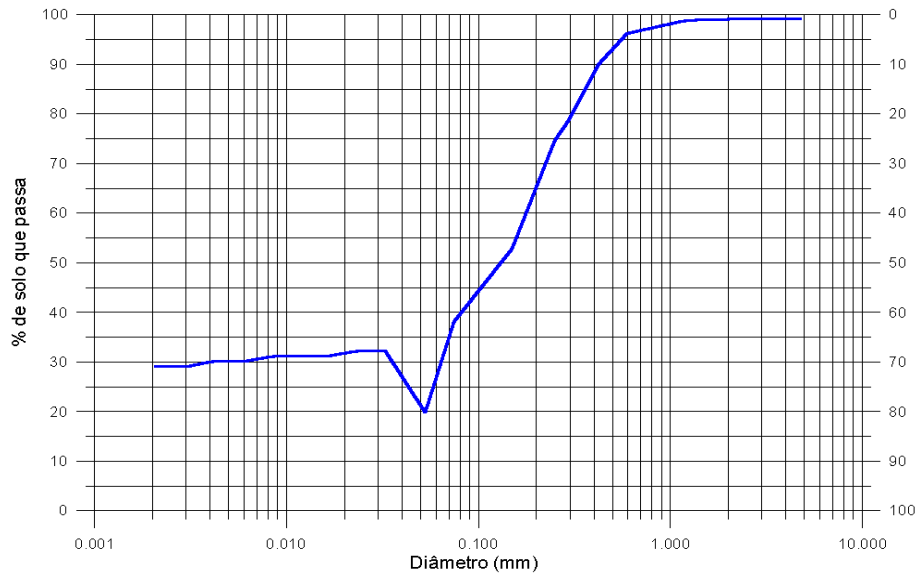
| | | | | | |
|-------|--|----|-----|-----------|---|
| ST-16 | Próximo a guarita do Horto Florestal (cruzando o rib. Claro) | II | 3,2 | Unidade 2 | Solo argiloso vermelho arroxeadado, ocorrendo manchas amarelo ocre. Sem variação no perfil de solo até o término do furo |
| ST-17 | Próximo as antenas de TV no Morro do Horto | II | 3,4 | Unidade 2 | Solo marrom escuro com fragmentos de rocha alterada ocre. Solo litólico. Término do furo a 3,40m devido a presença de rocha. |
| ST-18 | Jardim São Paulo Rua 20 entre as Avs. 10e 12 | VI | 2,7 | Unidade 4 | Nos 0,50 m solo argiloso cinza escuro, passando para uma argila . A 1,50m encontra N.a. A partir daí ocorre na argila lentes de material arenoso branco. Término do furo a 2,70 (dificuldade de penetrar o trado) |

ANEXO 2

Curvas granulométricas das unidades de análise

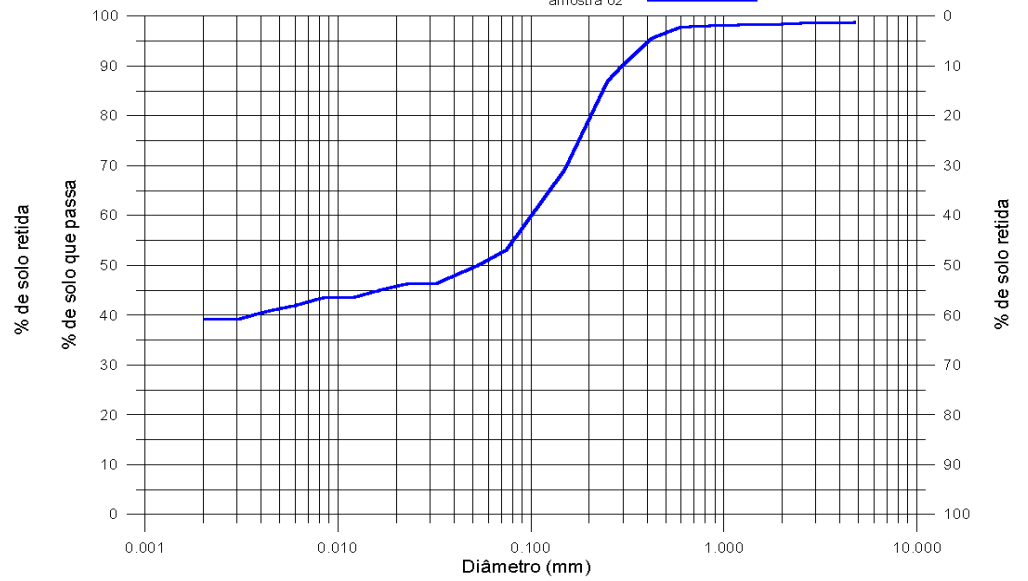
Curva granulométrica - ST-1: Fm Rio Claro

amostra 01



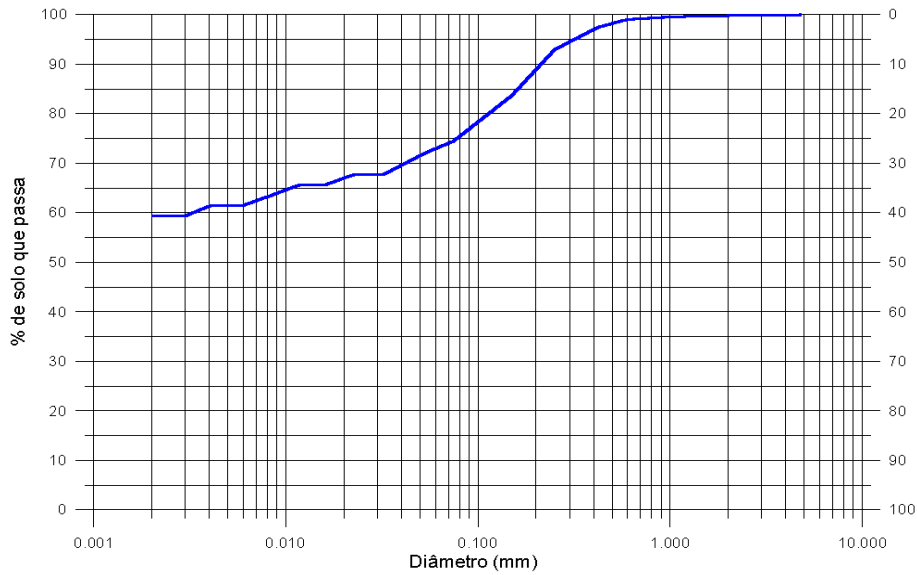
Curva granulométrica - ST-2: Fm Rio Claro

amostra 02



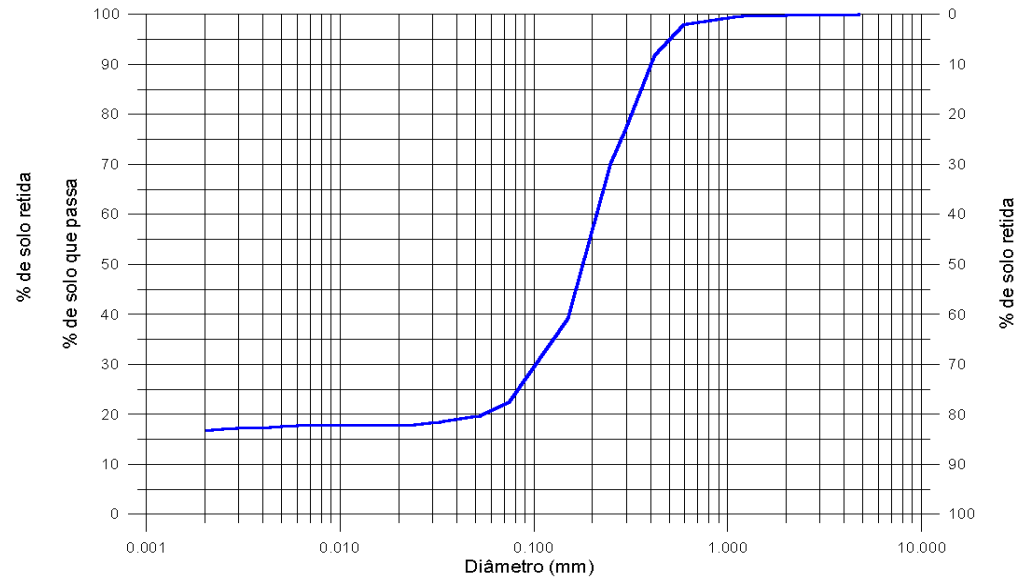
Curva granulométrica - ST-3: Diabásio

amostra 03



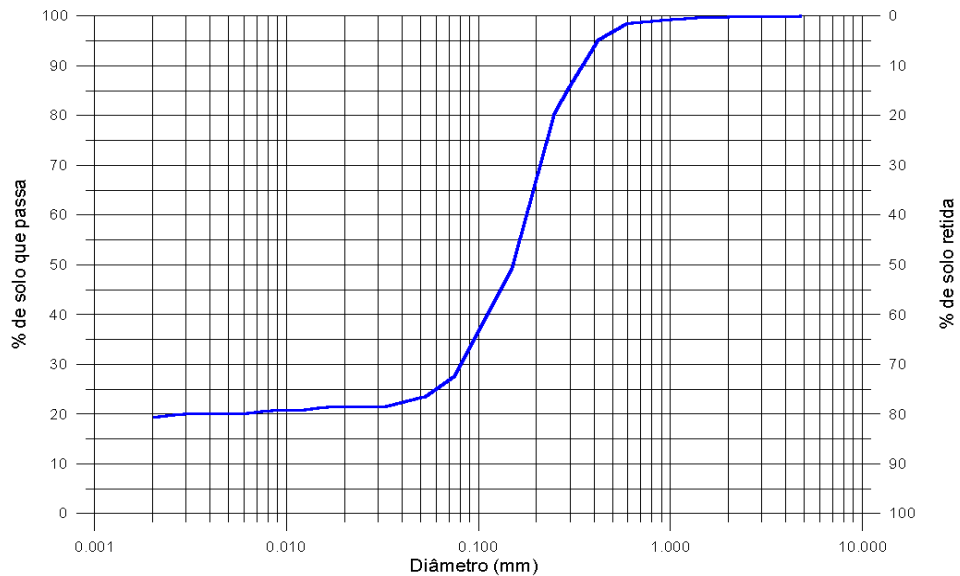
Curva granulométrica - ST-4: Fm Rio Claro

amostra 04



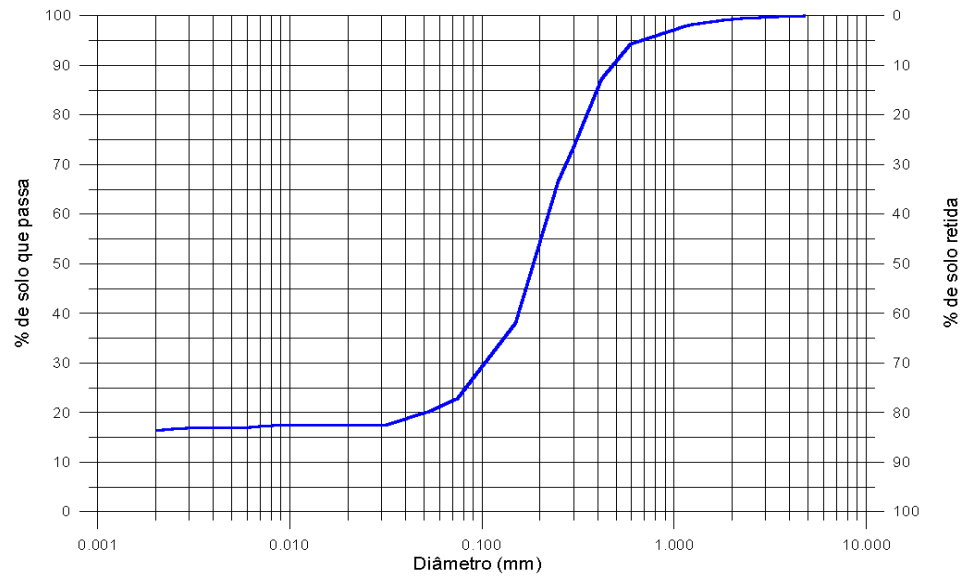
Curva granulométrica - ST-5: Fm Rio Claro

amostra 05



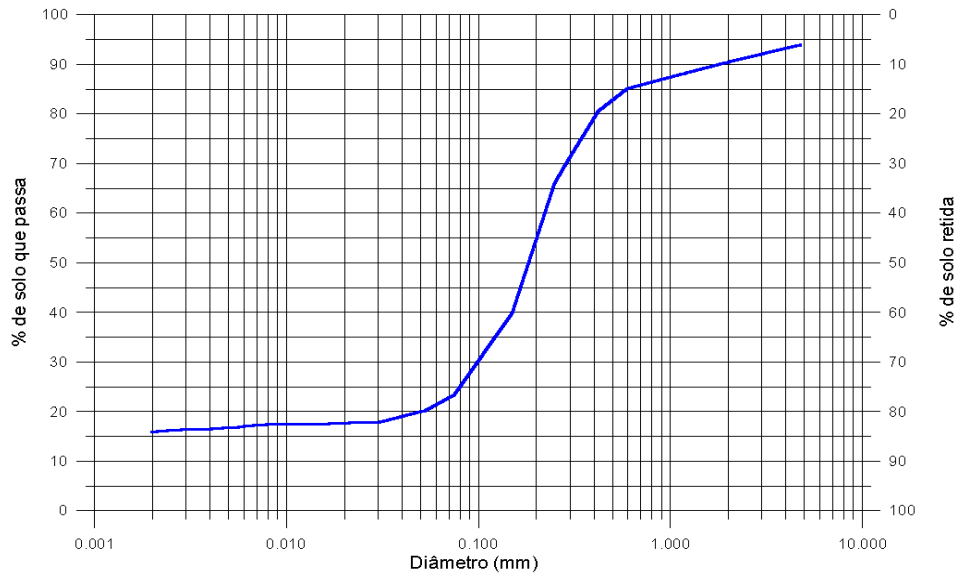
Curva granulométrica - ST-6: Fm Rio Claro

amostra 06



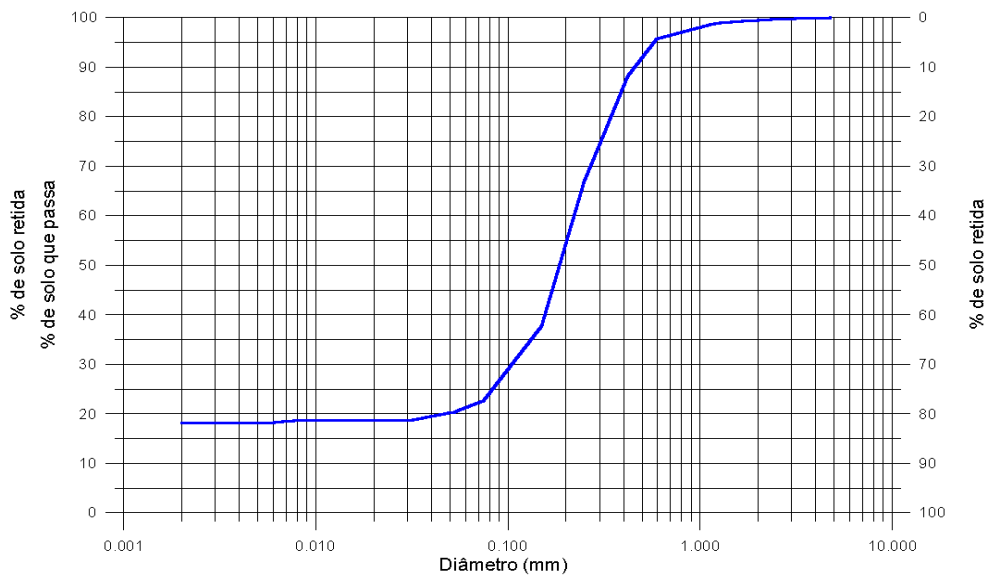
Curva granulométrica - ST-7: Fm Rio Claro

amostra 07

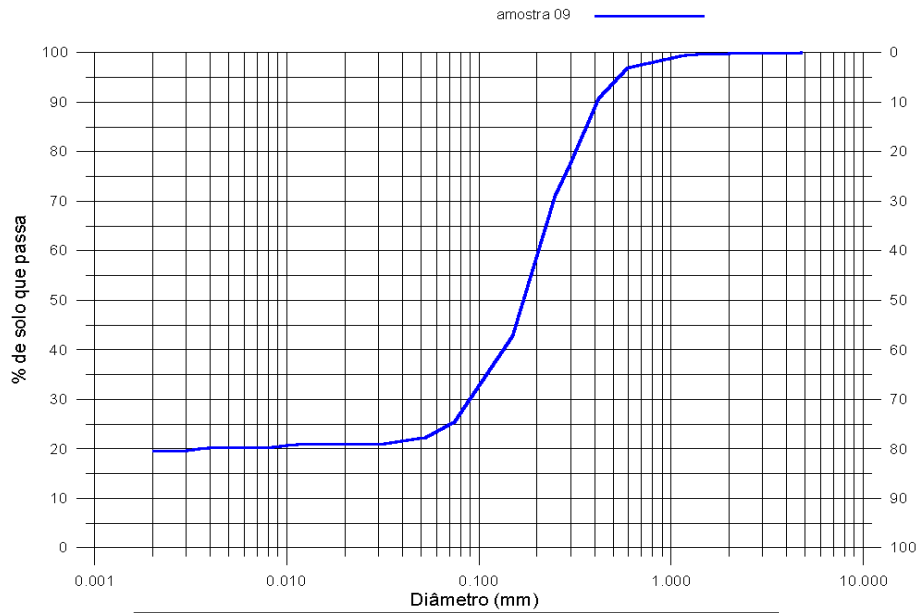


Curva granulométrica - ST-8: Fm Rio Claro

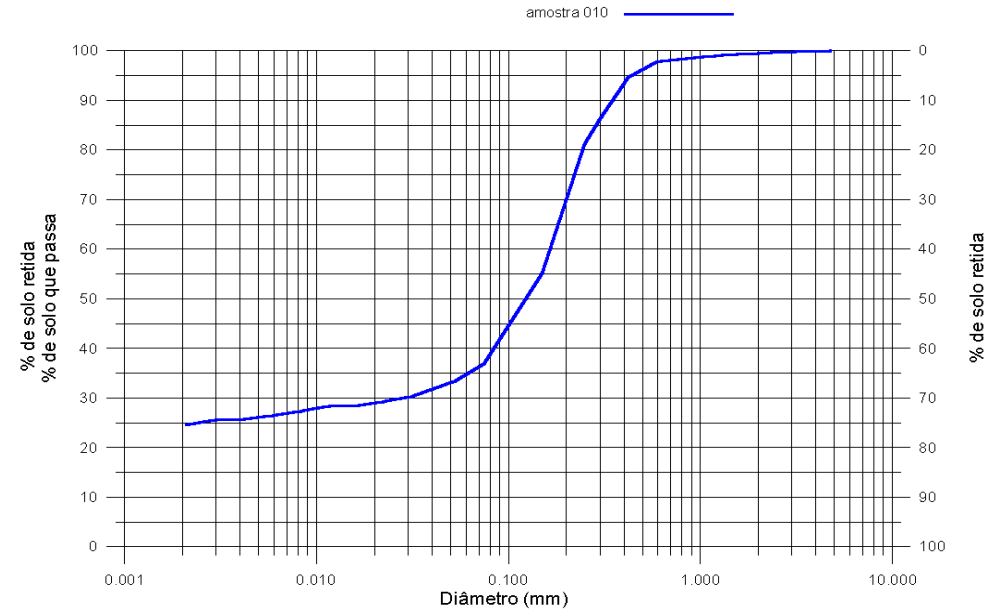
amostra 08



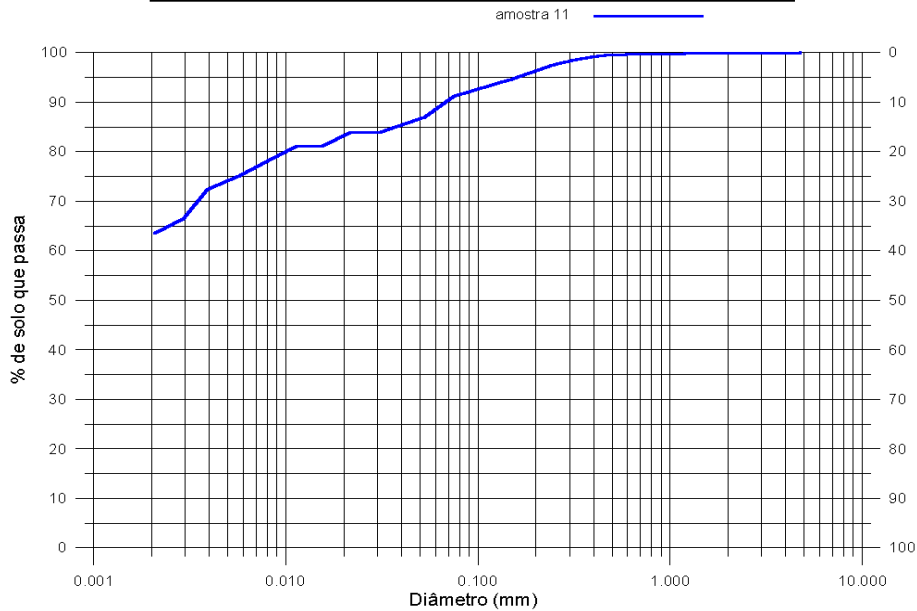
Curva granulométrica - ST-9: Fm Rio Claro



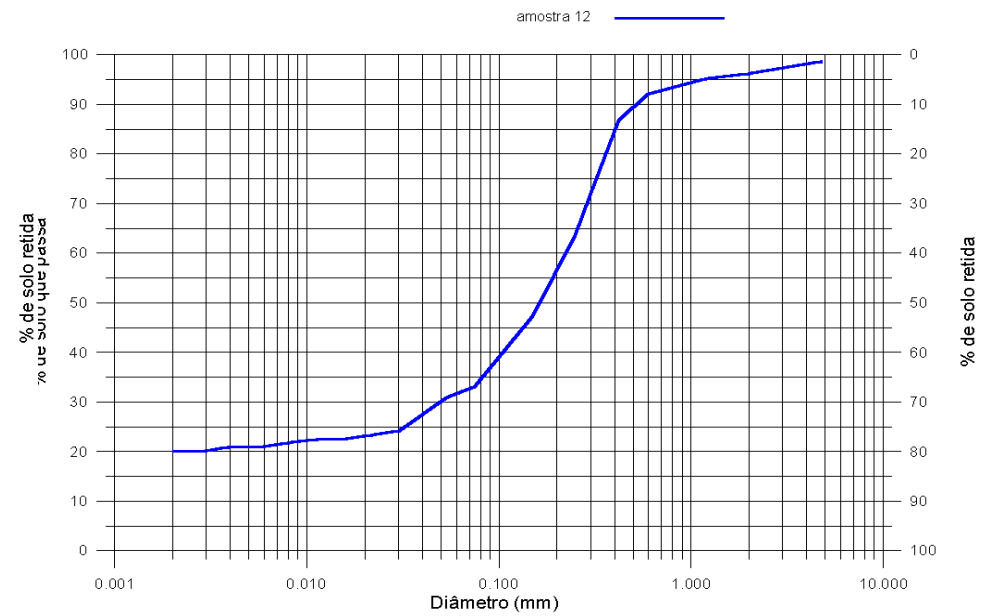
Curva granulométrica - ST-10: Fm Rio Claro



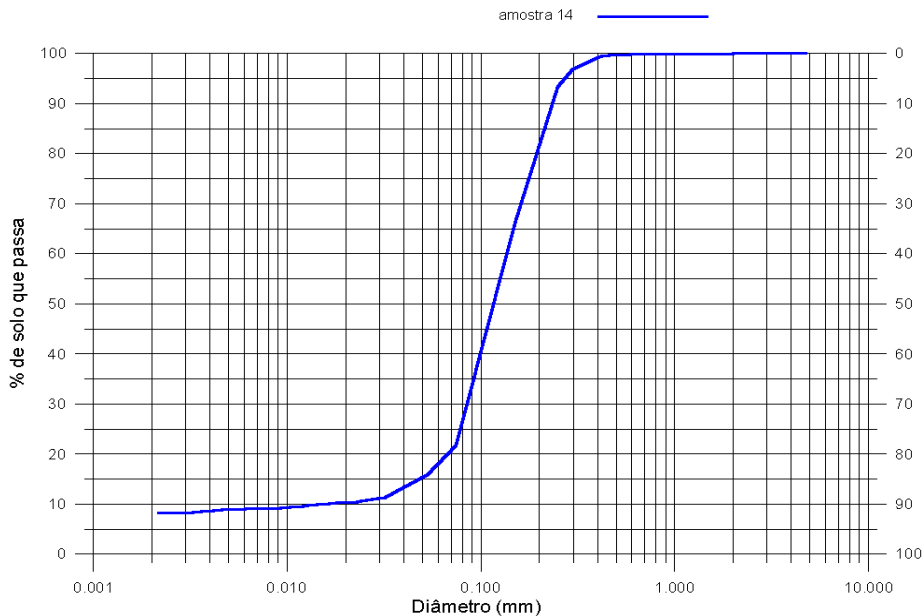
Curva granulométrica - ST-11: Aluvião sobre Fm Rio Claro



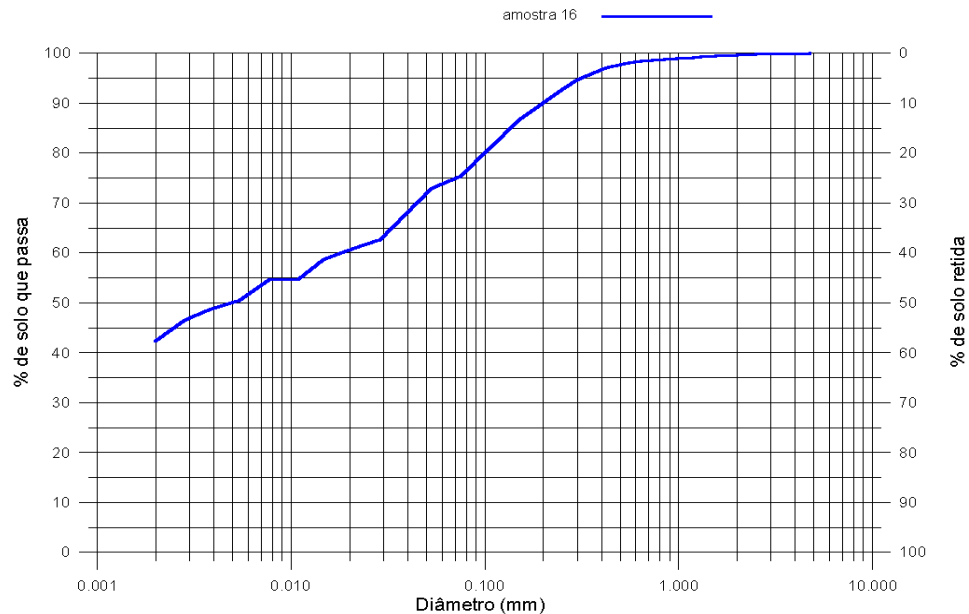
Curva granulométrica - ST-12: Aluvião -solo hidromórfico sobre Fm Rio Claro)



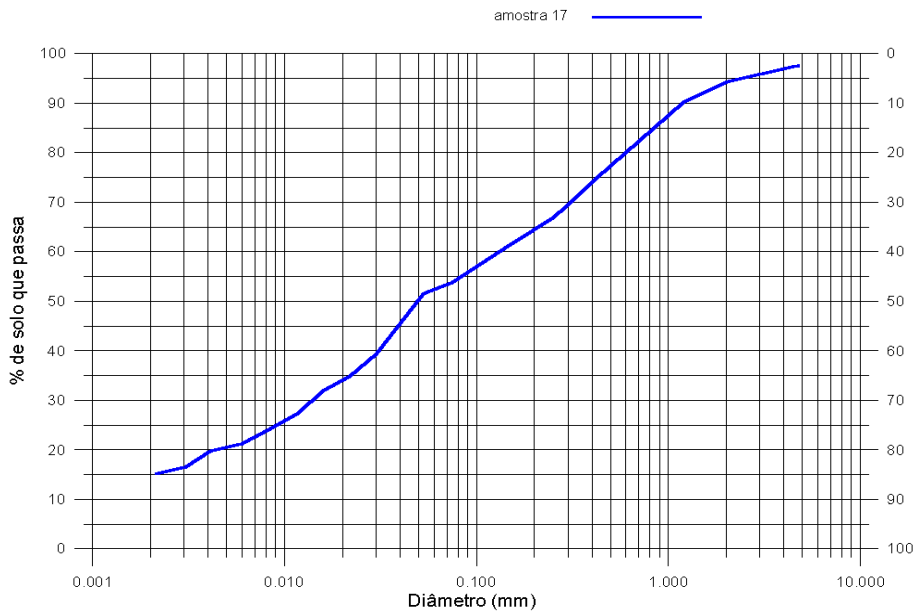
Curva granulométrica - ST-14: Aluvião



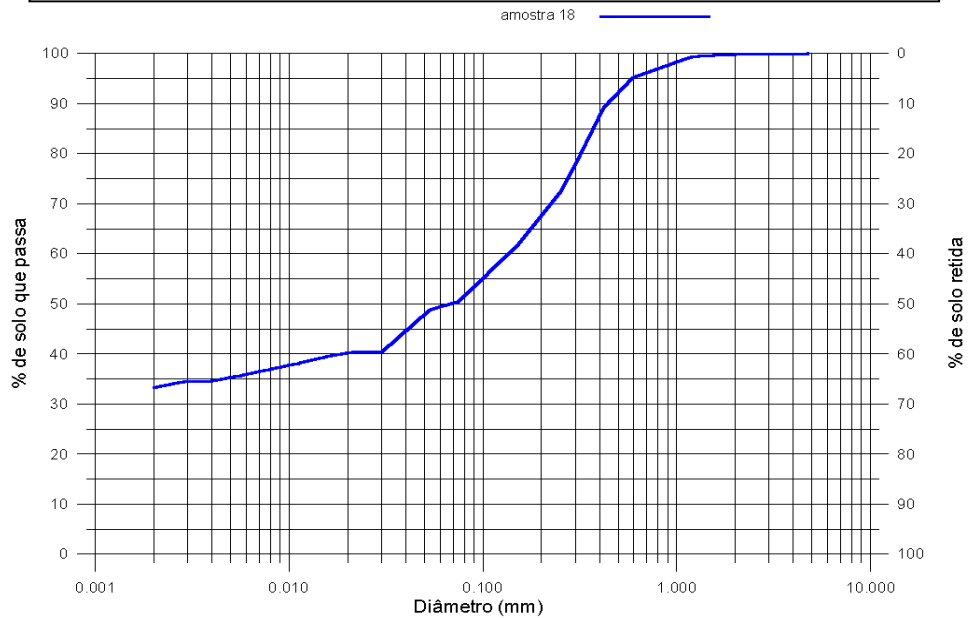
Curva granulométrica - ST-16: Diabásio



Curva granulométrica - ST-17: Diabásio



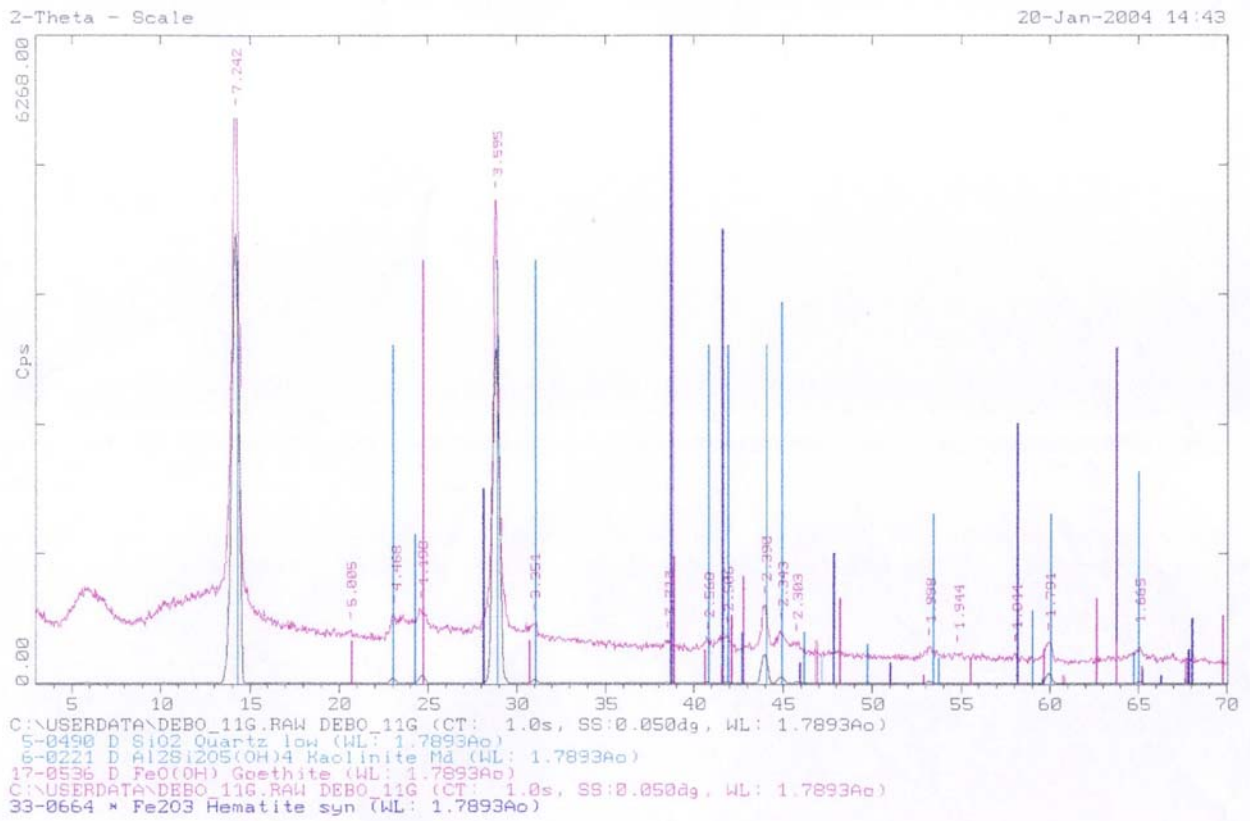
Curva granulométrica - ST-18: Aluvião solo hidromórfico/orgânico (Fm Rio Claro)



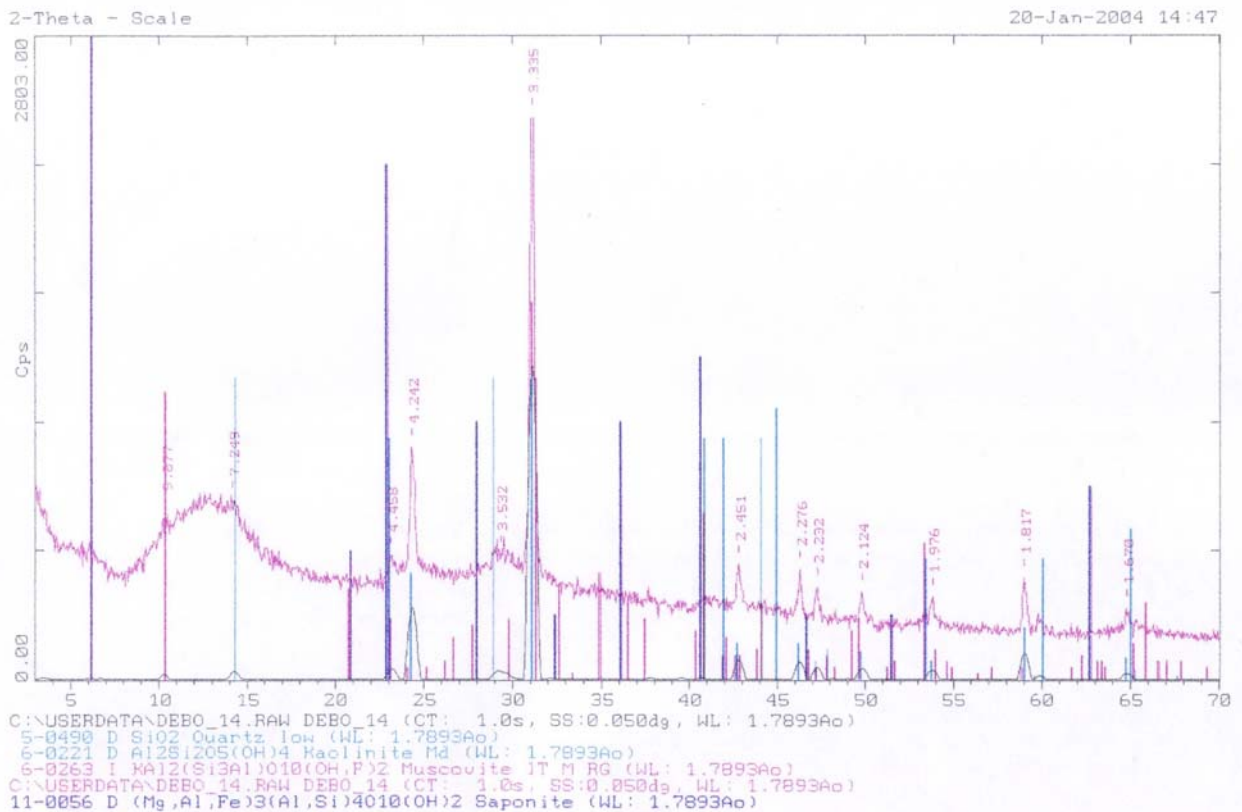
ANEXO 3

Difratogramas de raio-x

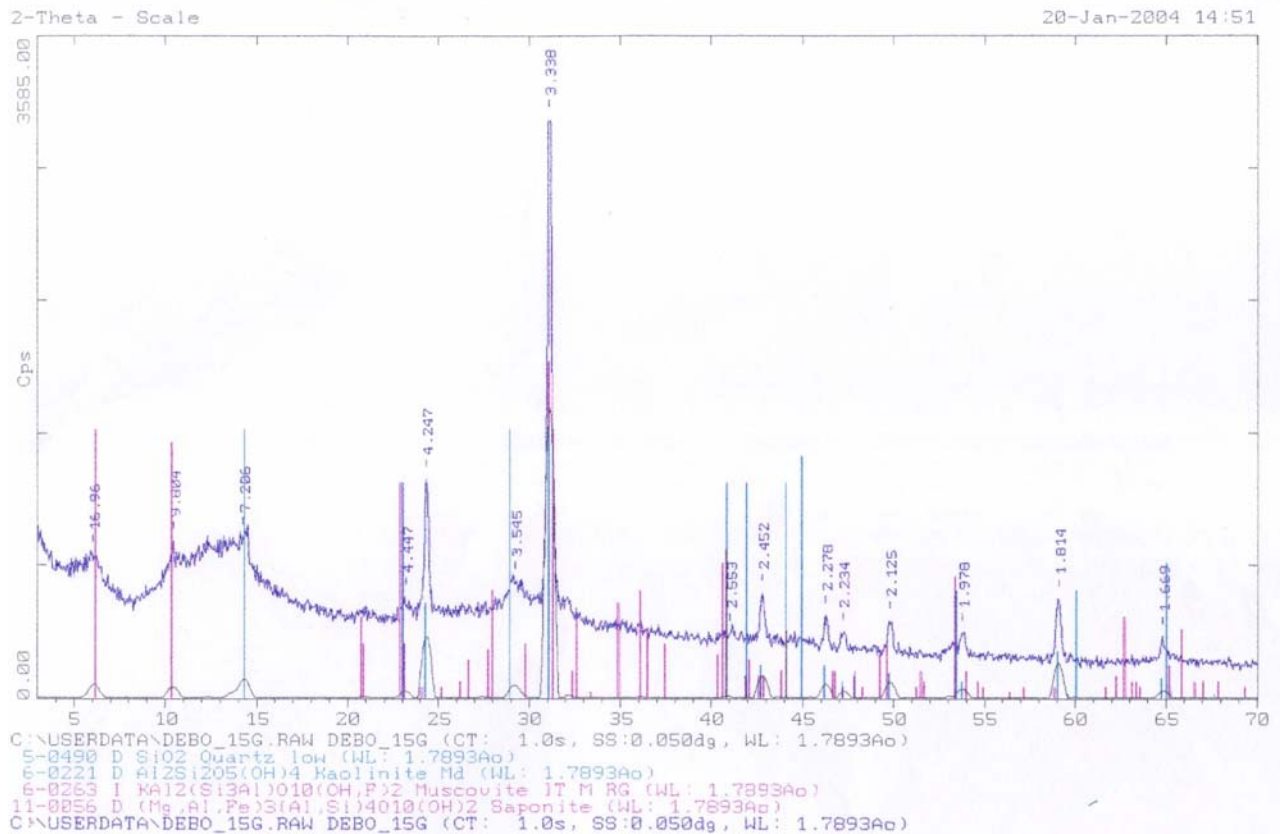
ST-11 Unidade de Análise 4 - Aluvião



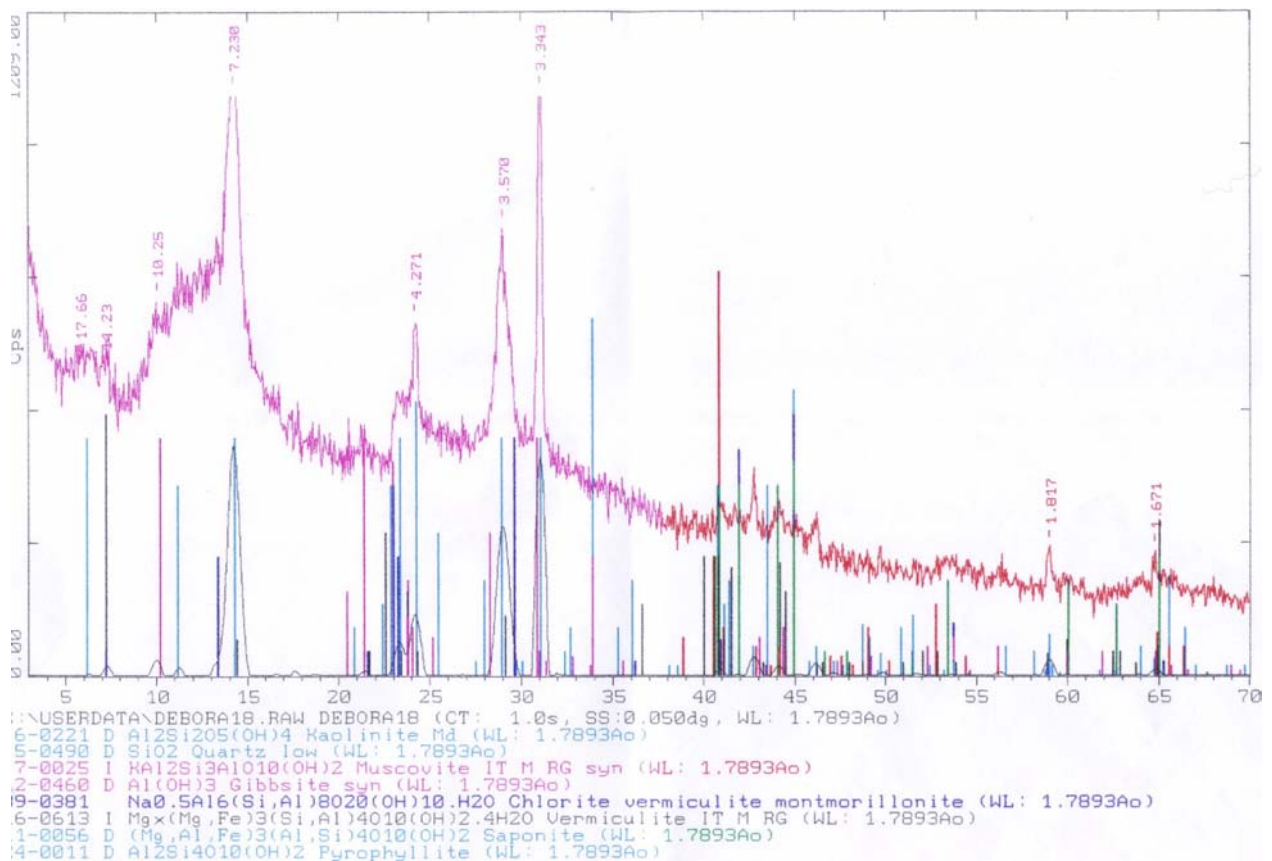
ST-14 Unidade de Análise 4 - Aluviões



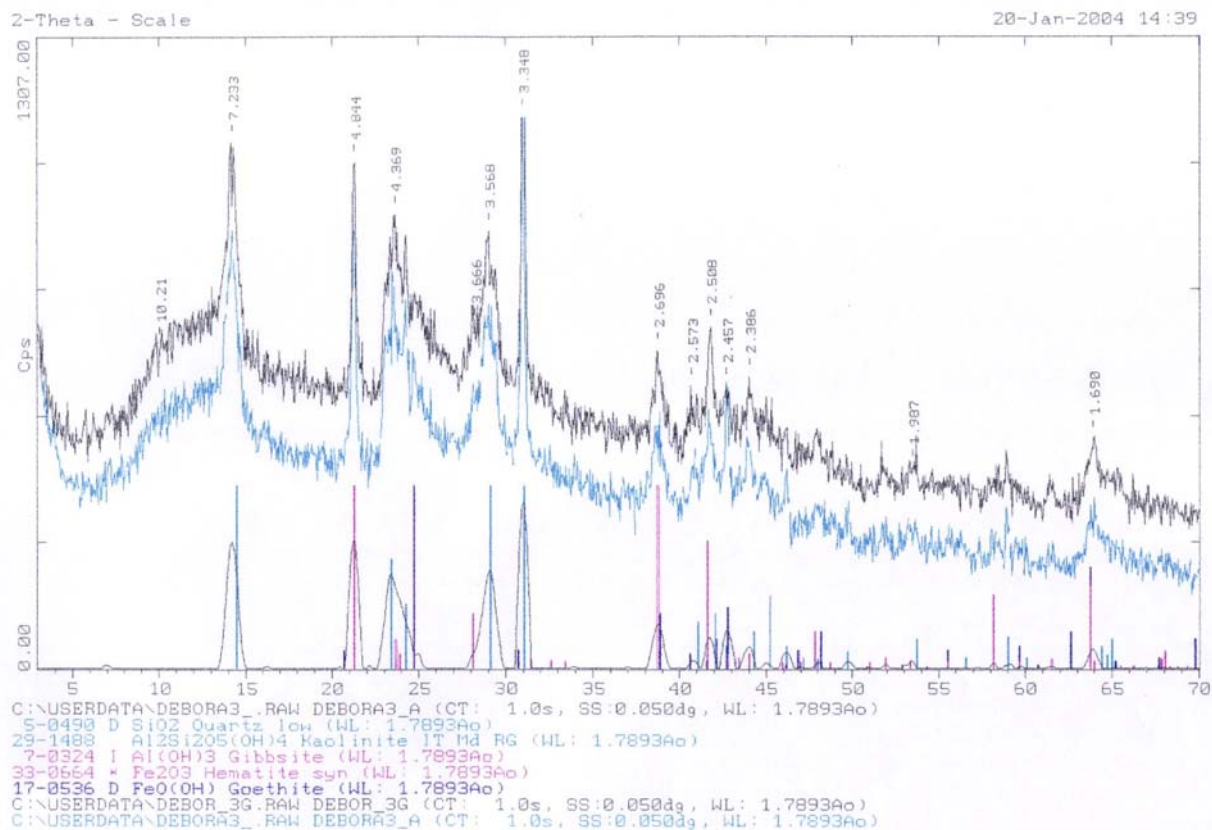
ST-15 Unidade de Análise 4 - Aluviões



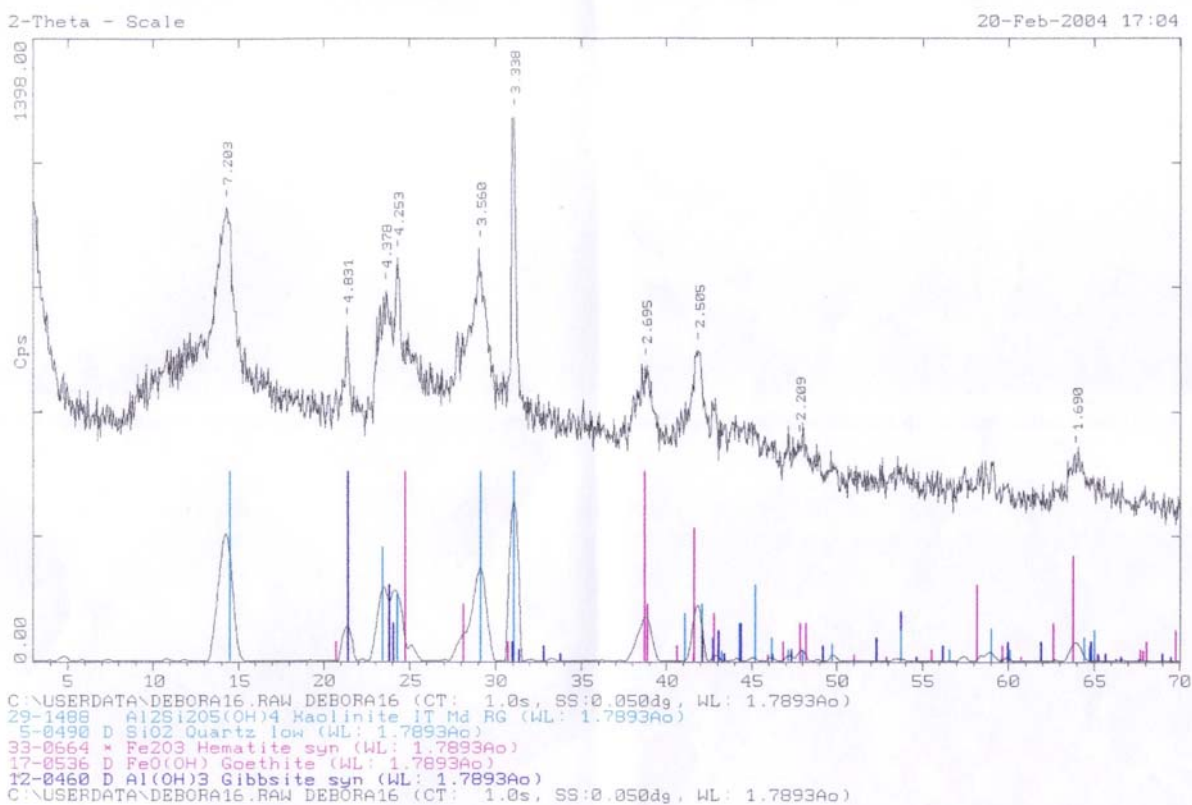
ST-18 Unidade de Análise 4 - Aluvião



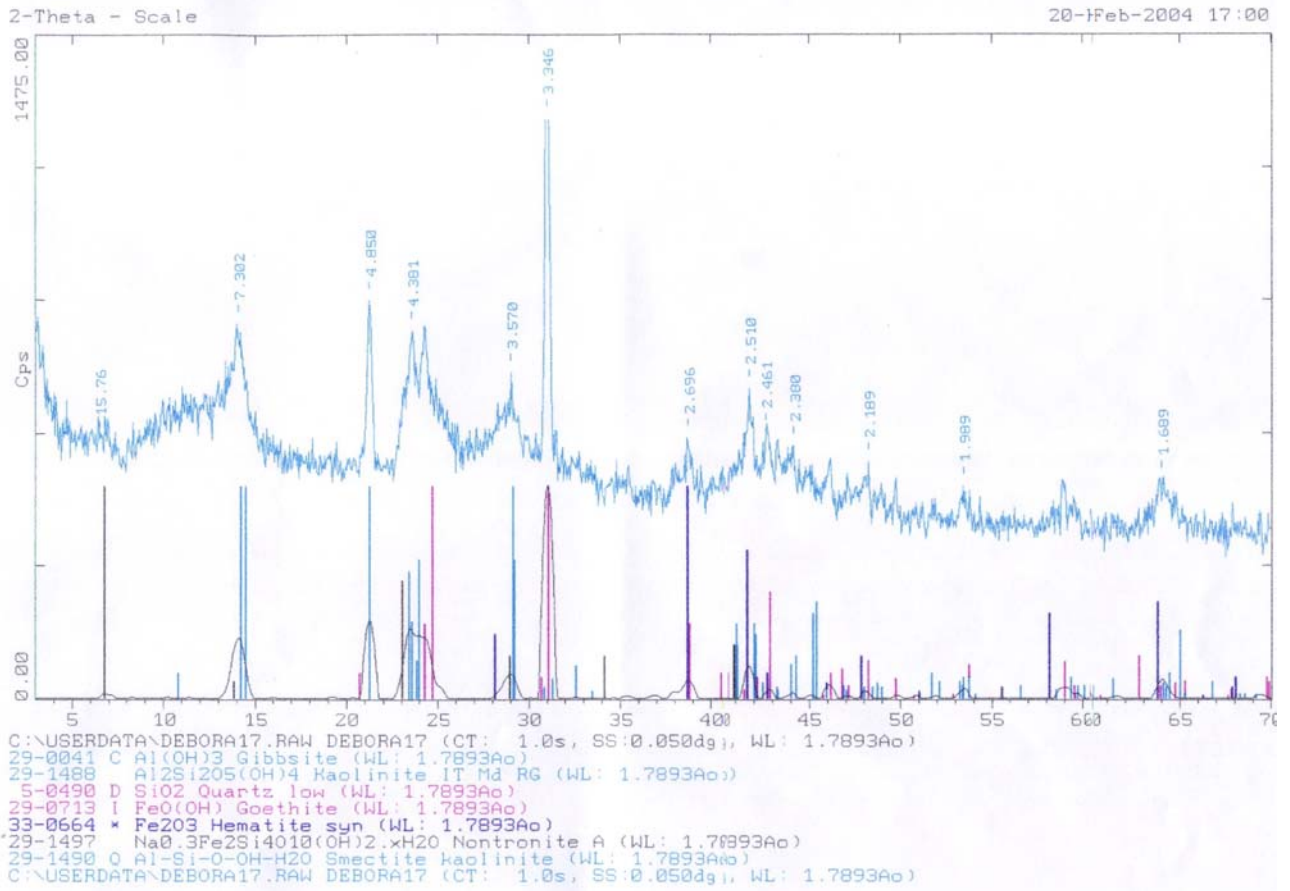
ST-03 Unidade de Análise 2 - Diabásio



ST-16 Unidade de Análise 2 - Diabásio



ST-17 Unidade de Análise 2 - Diabásio



ANEXO 4

Resultado das análises físicas e químicas das amostras de solo e
água

Resultado das análise químicas e físicas de amostras de solo

| Pontos | Unidade de análise | Profund. (m) | CTC * mEq/100g | EH ** (mV) | Sulfato ** (mg/kg) | Sulfeto ** (mg/Kg) | Condutividade * mmho/cm | pH H2O * | Teor de umidade % *** |
|--------|--|--------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|-------------------------|----------|-----------------------|
| ST-1 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4 | 1,76 | 588 | | | 0,012 | 5,1 | 17,93 |
| ST-2 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4 | 3,83 | 481 | | | 0,003 | 5,7 | 21,77 |
| ST-3 | Unidade 2 - Diabásio | 3,9 | 4,14 | 452 | | | 0,009 | 4,8 | 27,48 |
| ST-4 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4 | 1,76 | 445 | | | 0,52 | 5,2 | 9,62 |
| ST-5 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4 | 1,4 | 420 | | | 0,12 | 5,3 | 12,28 |
| ST-6 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4 | 1,07 | 454 | | | 0,011 | 4,9 | 9,26 |
| ST-7 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 3,9 | 1,47 | 448 | | | 0,006 | 5,1 | 9,42 |
| ST-8 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4,1 | 0,77 | 442 | | | 0,008 | 5 | 22,08 |
| ST-9 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4 | 1,17 | 432 | | | 0,006 | 5,2 | 8,76 |
| ST-10 | Unidade 1 - Fm Rio Claro | 4 | 1,67 | 446 | | | 0,005 | 4,9 | 16,05 |
| ST-11 | Unidade 4 - Solo hidromórfico | 3,6 | 3,06 | 410 | | | 0,36 | 5,6 | 27,25 |
| ST-12 | Unidade 4 – Solo hidromórfico | 3,8 | 1,96 | 361 | 16 | <0,5 | 0,009 | 6,1 | 18,38 |
| ST-13 | Unidade 4 - Aluvião | 2,4 | 1,58 | 318 | 2128 | <0,5 | 0,052 | 6,3 | 21,84 |
| ST-14 | Unidade 4 - Aluvião | 3,8 | 3,62 | 331 | 2544 | <0,5 | 0,059 | 5,5 | 23,84 |
| ST-15B | Unidade 4 - Aluvião | 3,5 | 2,67 | 323 | 2016 | <0,5 | 0,018 | | 25,76 |
| ST-16 | Unidade 2 - Diabásio | 3,2 | 3,65 | 365 | | | 0,32 | 5,6 | 27,08 |
| ST-17 | Unidade 2 - Diabásio | 3,6 | 7,37 | 324 | | | 0,41 | 6 | 18,34 |
| ST-18 | Unidade 4 - Solo hidromórfico/orgânico | 2,5 | 5,35 | 377 | 36 | <0,5 | 0,44 | 5,1 | 37,62 |

* Esalq – USP (Piracicaba)

** Bioagri Ambiental

*** UNESP –Rio Claro

Resultado das análise físicas de amostras água

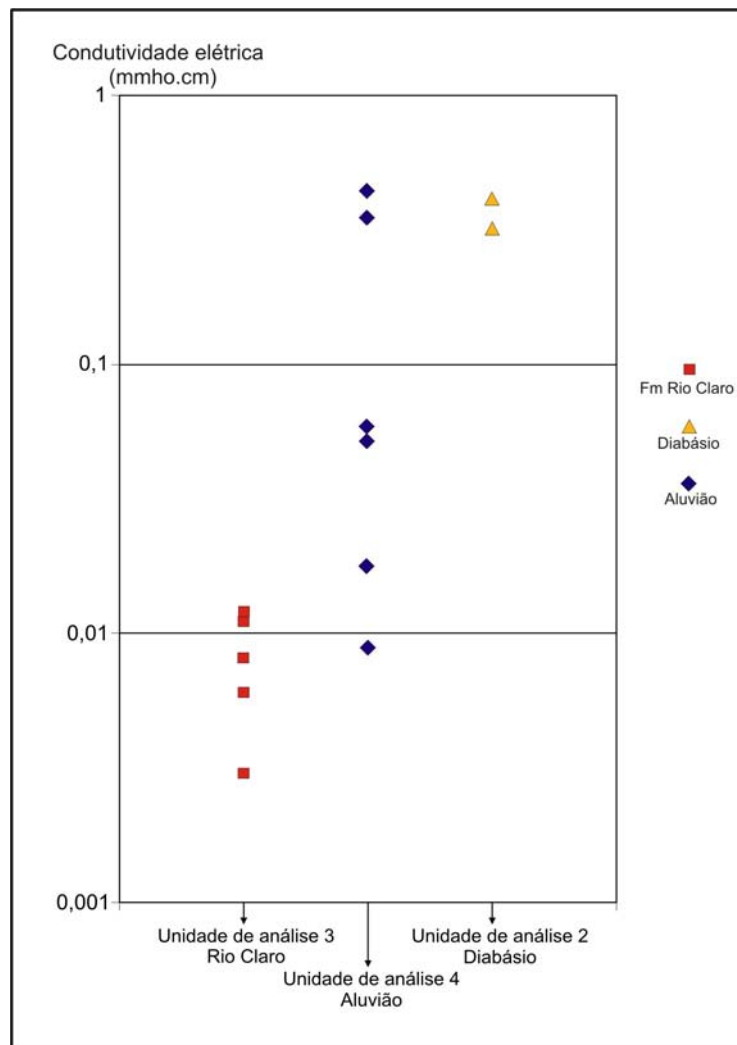
| pontos | profund. | T (°C) | pH | EH (mV) | Condutividade (mmho/cm) |
|--------|----------|--------|------|---------|-------------------------|
| ST-11 | 3,9 | 29,7 | 5,8 | 388,1 | 0,0601 |
| ST-13 | 1,9 | 27,2 | 6,75 | 87,7 | 0,106 |
| ST-14 | 3,2 | 26,2 | 6,4 | 135,2 | 0,143 |
| ST-15 | 2,4 | 28,7 | 6,3 | 61,2 | 0,145 |
| ST-18 | 1,5 | 27,9 | 6,04 | 301,7 | 0,0266 |

Os valores foram obtidos por medição “in situ”

ANEXO 5

Gráfico com a variação da condutividade elétrica para as unidades de análise 2, 3 e 4.

Gráfico com a variação da condutividade elétrica para as unidades de análise 2, 3 e 4



- A condutividade diminui com o teor de areia: **Fm Rio Claro < Aluvião < Diabásio**
- Os valores de condutividade dos aluviões com maior quantidade de finos, se equipara com as condutividades do diabásio.
- Em termos de agressividade do solos, quanto maior a condutividade mais agressivo será.