



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



**APLICAÇÃO DE MÉTODO GEOFÍSICO EM ESTUDO HIDROGEOLÓGICO, NO
MUNICÍPIO DE NOVA LIMA – MG
CARACTERIZAÇÃO DE AQUÍFEROS EM ÁREA URBANA**

AUTORA: Kênia J. Guerra

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. Alexandre Uhlein

**BELO HORIZONTE
2010**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



**APLICAÇÃO DE MÉTODO GEOFÍSICO EM ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NO
MUNICÍPIO DE NOVA LIMA – MG
CARACTERIZAÇÃO DE AQUÍFEROS EM ÁREA URBANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia.

Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Mestre em Geologia,

Área de concentração: Geologia Aplicada

Linha de pesquisa: Caracterização de sistemas de aquíferos

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Uhlein

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG
2010

AUTORA: Kênia J. Guerra

G934a Guerra, kenia J.
2010 Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico no município de Nova Lima – MG [manuscrito] : caracterização de aquíferos / Kenia J. Guerra. – 2010.
xiii, 116 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2010.
Área de concentração: Geologia aplicada.
Orientador: Alexandre Uhlein.
Bibliografia: f. 113-116.
Inclui anexos.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Aquíferos – Teses. I. Uhlein, Alexandre. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556(815.1)

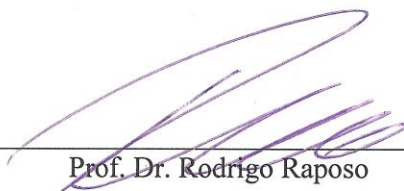
Dissertação defendida e aprovada, em 13 de maio de 2010, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Alexandre Uhlein



Profa. Dra. Leila Nunes Menegásse Velásquez



Prof. Dr. Rodrigo Raposo

AGRADECIMENTOS

A execução e conclusão deste trabalho não teriam sido possíveis se não fosse a colaboração e o apoio de tantas pessoas e a todas, gostaria de manifestar a minha profunda gratidão.

A Georadar Levantamentos Geofísicos S.A., por disponibilizar a área de pesquisa e os equipamentos utilizados.

Ao meu orientador Prof. Alexandre Uhlein, pelo acompanhamento, atenção e coragem de abraçar e acreditar nesta causa. A Prof^a. Tânia Dussin, por ter me dado à oportunidade de ingressar no mestrado. Ao Prof. Rodrigo Raposo pelo auxílio nas atividades de campo, metodologias aplicadas, e interpretação dos dados coletados nesta pesquisa.

Aos amigos que trabalharam arduamente em campo, na execução de todos os ensaios e no tratamento dos dados: Daniela, Joyce, Arides, Lindouro, André, Elton, Flávio e Altamiro. Aos meus queridos primos Jane Lílían e José Matheus, que me auxiliaram na formatação do texto e figuras.

Ao Daniel companheiro de dias tensos e alegres, a minha família e aos amigos que compartilham comigo a alegria de mais uma etapa concluída.

RESUMO

Esta pesquisa foi realizada em uma área de 17.000m², pertencente à empresa Georadar Levantamentos Geofísicos S.A., localizada no Município de Nova Lima. A área de pesquisa está inserida na Província mineral do Quadrilátero Ferrífero, que é composta por rochas arqueanas e paleoproterozóicas, especificamente no Grupo Nova Lima, unidade do Supergrupo Rio das Velhas. Encontram-se, aflorando na área, duas unidades litológicas principais: o clorita-talco xisto com veios de quartzo sulfetados, e dois afloramentos de menores dimensões de itabirito fraturado.

Com o objetivo de caracterizar as condições aquíferas da área de pesquisa foram integrados estudos geofísicos e hidrogeológicos. Inicialmente, foi realizado um levantamento preliminar, que consistiu em determinar os diferentes tipos litológicos e o nível d'água em subsuperfície através da sondagem elétrica vertical multi eletrodos (SEVME), método geofísico de resistividade. A partir destes dados, foram definidos os pontos de instalação de 3 poços de monitoramento e 1 poço de abastecimento e suas possíveis profundidades. Os poços foram perfurados e foi executada a perfilagem geofísica com quatro ferramentas (resistividade, radiação gama natural, *caliper* e ótica) em cada poço. A análise integrada dos dados geofísicos com informações litológicas de amostragem de calha permitiu identificar na área três unidades aquíferas, sendo a principal o aquífero fraturado do itabirito.

Como metodologia para a identificação das condições hidrodinâmicas do aquífero fraturado de itabirito, foram executados dois ensaios: *Bail test*, nos 3 poços de monitoramento e ensaio de bombeamento, o segundo apresentando melhores resultados para condutividade hidráulica. Uma amostra de água do aquífero do itabirito foi coletada e caracterizada quimicamente. Os resultados obtidos apontam uma condutividade hidráulica da ordem de 10⁻⁶m/s e suas águas como cloretada magnesiana. A análise de potabilidade indica, em geral, boas condições para consumo, com uma ressalva para as concentrações de antimônio e selênio que se apresentaram acima do padrão de potabilidade.

Palavras chave: Aquífero, hidrogeologia, hidroquímica, método de resistividade e perfilagem geofísica de poço.

ABSTRACT

This research was carried out in an 7.000m² area belonging to Georadar Levantamentos Geofísicos S.A., in Nova Lima county. The investigated area is part of the mineral province's Quadrilátero Ferrífero, which consists of Archean and Paleoproterozoic rocks, particularly in the Nova Lima group, unit of the Supergroup Rio das Velhas. There are two major lithological units: the talc chlorite schist with quartz sulfide veins, and two smaller fractured itabirite outcrops.

In order to characterize the conditions of the aquifers in the investigated area, a set of geophysical and hydrogeological studies has been adopted. First, a preliminary survey to determine the different types of rocks and the water level in the subsurface was carried out by a geophysical method of resistivity (vertical electrical sounding – VES). Three monitoring wells and a supply well were drilled and a well-log geophysical was performed using 4 tools (resistivity, gamma-ray, *caliper* and optical) in each well. Analysis of geophysical data together with data the litology obtained through the examination of the borehole cuttings data made it possible to identify three aquifer units in the area, the main one being the itabirite fractured aquifer.

Two tests for the identification of hydrodynamic conditions of the itabirite fracture aquifer were performed: Bail test in the 3 monitoring wells and a pumping test, the latter showing better results for hydraulic conductivity. A water sample from the itabirite aquifer was collected and chemistry characterized. The results indicate hydraulic conductivity (10^{-6} m/s) and the presence of chlorinated magnesium water. The analysis of potability indicates good conditions for consumption, except for the high concentrations of antimony and selenium.

Keywords: Aquifer, hydrogeology, hydrochemistry, geophysics resistivity methods and geophysical well logging.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xii
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – LOCALIZAÇÃO.....	3
1.2 – OBJETIVOS.....	4
1.3 – JUSTIFICATIVA.....	4
2- GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	5
2.1 – ASPECTOS LITOESTRATIGRÁFICOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	5
2.1.1- <i>Complexos de Rochas Cristalinas Arqueanas</i>	7
2.1.2- <i>Seqüência do Tipo Greenstone Belts</i>	8
2.1.3- <i>Seqüências Metassedimentares</i>	9
2.2 – GEOMORFOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	11
2.3 – HIDROGEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	13
2.3.1- <i>Histórico</i>	14
2.3.2 - <i>Contexto Hidrogeológico do Estado de Minas Gerais e para o Quadrilátero Ferrífero</i>	14
2.3.3 – <i>Caracterização Hidroestratigráfica e Hidroquímica do Aquífero em Xistos no Quadrilátero Ferrífero</i>	16
2.3.4- <i>Propriedades Físicas e Hidráulicas das Rochas Constituintes dos Aquíferos do Quadrilátero Ferrífero</i>	20
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS CONCEITOS DE GEOFÍSICA, HIDROGEOLOGIA E HIDROQUÍMICA.....	21
3.1 – MÉTODO GEOFÍSICOS.....	21
3.1.1 - <i>Método Geofísico de Eletroresistividade</i>	22
3.1.1.1 – Arranjos.....	23

3.1.1.2 – Interpretação dos dados coletados.....	25
3.1.2 – Método de Perfilação Geofísica de Poços.....	26
3.1.2.1 – Perfis de Resistividade.....	26
3.1.2.2 – Radiação Gama.....	30
3.1.2.3 – Perfilação com Compasso Calibrador (<i>Caliper</i>).....	32
3.1.2.4 – Perfilação Ótica.....	33
3.2 – SONDAÇÃO E PERFURAÇÃO PARA COMPLETAÇÃO DE POÇOS.....	34
3.2.1 - <i>Método de Percussão</i>	34
3.2.2 - <i>Método Rotativo</i>	35
3.2.3 - <i>Método Rotopneumático</i>	35
3.2.4 – <i>Revestimento do Poço Perfurado</i>	36
3.2.5 – <i>Pré -Filtro</i>	37
3.2.6 - <i>Cimentação</i>	37
3.3 – NOÇÕES DE HIDROGEOLOGIA E HIDROQUÍMICA.....	39
3.3.1 - <i>Hidrogeologia</i>	39
3.3.1.1 – Características hidrodinâmicas dos Aquíferos.....	39
3.3.2 - <i>Hidroquímica</i>	47
3.3.2.1 – Parâmetros Físico-Químicos da Água.....	47
3.3.2.2 – Classificação e Origem dos Constituintes das Águas Subterrâneas...	48
3.3.2.3 – Técnicas de Coleta.....	49
3.3.2.4 – Preservação e Armazenamento de Amostras.....	49
3.3.2.5 – Tratamento e Apresentação dos Resultados das Análises.....	50
3.3.2.5.1 – <i>Verificação da Validade das Análises de Água</i>	50
3.3.2.5.2 – <i>Representação Gráfica das Análises</i>	53
4 – MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA DE PESQUISA.....	55
4.1 – LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E MAPEAMENTO GEOLÓGICO.....	55
4.2 – AQUISIÇÃO GEOFÍSICA – ELETRORESISTIVIDADE.....	56
4.3 – PERFURAÇÃO DOS POÇOS E DESCRIÇÃO GEOLÓGICA.....	57
4.4 – AQUISIÇÃO GEOFÍSICA – PERFILAÇÃO	58
4.4.1 - <i>Perfilação Caliper</i>	59
4.4.2 - <i>Perfilação Ótica</i>	59
4.4.3 – <i>Perfil de Resistividade</i>	60
4.4.4 - <i>Perfilação Gama</i>	61

4.5 – COMPLETAÇÃO DOS POÇOS PERFURADOS.....	62
4.6 – <i>BAIL TEST</i>	62
4.7 – ENSAIO DE BOMBEAMENTO, COLETA DE ÁGUA E MEDIÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	64
4.7.1 – Ensaio de Bombeamento	64
4.7.2 – Coleta de Água e Medição dos Parâmetros Físico-Químicos	66
5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
5.1 – TOPOGRAFIA E GEOLOGIA LOCAL.....	67
5.1.1 – Topografia	67
5.1.2 – Geologia Local	67
5.1.2.1 – Itabirito.....	68
5.1.2.2 – Clorita-Talco Xisto.....	68
5.2 – LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORESISTIVIDADE.....	70
5.3 – PERFURAÇÃO DOS POÇOS E DESCRIÇÃO LITOLÓGICA.....	73
5.3.1 – Descrição Litológica do poço PM 01	73
5.3.2 – Descrição Litológica do poço PM 02	73
5.3.3 – Descrição Litológica do poço PM 03	74
5.3.4 – Descrição Litológica do poço PA 01	74
5.3.5 – Análise Comparativa entre a Seção de Eletroresistividade A-B e as Litologias Encontradas na Perfuração dos Poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA 01	75
5.4 – AQUISIÇÃO GEOFÍSICA DE PERFILAGEM.....	78
5.4.1 – Resultado das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PM 01	78
5.4.2 – Resultado das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PM 02	78
5.4.3 – Resultado das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PM 03	79
5.4.3.1 – Resultados de Perfilagem <i>Caliper</i> para o poço PM 03.....	80
5.4.3.2 – Resultados de Perfilagem Gama para o poço PM 03.....	81
5.4.3.3 – Resultados de Perfilagem Ótica para o poço PM 03.....	81
5.4.4 – Resultado das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PA 01	83
5.4.4.1 – Resultados de Perfilagem <i>Caliper</i> para o poço PA 01.....	83
5.4.4.2 – Resultados de Perfilagem para Resistividade SP e Gama para o poço PA 01.....	84
5.4.4.3 – Resultados de Perfilagem ótica para o poço PA 01.....	86

5.5 – COMPLETAÇÃO DOS POÇOS.....	88
5.6 – HIDROGEOLOGIA.....	93
5.6.1 – <i>Teste de Vazão para o poço PA 01</i>	93
5.6.2 – <i>Bail test</i>	94
5.6.3 – <i>Teste de Bombeamento</i>	97
5.6.4 – <i>Direção de Fluxo</i>	100
5.7 – HIDROQUÍMICA.....	102
5.7.1 - <i>Análise dos Parâmetros Físico-Químicos da Água</i>	102
5.7.2 - <i>Análise Hidroquímica da Água do poço PA 01</i>	104
5.7.3 – <i>Verificação e Validação dos Resultados da Análise Hidroquímica da Água do Poço PA 01</i>	106
6 – CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

ANEXOS

ANEXO 1 – Planilhas de monitoramento do ensaio de bombeamento para os poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA 01.

ANEXO 2 – Relatório de análise química da água coletada no poço PA 01

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da área de Pesquisa, Nas dependências da empresa Georadar, Município de Nova Lima (MG).....	3
Figura 2.1 – Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, modificado de Alkmim & Marshak (1998).....	6
Figura 2.2 – Coluna estratigráfica para o Quadrilátero Ferrífero e adjacências. A parte direita da coluna representa as relações observadas no setor ocidental do Quadrilátero Ferrífero, e a parte esquerda, as relações do setor oriental (Alkmim & Marshak 1998).....	7
Figura 2.3 – Unidades Hidrogeológicas do Quadrilátero Ferrífero, com indicação da localização da área de pesquisa. Modificado de Mourão (2007).....	17
Figura 2.4 – Diagrama de Piper e Schoeller para amostras coletadas nos domínios do aquífero em xistos unidade hidrogeológica do Quadrilátero Ferrífero (Mourão 2007).....	18
Figura 2.5 – Diagrama adaptado de Chadda 1999 <i>in</i> Mourão (2007) e separação das amostras dos aquíferos em xistos em grupos com características químicas semelhantes.....	18
Figura 3.1 – Disposição dos eletrodos na superfície do terreno e fluxo de corrente (Freitas Filho 2006).....	22
Figura 3.2 – Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos (modificado de Elis 1998 <i>in</i> Ustra 2008).....	25
Figura 3.3 – Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem resistência pontual (Oliveira 2005).....	28
Figura 3.4 – Comportamento da curva dos perfis de Resistividade e Radioatividade (Souza 2005)	29
Figura 3.5 – Sumário de respostas de perfilagem geofísica em algumas litologias (Oliveira 2005)	30
Figura 3.6 – Perfil esquemático de um poço tubular (Demétrio <i>et al.</i> 2008).....	38
Figura 3.7 – Desenho esquemático do teste de <i>slug</i> com os parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica pelo método Hvorslev (1995) <i>in</i> Oliva <i>et al.</i> (2005).....	42

Figura 3.8 – Formação do cone de depressão a partir do ensaio de bombeamento (Rebouças <i>et al.</i> 1971).....	44
Figura 3.9 – Método gráfico de superposição para a determinação de T e S utilizando a metodologia de Theis (Feitosa <i>et al.</i> 2008).....	47
Figura 3.10 – Diagrama de Piper, modificado de Piper (1944).....	53
Figura 3.11 – Diagrama de Stiff, modificado de Stiff (1951).....	54
Figura 3.12 – Diagrama de Schoeller, modificado de Schoelller (1962).....	54
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas de pesquisa executadas.....	55
Figura 4.2 – Eletroresistivímetro da marca ABEM, modelo SAS 4.000.....	56
Figura 4.3 – Foto aérea com a localização da linha de Sevmé executada (linha amarela).....	57
Figura 4.4 – Perfuração e coleta de amostra de solo nos poços instalados.....	58
Figura 4.5 – Sonda 3 ACS – 3 Arm Caliper Sonde, com as hastes (braços) abertas.....	59
Figura 4.6 – Sonda D-OPTV-Digital Optical Televiewer (ao lado os centralizadores), e representação esquemática dos sensores.....	60
Figura 4.7 – Arranjo bioeletródico (distância AM em polegadas).....	61
Figura 4.8 – Instalação de revestimento dos poços, tubo geomecânico.....	62
Figura 4.9 – <i>Bailer</i> de inox Brasbailer.....	63
Figura 4.10 – Medidor de nível d’água Brasbailer.....	63
Figura 4.11 – <i>Solinst Levellogger Gold</i>	63
Figura 4.12 – <i>Mini Diver Schlumberger</i>	63
Figura 4.13 – Sonda de medição de nível d’água.....	65
Figura 4.14 – Leitura de recuperação com medidor de N.A. no PM 02.....	66
Figura 4.15 – Sonda Multi parâmetros Hanna modelo HI 9828.....	66

Figura 5.1 – Mapa Geológico Topográfico - Área de estudo Nova Lima – MG.....	69
Figura 5.2 – Seção A-B de Eletroresistividade da área de estudo sendo, (a) resistividade em ohm.m e (b) cargabilidade em msec.....	71
Figura 5.3 – Seção A-B na área de pesquisa sendo, (a) resistividade, (b) cargabilidade em msec e (c) perfil hidrogeológico.....	76
Figura 5.4 – Perfil <i>caliper</i> ao longo do PM 02. Observar que entre 18 e 16 metros, o diâmetro do poço está menor que 6 polegadas indicando possível colapso nas paredes.....	79
Figura 5.5 – Perfil <i>caliper</i> ao longo do poço PM 03.....	80
Figura 5.6 – Perfilagem gama ao longo do poço PM 03.....	81
Figura 5.7 – Perfilagem ótica do PM 03 acima do N.A.....	82
Figura 5.8 – N.A. do PM 03 em 5,6 m. Observar a elevada turbidez do fluído.....	82
Figura 5.9 – Projeção ortográfica do poço PM 03 nos planos E-W e N-S.....	82
Figura 5.10 – Perfil <i>caliper</i> ao longo do poço PA 01. Em destaque ocorrência de fraturas.....	83
Figura 5.11 – Perfilagem com a ferramenta ELOG. I curva gama natural e SP (vermelha e verde). II curva de resistividade curta, longa e resistência pontual (azul, vermelha e verde).....	84
Figura 5.12 – Nível d'água do poço PA 01 em 6,4 metros.....	87
Figura 5.13 – Transição entre solo e rocha a 14,5 metros, observada a partir da diferença de coloração entre as camadas.....	87
Figura 5.14 – Projeção ortográfica do poço PA 01 nos planos E-W e N-S.....	87
Figura 5.15 – Perfil litológico e construtivo do poço PM 01.....	89
Figura 5.16 – Perfil litológico e construtivo do poço PM 02.....	90
Figura 5.17 – Perfil litológico e construtivo do poço PM 03.....	91
Figura 5.18 – Perfil litológico e construtivo do poço PA 01.....	92

Figura 5.19 – Condutividade hidráulica pelo método Hvorslev – PM 01.....	95
Figura 5.20 – Condutividade hidráulica pelo método Hvorslev – PM 03.....	96
Figura 5.21 – Gráfico tempo x rebaixamento para o ensaio de bombeamento na área de pesquisa	98
Figura 5.22 – Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis – PA 01.....	99
Figura 5.23 – Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis – PM 01.....	99
Figura 5.24 – Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis – PM 02.....	99
Figura 5.25 – Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis – PM 03.....	99
Figura 5.26 – Mapa Hidrogeológico - Área de Estudo Nova Lima.....	101
Figura 5.27 – Parâmetros físico-químicos do PA 01: temperatura (°C), pH, OD (oxigênio dissolvido em ppm), condutividade elétrica (µs/cm) e SDT (sólidos totais dissolvidos em mg/L).....	102
Figura 5.28 – Diagrama de Stiff para o PA 01.....	104
Figura 5.29 – Diagrama de Schoeller. Comparação entre amostras coletadas por Mourão (2007) e o PA 01.....	105
Figura 5.30 – Diagrama de Piper. Comparação entre amostras coletadas por Mourão (2007) e o PA 01.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de condutividade hidráulica observados por Mourão (2007) para as diferentes unidades litológicas presentes no aquífero Cauê e demais unidades aquíferas do Quadrilátero Ferrífero.....	20
Tabela 3.1 – Arranjos eletródicos mais utilizados (Ustra 2008).....	24
Tabela 3.2 – Exemplo de valores de resistividade em alguns minerais ou rochas (Telford <i>et al</i> 1999 <i>in</i> Oliveira 2005).....	27
Tabela 3.3 – Classificação das rochas sedimentares de acordo com sua radioatividade natural (Nery 1997 <i>in</i> Souza 2005).....	32
Tabela 3.4 – Métodos de análise de fluxo para poços em função do tipo de aquífero e regime de bombeamento (Feitosa <i>et al.</i> 2008).....	45
Tabela 3.5 – Definição dos principais parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas modificado de Santos (2008).....	48
Tabela 3.6 – Critério de aceitabilidade para análise de água pelo balanço iônico (Clesceri <i>et al.</i> 2005).....	51
Tabela 5.1 – Valores de resistividade dos domínios A, B, C e D para a seção A-B da área de pesquisa e seus materiais correspondentes pela classificação de Elis (1998) <i>in</i> Ustra (2008).....	70
Tabela 5.2 – Intervalos de leitura de cargabilidade para a seção A-B e a condição aquífera referente a estas leituras.....	72
Tabela 5.3 – Espessura estimada da camada aquífera nos poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA 01.....	72
Tabela 5.4 – Descrição das unidades litológicas presentes na área de pesquisa e suas características hidrogeológicas.....	75
Tabela 5.5 – Relação dos poços perfilados e ferramentas de perfilagem utilizadas.....	78
Tabela 5.6 – Interpretação dos dados de leitura de resistividade e radioatividade natural para o poço PA 01 e sua relação com o perfil geológico.....	85

Tabela 5.7 – Quadro resumo dos resultados obtidos nos métodos de eletroresistividade, perfilagem e sondagem aplicados aos poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA 01 para a caracterização do aquífero da área de pesquisa.....	88
Tabela 5.8 – Teste de vazão para o poço PA 01.....	94
Tabela 5.9 – Valores de condutividade hidráulica obtidos pelos ensaios <i>bail test</i> e bombeamento e seus valores indicativos definidos por Mourão (2007) para o aquífero no itabirito	100
Tabela 5.10 – Valores de carga hidráulica para os poços PA 01, PM 01, PM 02 e PM 03....	100
Tabela 5.11 – Parâmetros físico-químicos da água do PA 01.....	103
Tabela 5.12 – Análise hidroquímica da água segundo a Portaria 518 Ministério da Saúde...	104
Tabela 5.13 – Cálculo do balanço iônico para o PA 01.....	107
Tabela 5.14 – Valor calculado de TDS (sólidos totais dissolvidos) para o PA 01.....	107

CAPÍTULO 1

1- INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos, em especial a água subterrânea, correspondem a uma importante fonte de abastecimento de água para a sociedade. Neste contexto de utilização deste recurso torna-se cada vez mais necessária a caracterização dos sistemas aquíferos. Para esta caracterização são aplicados estudos nas áreas de Geofísica, Hidroquímica e Hidrogeologia. A escolha de qual metodologia de pesquisa aplicar em um estudo específico é de extrema importância para se obter resultados representativos em menor tempo e custo.

Este trabalho constitui-se na aplicação de geofísica em um estudo hidrogeológico em área urbana, no Município de Nova Lima, região metropolitana de Belo Horizonte. A área de estudo está inserida dentro da região denominada como Quadrilátero Ferrífero, caracterizado por grandes corpos de mineralização de ferro. Tratando-se especificamente dos recursos hídricos subterrâneos tem-se como unidade aquífera o aquífero xistoso Nova Lima, de idade Arqueana. São complexos metamórficos que representam a crosta siálica do Quadrilátero Ferrífero, sendo caracterizados por uma evolução tectônica de repetidos ciclos de crescimento crustal (Carneiro *et al.* 1955). Neste estudo foram aplicadas técnicas de Geofísica, Hidroquímica e Hidrogeologia para a caracterização do aquífero.

A Geofísica é um método indireto onde são empregadas ferramentas de baixo custo e de rápida aplicação. Dois métodos foram aplicados neste trabalho: Eletroresistividade e Perfilagem. O levantamento Geofísico através da aplicação de métodos elétricos, vem trazendo grandes e importantes informações sobre o potencial hídrico existente no subsolo (Freitas Filho 2006). O método de Eletroresistividade consiste em emitir uma corrente contínua ou de baixa frequência em dois pontos do terreno e medir a diferença de potencial em dois outros pontos. A partir deste potencial medido obtém-se o perfil de resistividade em subsuperfície da área pesquisada (Freitas Filho 2006). As diferentes resistividades observadas neste trabalho foram interpretadas identificando-se em subsuperfície o nível d'água do aquífero e os diferentes horizontes litológicos. A Perfilagem Geofísica de poço é usada principalmente na prospecção de petróleo e de água subterrânea, e secundariamente para a verificação de variações texturais de camadas sedimentares e zonas fraturadas (Nery 1997 *in* Souza 2005). Em uma Perfilagem de poço é usado um conjunto de perfis geofísicos, os quais são compostos de sensores acoplados a equipamentos eletrônicos. Estes sensores são

introduzidos poço adentro, registrando a cada profundidade as diversas informações relativas as características físicas das rochas e dos fluídos em seus interstícios (Souza 2005). Esta ferramenta foi empregada neste trabalho com o objetivo de verificar em poços perfurados a existência de fraturas, os diferentes tipos litológicos, nível d'água, alinhamento e diâmetro de perfuração. Todos estes dados irão auxiliar na determinação do perfil de completação dos poços perfurados.

Para a execução de coleta de água, ensaios Hidrogeológicos e de Perfilagem é necessária a instalação de poços com construção adequada em pontos representativos da área. Para a definição do número de poços a serem instalados, sua locação e método de sondagem a ser empregado foram analisadas as condições topográficas, bem como os resultados do levantamento geofísico de Eletroresistividade. Foram instalados quatro poços onde técnicas de perfilagem, hidroquímica e hidrogeologia foram aplicadas. A caracterização hidroquímica de águas subterrâneas é largamente aplicada para a classificação e identificação da qualidade das águas. É realizada a coleta de água subterrânea em poço previamente instalado. As etapas de coleta, preservação, armazenamento e transporte foram realizadas de acordo com as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Clesceri *et al.* 2005). Os dados obtidos nas análises de laboratório foram processados e gerados diagramas através do programa *Aquachem*, que facilitam a interpretação para classificação da água.

Os ensaios hidrogeológicos são executados para a obtenção do parâmetro **k**. Segundo Silva *et al.* (2007) o coeficiente de proporcionalidade **k**, é chamado de condutividade hidráulica e leva em conta as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma das partículas, arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica). Dois ensaios foram aplicados neste trabalho para a obtenção do parâmetro **k**, *Bail test* e bombeamento. O *Bail test* é um ensaio de permeabilidade, realizado em nível variável (zona saturada) em que é aplicada uma carga ou descarga através da introdução ou remoção súbita de um volume dentro do poço, de forma que o nível d'água (N.A.) seja elevado ou rebaixado instantaneamente (Oliva *et al.* 2005). Este teste é realizado em cada poço separadamente e pode não ser representativo para a caracterização de um meio aquífero como um todo. As constantes hidrodinâmicas que melhor definem o aquífero são obtidas por meio de ensaio de bombeamento (Rebouças *et al.* 1971). O ensaio de bombeamento demanda um conjunto de equipamentos e número de pontos de

monitoramento elevado, desta forma, apresenta-se mais representativo para a caracterização do aquífero como um todo.

Foram analisados criticamente todos os resultados obtidos em cada técnica de Geofísica, Hidrogeologia e Hidroquímica aplicadas. Foi observado que todos os ensaios empregados contribuíram com informações importantes para a caracterização do sistema aquífero da área de pesquisa. As condições e limitações de cada ensaio são apresentadas para a escolha do melhor método ou conjunto deles que se deve aplicar para que atenda ao objetivo de futuras pesquisas de caracterização de aquíferos em outras áreas de estudo.

A área de pesquisa está situada no Município de Nova Lima, nas dependências da empresa Georadar Levantamentos Geofísicos S.A., que em conjunto com a Universidade Federal de Minas Gerais, possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1 – LOCALIZAÇÃO

O município de Nova Lima localiza-se próximo ao município de Belo Horizonte limitado pelos municípios de Raposos e Rio Acima. A área de estudo está localizada dentro dos limites da empresa Georadar, com endereço Rua Ludovico Barbosa, número 60, a 6 Km do centro do Município de Nova Lima nos limites de seu distrito industrial (Figura 1.1).

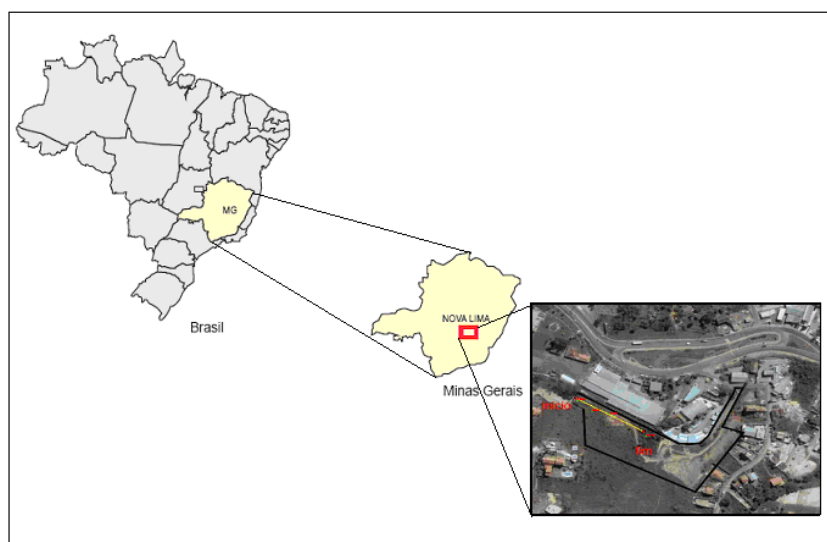


Figura 1.1: Localização da área de Pesquisa, nas dependências da empresa Georadar, Município de Nova Lima (MG).

1.2 – OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivos: Estudar a condição do aquífero situado em uma área de 17.000m² dentro das dependências da empresa Georadar no município de Nova Lima. Aplicar métodos geofísicos, hidroquímicos e hidrogeológicos para a caracterização do aquífero da área de pesquisa. Caracterizar parâmetros hidrogeológicos e hidroquímicos das águas subterrâneas da área de pesquisa e compará-los com resultados obtidos em outras pesquisas realizadas na região de Nova Lima.

1.3 – JUSTIFICATIVA

A caracterização dos meios aquíferos para sua utilização sustentável e o monitoramento de áreas impactadas é cada vez mais importante para a preservação do meio ambiente. Dentro deste contexto torna-se de extrema importância o conhecimento de metodologia que aplicadas representem as características dos meios aquíferos.

Os aquíferos representam uma porção manancial de água de extrema importância para suprir as necessidades de abastecimento público de água potável, principalmente em regiões onde, de alguma forma, a água superficial não consegue atender as demandas de consumo. Como a localização dos aquíferos é em sub superfície, torna-se oneroso o tratamento de águas subterrâneas por dificuldades de captação e devido a seu grande volume.

Ao caracterizar um regime de fluxo subterrâneo, obtém-se um modelo representativo da direção e velocidade de fluxo. Estas variáveis são de extrema importância na caracterização do meio aquífero quanto à identificação das dimensões de uma possível pluma de contaminação, bem como, a vazão ideal de exploração.

Dentre os parâmetros de interesse para a caracterização do meio aquífero estão a permeabilidade, direção de fluxo e composição hidroquímica da água. Técnicas para obtenção destes parâmetros são analisadas nesta dissertação identificando-se as metodologias que melhor reflitam as condições dos meios aquíferos. Desta forma justifica-se a aplicação deste estudo como auxílio para futuras pesquisas de aquíferos em diferentes áreas de pesquisa.

CAPÍTULO 2

2- GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Muitos trabalhos de caráter geológico e hidrogeológico foram desenvolvidos na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. A partir da análise deste contexto obtém-se as relações geológicas e hidrogeológicas existentes de cunho regional e local que caracterizam a área de estudo.

2.1 – ASPECTOS LITOESTRATIGRÁFICOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na área meridional do Cráton São Francisco, sendo este uma unidade geotectônica neoproterozóica composta por rochas arqueanas e paleoproterozóicas pouco afetadas pelo evento tectonothermal Brasileiro, ocorrido entre 630 a 490 Ma (Alkmim & Marshak 1998).

Na região do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2.1) são encontradas, basicamente, três grandes assembléias de rochas:

- 1) complexos metamórficos de rochas cristalinas arqueanas;
- 2) seqüências do tipo *greenstone belts* arqueanas (Supergrupo Rio das Velhas e faixas correlatas);
- 3) seqüências metassedimentares paleoproterozóicas e mesoproterozóicas geradas a partir de ambientes sedimentares plataformais (Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e Supergrupo Espinhaço).

São encontradas ainda, rochas básicas e metabásicas intrusivas, com idades que remontam ao Proterozóico Médio e que cortam descontinuamente as unidades acima. Ocorrem também coberturas sedimentares instaladas em bacias interiores terciárias, de modo restrito, em diferentes áreas do Quadrilátero Ferrífero, estando assentadas, discordantemente, sobre diferentes litotipos do Supergrupo Minas (Alkmim & Marshak 1998).

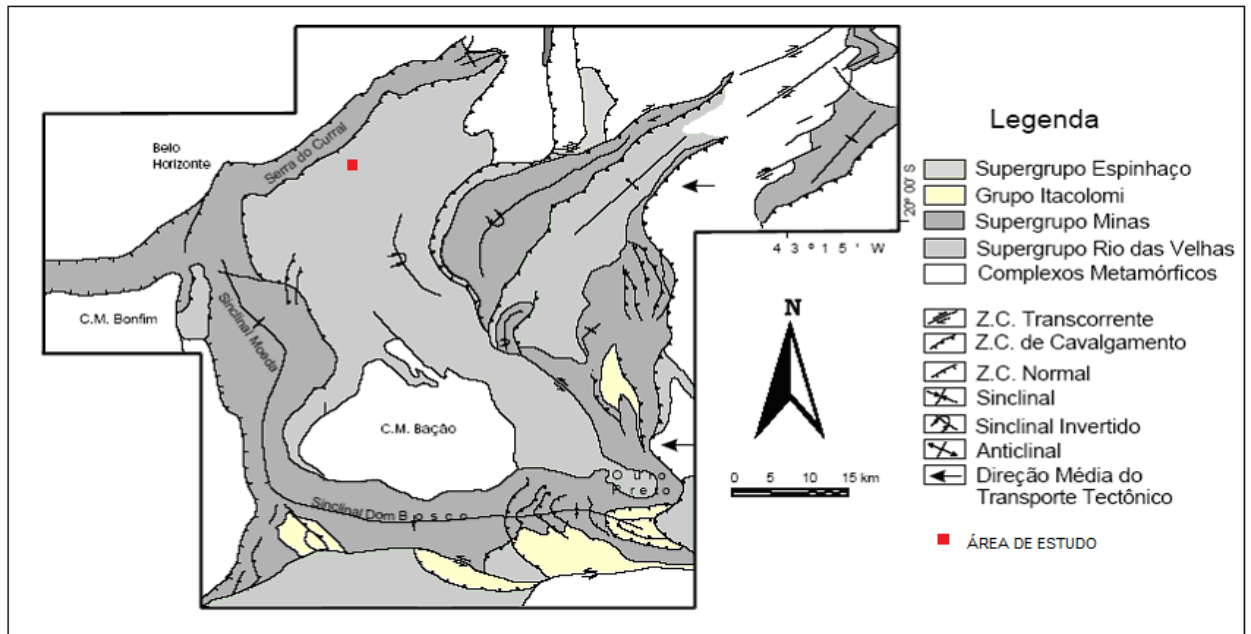


Figura 2.1: Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, modificado de Alkmim & Marshak (1998).

O metamorfismo que atingiu o conjunto formado pelas rochas supracrustais (seqüências do tipo *greenstone belts* e coberturas metassedimentares plataformais) encontra-se, na maioria das vezes, no domínio da fácies xisto verde, podendo atingir a fácies anfibolito baixo junto às bordas leste e sudeste do Quadrilátero Ferrífero. A Figura 2.2 mostra a coluna estratigráfica proposta para a região. A seguir as diferentes unidades são descritas de forma individualizada.

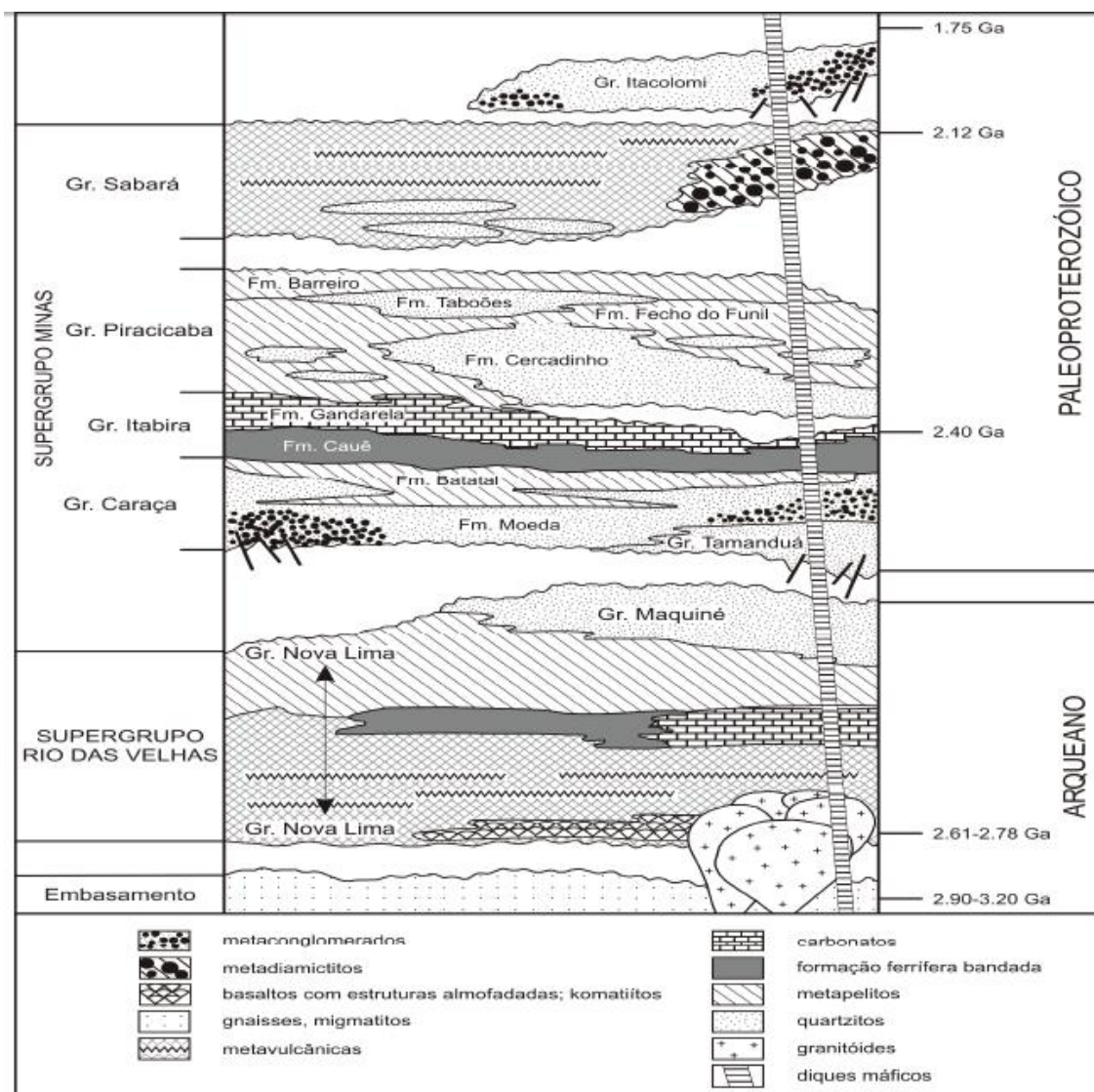


Figura 2.2 – Coluna estratigráfica para o Quadrilátero Ferrífero e adjacências. A parte direita da coluna representa as relações observadas no setor ocidental do Quadrilátero Ferrífero, e a parte esquerda, as relações do setor oriental (Alkmim & Marshak 1998).

2.1.1 Complexos de Rochas Cristalinas Arqueanas

Os complexos de rochas cristalinas arqueanas são constituídos por uma grande diversidade petrográfica, predominantemente relacionadas à classe das rochas metamórficas e subordinadamente à classe das rochas ígneas (Carneiro *et al.* 1995). As estruturas dômicas destes terrenos ocorrem tanto periféricamente quanto no interior do Quadrilátero Ferrífero, servindo de embasamento arqueano para a região. Formalmente são indivisos, porém, informalmente recebem adjetivações geográficas: Complexo Caeté, Bonfim, Bação, Belo Horizonte e Congonhas. Constitui por ortognáisses de composição trondjemítica, estando polideformados, migmatizados ou não. Apresentam algumas intrusões de granitóides na

forma de veios ou corpos circunscritos, anfibolitos, pegmatitos e corpos intrusivos máficos a ultramáficos (Carneiro *et al.* 1995).

Estes complexos metamórficos representam a crosta siálica do Quadrilátero Ferrífero e são caracterizados por uma evolução tectônica de repetidos ciclos de crescimento crustal, cujo início remonta ao Arqueano Médio (Carneiro *et al.* 1995). O acervo de datações U-Pb existente nestes complexos mostra um longo período evolutivo compreendido entre 3200 e 2600 Ma. (Renger *et. al.* 1994).

2.1.2 Seqüências do Tipo *Greenstone Belts*

As seqüências arqueanas do tipo *greenstone belts*, denominadas Supergrupo Rio das Velhas, são representadas pelos Grupos Nova Lima e Maquiné (Carneiro *et al.* 1995). O Grupo Nova Lima, onde está inserida a área de estudo, é constituído por três unidades:

- 1) unidade metavulcânica composta por rochas ultramáficas, metabasaltos, metatufos, komatiitos, esteatitos e formações ferríferas do tipo algoma;
- 2) unidade metassedimentar química formada por xistos carbonáticos, formação ferrífera bandada do tipo algoma e filitos grafitosos;
- 3) unidade metassedimentar clástica formada por quartzitos imaturos e metaconglomerados.

O Grupo Maquiné representa a unidade de topo do Supergrupo Rio das Velhas; trata-se de uma unidade clástica com até 2000 metros de espessura, com ocorrência restrita à porção centro leste do Quadrilátero Ferrífero. É constituído de quartzitos e conglomerados, subordinadamente filitos e grauvas. O contato com o sotoposto Grupo Nova Lima varia de gradacional a discordante, ou, localmente, por falhamentos.

2.1.3 Sequências Metassedimentares

1) Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas sobrepõe-se, geralmente em contato tectônico, às unidades de rochas dos complexos metamórficos e do Supergrupo Rio das Velhas, principalmente sobre estas últimas. Trata-se de um espesso pacote metassedimentar que inclui formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior e abundante material clástico (Carneiro *et al.* 1995). A coluna litoestratigráfica do Supergrupo Minas é dividida em quatro unidades: i) unidade clástica basal (Grupo Caraça), ii) unidade química intermediária (Grupo Itabira), iii) unidade clástica de topo (Grupo Piracicaba) e o iv) Grupo Sabará, que era classificado como formação de topo do Grupo Piracicaba, tendo sido elevado por Noce (1995) à categoria de Grupo do Supergrupo Minas. A idade máxima para o início destas deposições supracrustais é estimada em cerca de 2650 Ma. O encerramento da bacia sedimentar Minas foi datado em aproximadamente 2100 Ma., com a deposição dos Grupos Sabará e Itacolomi, respectivamente representantes das fácies *flysh* e molassa na região (Renger *et al.* 1994).

i) O Grupo Caraça apresenta, na base, a Formação Moeda, a qual é constituída essencialmente por quartzitos com intercalações de filitos e níveis conglomeráticos geralmente na posição basal, típicos de um ambiente fluvial e marinho transgressivo (Carneiro *et al.* 1995). Renger *et al.* (1994) propõem uma idade entre 2590 e 2560 Ma. para a deposição destes quartzitos. A presença de embasamento elevado, assim como as profundas variações de espessuras e mudanças de fácies, refletem a natureza segmentada da bacia Minas durante a deposição da Formação Moeda (Noce 1995). Através do contato transacional deposita-se a Formação Batatal, onde predominam filitos sericíticos, por vezes carbonosos e ferruginosos, característicos de um ambiente marinho plataformar.

ii) O Grupo Itabira constitui-se numa sequência de metassedimentos químicos iniciada pela Formação Cauê. Esta, por sua vez, é composta de formações ferríferas do tipo Lago Superior (itabiritos), quartzosos ou dolomíticos, mais raramente anfibolíticos, abrigando corpos lenticulares de minério de ferro rico, havendo ainda a presença de filitos ferruginosos e dolomitos. A espessura destas formações ferríferas é variável, podendo atingir 300 a 500 metros nos flancos do Sinclinal Moeda, acima de 1000 metros na região oeste do sinclinal Gandarela e 200 a 400 metros em regiões não deformadas. No topo, a Formação Gandarela é representada por mármore dolomíticos, em parte estromatolíticos, e, subordinadamente,

itabiritos e filitos. Estas duas unidades litoestratigráficas são interpretadas como depositadas em um ambiente marinho de plataforma estável.

iii) O Grupo Piracicaba caracteriza um novo período de instabilidade tectônica na bacia Minas. Este Grupo tem a Formação Cercadinho como unidade basal. Trata-se de uma alternância de quartzitos e filitos, comumente ferruginosos e com presença de dolomitos subordinados. Estratigraficamente acima se posiciona a Formação Fecho do Funil, constituída por filitos, filitos dolomíticos e lentes de dolomito. Os ortoquartzitos de granulometria fina da Formação Taboões e os filitos e filitos grafitosos da Formação Barreiro são de ocorrência restrita, e formam, respectivamente, as rochas de topo do Grupo Piracicaba.

iv) O Grupo Sabará é constituído por clorita xistos e filitos, metagrauvacas, metatufos, metaconglomerados, quartzitos e raras formações ferríferas. Possui espessura máxima de 3.500 m, enquanto as demais unidades do Supergrupo Minas, juntas, atingem 3.000m. Este Grupo Sabará era considerado como unidade superior do Grupo Piracicaba. Porém, a espessura elevada e a variação litológica justificam sua elevação a este Grupo. Trata-se de uma deposição sedimentar do tipo *flysh*, correlacionada ao Evento Transamazônico (Noce 1995), e que denota o final da Bacia Minas.

2) Grupo Itacolomi

As rochas do Grupo Itacolomi foram desmembradas da então Série Minas por Guimarães (1931) *in* Carneiro *et al.* (1995), com base na existência de uma discordância angular entre as duas unidades. São compostas por quartzo xisto, quartzito de granulometria grossa, quartzito ferruginoso com estratificações cruzadas, metaconglomerados e *grit*. Os conglomerados da base apresentam seixos derivados de rochas do Supergrupo Minas e dos terrenos granito gnáissicos. Sua distribuição é restrita às porções sul e sudeste do Quadrilátero Ferrífero.

Os sedimentos do Grupo Itacolomi caracterizam ambientes deposicionais fluviais e lacustres, inferidos como de natureza molássica segundo bacias restritas, cujas subsidências tiveram início a partir da sedimentação dos litotipos do Grupo Sabará (Carneiro *et al.* 1995).

3) Supergrupo Espinhaço

O pacote quartzítico da Serra das Cambotas representa o Supergrupo Espinhaço naquela região. Localiza-se a nordeste do Quadrilátero Ferrífero onde originalmente foram

considerados como pertencentes ao Grupo Tamanduá. A região da Serra das Cambotas é formada por um pacote de rochas distintas, tectonicamente justapostas.

4) Diques de rochas máficas

Apresentam-se como enxames de diques máficos cortando, em geral, os terrenos granito gnáissicos além das unidades supra crustais paleo e mesoproterozóicas. Os diques incluem desde tipos metamorfisados na fácies anfibolito até aqueles com textura ígnea preservada (Noce 1995).

5) Coberturas cenozóicas

Depósitos e coberturas sedimentares de provável idade cenozóica ocorrem esporadicamente em todas as partes do Quadrilátero Ferrífero (Pomerene 1964). Estes materiais são formados basicamente por espessas crostas de canga, em geral associadas à Formação Cauê, e por sedimentos de provável idade terciária, cujas principais áreas de ocorrência são as bacias do Fonseca (extremo leste do Quadrilátero Ferrífero) e do Gandarela, e ainda a calha do Sinclinal da Moeda.

2.2 – GEOMORFOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A intensa variação das condições lito-estruturais dentro do Quadrilátero Ferrífero resultou na formação de vários níveis topográficos localizados entre as cotas aproximadas de 800 e 2100 metros. Estes níveis foram individualizados através de medianas e interpretados como remanescentes de várias superfícies de aplainamentos correlacionáveis a inúmeros períodos de dissecação (Barbosa 1980).

Levando-se em conta que a datação de formas de relevo deve considerar uma combinação de vários caracteres geomorfológicos, mais do que umas poucas características, tais como a determinação de altitudes médias de várias elevações e/ou a presença ou não de crostas lateríticas, Varajão (1991) lança dúvida sobre a existência de testemunhos de um número grande de períodos de dissecação. Assim, por exemplo, uma superfície de aplainamento constituída por rochas quartzíticas e outra por rochas xistosas, ainda que em posições topográficas distintas (sendo a primeira mais elevada), podem ser representantes de um único período de dissecação e seus respectivos posicionamentos justificados pela maior ou menor resistência dos processos erosivos. Neste contexto, a geomorfologia da região apresenta um

forte controle lito-estrutural e fortes contrastes de resistência litológica, o que reflete num modelado de dissecção acentuada com importantes variações altitudinais e ocorrências de serras e cristas cortadas por vales epigênicos (Magalhães Jr. & Saadi 1994).

Em termos temporais pode-se afirmar que grande parte da Plataforma Brasileira, inclusive o Quadrilátero Ferrífero, foi afetada por um extenso nível de aplainamento durante o Terciário, sendo o mesmo correlacionável à Superfície Sul Americana (Magalhães Jr. & Saadi 1994). Posteriormente houve um rebaixamento do nível de base, o que desencadeou a dissecção desta superfície, caracterizando assim um desenvolvimento geomorfológico policíclico para a Plataforma Brasileira.

De modo descritivo o Quadrilátero Ferrífero forma um conjunto de relevos altos onde, em geral, as grandes estruturas estão agora em posição geomorfológica invertida (Barbosa 1980), ou seja, os domos de complexos de rochas cristalinas arqueanas e os anticlinais foram desmontados, estando os sinclinais em posições topograficamente elevadas.

Em intrínseca relação com a evolução geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero estão às coberturas cenozóicas, os solos de cobertura, os depósitos aluviais, os corpos de Hematita instalados na Formação Cauê a sul de Belo Horizonte e os processos de carstificação ocorridos nos mármore dolomíticos da Formação Gandarela e quartzitos do Grupo Itacolomi. As coberturas cenozóicas são representadas por depósitos de bacias intramontanhas localizadas nas calhas dos grandes sinclinais, a exemplo do que ocorre no denominado Platô da Moeda (Pomerene 1964), e por coberturas de canga, em geral associadas às rochas da Formação Cauê.

Segundo Barbosa (1980) os solos de coberturas são freqüentemente rasos, ferruginosos e fortemente pedregosos. Uma exceção deve ser feita aos solos residuais associados à Formação Gandarela e às rochas de origem pelítica que possuem espessuras da ordem de 100 metros em determinados locais.

Os depósitos de terraços aluviais como, por exemplo, ocorrem no Vale do Rio das Velhas na região de Belo Horizonte, comumente apresentam morfogêneses controladas por falhamentos que resultam na presença de terraços escalonados relacionados, provavelmente, à dissecção da Superfície Sul Americana (Magalhães Jr. & Saadi, 1994).

Os processos de carstificação dos mármore dolomíticos da Formação Gandarela são evidenciados por vários aspectos incluindo: 1) formação de dolinas, em geral colmatadas com material argiloso; 2) pela formação de cavernas de pequeno a médio porte, sendo a mais expressiva a Gruta da Igrejinha, localizada no Sinclinal Dom Bosco próximo a localidade denominada Hargreaves; e, 3) pela surgência cárstica dos Fechos, junto ao córrego homônimo. O Grupo Itacolomi, quando representado por quartzitos aflorantes na serra homônima, apresenta feições cársticas (Ferreira Filho & Lazarim 1993), evidenciadas pela presença de dolinas, cavernas de pequeno porte, sumidouros e formação de espeleotemas de opala e calcedônia (Lima 1987).

2.3 – HIDROGEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Muitos estudos de caráter hidrogeológico vem sendo desenvolvidos no Quadrilátero Ferrífero a exemplo de Mourão (2007) e Rebouças (1994). O principal motivo é o aumento na demanda levando-se em conta o abastecimento público de água e o rebaixamento do nível d'água subterrânea em áreas de mineração, especialmente de minério de ferro. Além disso, certas surgências de água subterrânea são utilizadas como fontes de águas minerais, a exemplo do que ocorre na fonte de Água Quente, localizada no interior do Sinclinal da Moeda, e nas fontes Ingá e Igarapé, localizadas no extremo sudoeste da Serra do Curral.

2.3.1 Histórico

Tem-se conhecimento de estudos hidrogeológicos no Quadrilátero Ferrífero desde a década de 1980, quando algumas minerações de ferro da região atingiram o nível d'água subterrânea, o que motivou uma intensificação das investigações de caráter hidrogeológico nos domínios da Formação Cauê visando o rebaixamento dos níveis d'água em minas a céu aberto. Os resultados destes estudos indicaram valores de condutividade hidráulica entre 7,5 e 10,0 m/dia para hematitas da Mina da Mutuca, localizada junto à falha homônima.

Na década de 90 novos e importantes estudos foram realizados nesta região, voltados tanto para o rebaixamento de minas a céu aberto, como para outros fins, tais como a definição de mananciais de águas subterrâneas para abastecimento público e hidrogeologia regional. Neste último contexto é digno de destaque o trabalho de Mourão (2007), onde é apresentada uma caracterização hidrogeológica detalhada do aquífero Cauê e demais unidades aquíferas do Quadrilátero Ferrífero.

2.3.2 Contexto Hidrogeológico do Estado de Minas Gerais e para o Quadrilátero Ferrífero

Segundo Rebouças (1994) um sistema aquífero é definido como um conjunto formado por uma ou mais unidades litoestratigráficas que apresentam continuidade hidráulica, características hidrodinâmicas, condições de recarga, circulação e descarga, e de qualidade das águas relativamente semelhantes.

Utilizando uma definição similar a esta, Souza (1995) identifica no Estado de Minas Gerais a presença de dez sistemas aquíferos formados, cada qual, por um conjunto de unidades aquíferas. Estas unidades por sua vez são definidas como sendo a ocorrência de um ou mais tipos predominantes e bem definidos de rochas portadoras de água associadas a uma unidade geológica específica.

De acordo com esta classificação, os sistemas aquíferos identificados em Minas Gerais são os seguintes:

1. Sistema Aluvial,
2. Sistema de Cobertura Detrítica,

3. Sistema Arenítico,
4. Sistema Carbonático,
5. Sistema Pelítico Carbonático,
6. Sistema Basáltico,
7. Sistema Pelítico,
8. Sistema Quartzítico,
9. Sistema Xistoso,
10. Sistema Gnáissico Granítico.

Conforme esta classificação, a região do Quadrilátero Ferrífero está inserida nos domínios dos Sistemas Xistoso, Quartzítico e Gnáissico Granítico. A área de pesquisa está localizada no Quadrilátero Ferrífero, assim serão detalhados os sistemas: xistoso, quartzítico e gnáissico-granítico.

O Sistema Xistoso, principal sistema em área existente no Quadrilátero Ferrífero, segundo esta classificação, possui armazenamentos em meio fissurado e agrega unidades aquíferas de rochas predominantemente xistosas. No Quadrilátero Ferrífero este sistema engloba as seguintes unidades litológicas informais coincidentes com zonas aquíferas:

- 1) filitos, filitos intercalados em quartzitos, xistos e xistos intercalados em quartzitos, todos do Supergrupo Minas;
- 2) filitos e xistos do Supergrupo Rio das Velhas.

O Sistema Quartzítico inclui armazenamentos em rochas quartzíticas, sendo, na região do Quadrilátero Ferrífero, representado pelos quartzitos do Supergrupo Minas e do Supergrupo Rio das Velhas Grupo Maquiné (Alkmim & Marshak 1998).

O Sistema Gnáissico Granítico é representado por zonas aquíferas instaladas nos domínios dos complexos de rochas metamórficas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero, como

os complexos Belo Horizonte e Bação. Este Sistema Gnáissico Granítico apresenta características de meio poroso fissural.

Apesar da grande abrangência da classificação proposta por Souza (1995) algumas observações foram feitas por Mourão (2007) para sua utilização no Quadrilátero Ferrífero, são elas:

1) Os dolomitos e itabiritos do Grupo Itabira não estão incluídos nesta classificação devido à pequena escala de ocorrência desta unidade estratigráfica. Porém são de grande importância na hidrogeologia do Quadrilátero Ferrífero. Estes dois materiais apresentam permeabilidades secundárias, o primeiro com caráter cárstico fissural e o segundo com caráter intersticial. Ambos estão condicionados ao espesso manto de intemperismo que afeta os litotipos da região.

2) Os xistos e filitos, quando pertencentes a um sistema aquífero de rochas armazenadoras, apresentam pequenos volumes de água armazenada com caráter local. Este tipo de rocha tem suas ocorrências mais expressivas na forma de aquítarde, como descrito por Alkmim (1996) e Rúbio (1996) acerca dos filitos da Formação Batatal presentes na porção norte do Platô da Moeda.

2.3.3 Caracterização Hidroestratigráficas e Hidroquímica do Aquífero em Xistos no Quadrilátero Ferrífero

Mourão (2007) apresenta a localização das unidades hidrogeológicas principais do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2.3). A área de estudo desta dissertação está localizada dentro dos limites de aquíferos em xistos do sistema aquífero Nova Lima. Mourão (2007) caracteriza esta formação contendo rochas xistosas, sendo xistos metassedimentares e metavulcânicos, além de níveis metaquartzíticos, intercalações de metachert e corpos de formação ferrífera; estes últimos de maior transmissividade dentre as demais litologias.

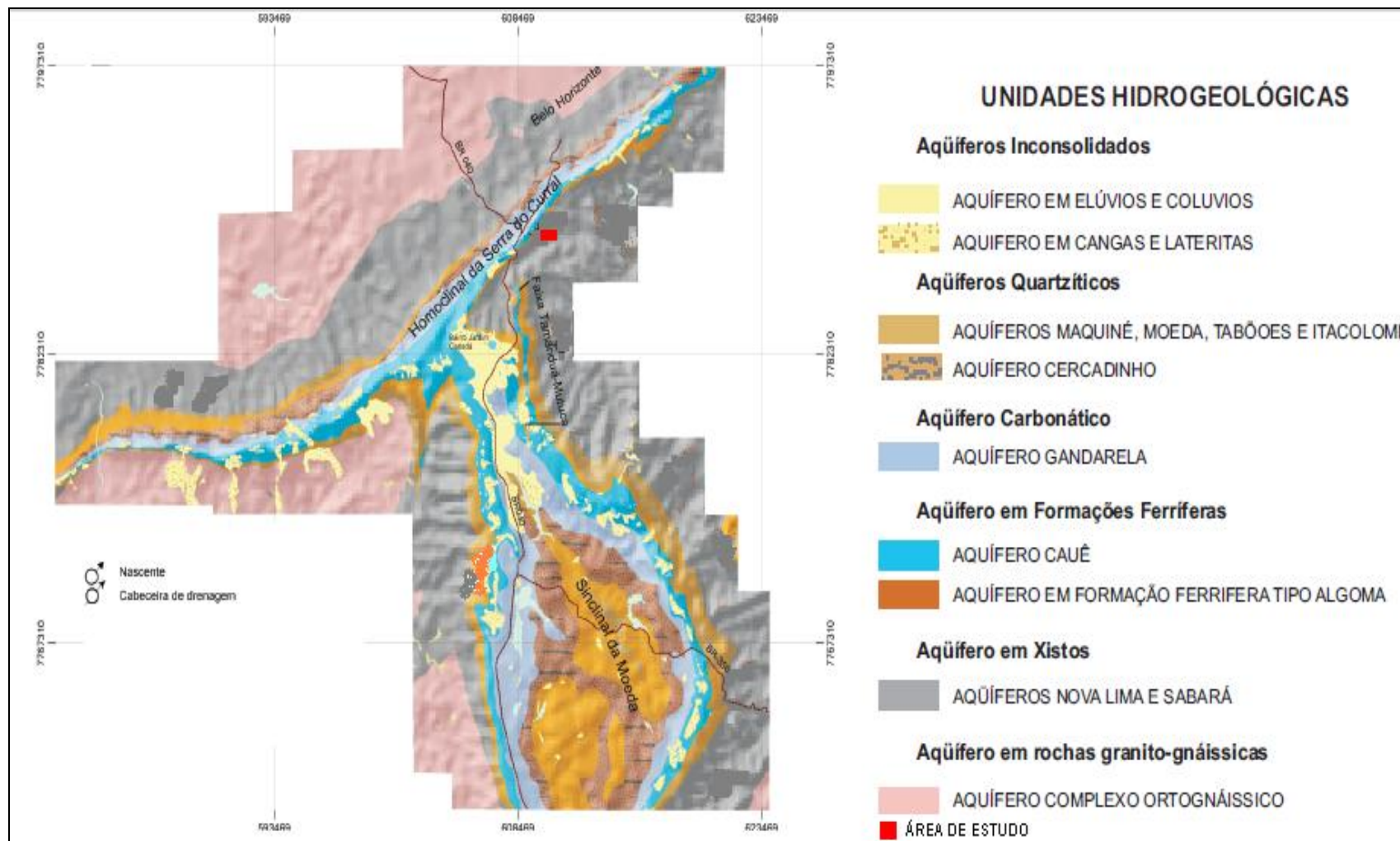


Figura 2.3: Unidades Hidrogeológicas do Quadrilátero Ferrífero, com indicação da localização da área de pesquisa. Modificado de Mourão (2007).

A composição química das águas do aquífero xistoso é apresentada por Mourão (2007) na Figura 2.4, onde se pode observar pelos diagramas de Piper e Schoeller uma grande homogeneidade na composição química das amostras de águas coletadas com algumas diferenças referentes a concentrações de cálcio e magnésio. Na Figura 2.5 Mourão (2007) apresenta um diagrama onde se observa que as amostras encontram-se alinhadas segundo uma reta que passa pela origem indicando fortes correlações entre as concentrações de cálcio, magnésio e bicarbonato. A partir destas correlações foram definidos três grupos composicionais.

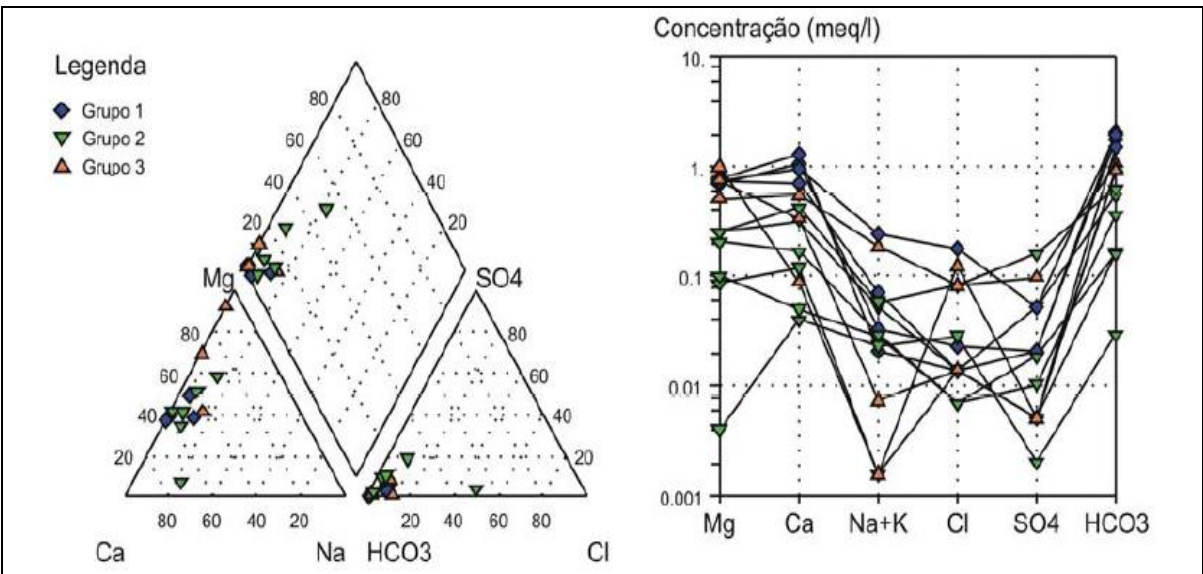


Figura 2.4: Diagrama de Piper e Schoeller para amostras coletadas nos domínios do aquífero em xistos unidade hidrogeológica do Quadrilátero Ferrífero (Mourão 2007).

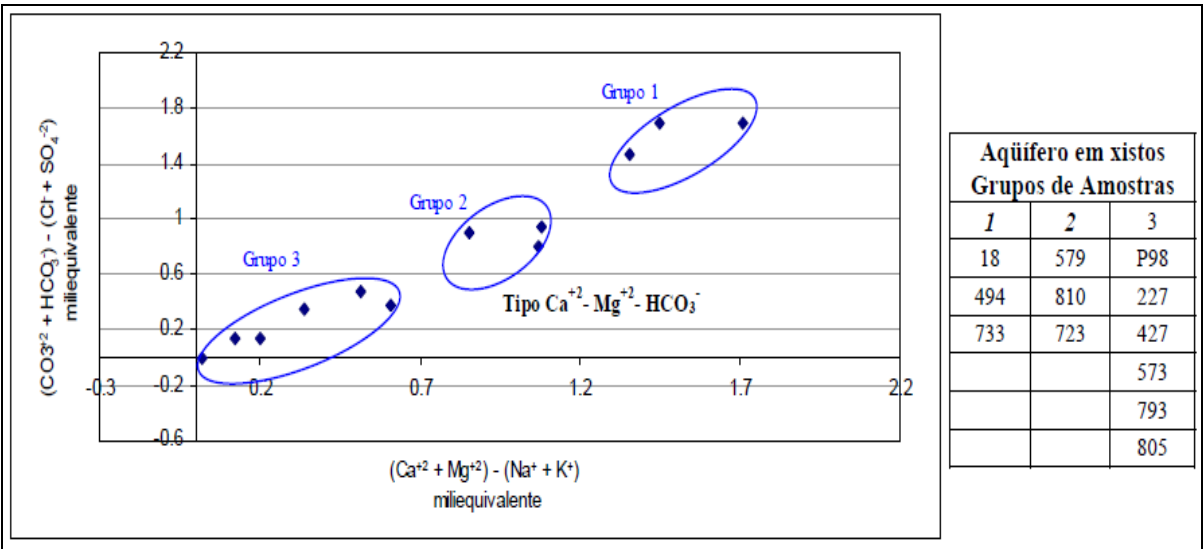


Figura 2.5: Diagrama adaptado de Chadda 1999 *in* Mourão (2007) e separação das amostras dos aquíferos em xistos em grupos com características químicas semelhantes. Os Grupos 1 e 2 abrangem águas altas e medianamente mineralizadas, com pH e condutividade elétrica médios, respectivamente, de 7,47 e 7,62 e de 167,0 e 97,1 $\mu\text{S/cm}$.

Provavelmente associam-se às rochas carbonatadas, de ocorrência comum no Grupo Nova Lima. O Grupo 3 é formado com águas de baixos valores em sólidos dissolvidos e caracterizado por pH ácido (média de 6,06) e condutividade elétrica média de 31,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mourão 2007).

Cloretos e sulfatos ocorrem em baixas concentrações (médias de 2,6 a 2,9 mg/L), mas localmente podem atingir valores acima de 6,0 mg/L. O ferro está quase sempre presente sendo que, em mais de 50% das amostras em que foi determinado, encontra-se acima do limite de potabilidade, conforme a Portaria 518 do Ministério da Saúde (média 1,06 e mediana de 0,2 mg/L). A correlação encontrada para íons cálcio e fósforo podem ser um indicativo da presença de fosfato de cálcio nas rochas como, por exemplo, apatitas (Mourão 2007).

2.3.4 Propriedades Físicas e Hidráulicas das Rochas Constituintes dos Aquíferos do Quadrilátero Ferrífero.

Mourão (2007) apresenta o resultado de ensaios laboratoriais para a determinação de permeabilidade intrínseca, porosidade e densidade de diversas litologias dentro do aquífero Cauê, e demais unidades aquíferas do Quadrilátero Ferrífero. Para tal foram coletadas amostras representativas em duas unidades litológicas diferentes; minérios de ferro e itabiritos. Os resultados obtidos permitiram definir intervalos característicos de valores de propriedades físicas para litotipos identificados que devem ser entendidos como valores mínimos, já que amostras friáveis não puderam ser ensaiadas, e de caráter indicativo. A Tabela 2.1 apresenta os valores de condutividade hidráulica nas diferentes unidades litológicas observadas por Mourão (2007).

Tabela 2.1: Valores de condutividade hidráulica observados por Mourão (2007) para as diferentes unidades litológicas presentes no aquífero Cauê e demais unidades aquíferas do Quadrilátero Ferrífero.

Unidade Litológica	Condutividade Hidráulica (m/s)
Hematitas	Valores de $3,0 \times 10^{-6}$ a $2,5 \times 10^{-5}$ m/s
Itabiritos	Valores de $2,0 \times 10^{-9}$ m/s a $1,8 \times 10^{-5}$ m/s, sendo para Itabiritos frescos não fraturados valores máximos de $6,2 \times 10^{-10}$ m/s e para Itabiritos argilosos valores baixos em média $7,0 \times 10^{-10}$ m/s.
Filitos	Valores de $6,9 \times 10^{-6}$ m/s para decompostos a $8,7 \times 10^{-8}$ m/s para semidecompostos
Cherts compactos e fraturados	Valores em média de $1,15 \times 10^{-6}$ m/s
Rochas básicas, independente do grau de intemperismo.	Valores baixos comparados a aquitardes com média de $2,7 \times 10^{-10}$ m/s
Quartzito Moeda semidecomposto e fraturado	Valores relativamente reduzidos da ordem de $3,3 \times 10^{-9}$ m/s

CAPÍTULO 3

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS CONCEITOS DE GEOFÍSICA, HIDROGEOLOGIA E HIDROQUÍMICA

Esta revisão bibliográfica pretende apresentar de forma sucinta os conceitos e metodologias aplicadas nesta pesquisa utilizados em trabalhos anteriormente para a caracterização de aquíferos. Desta forma pretende-se apresentar um resumo conceitual sobre métodos geofísicos (eletroresistividade e perfilagem de poços), métodos de sondagem para perfuração de poços e noções de hidrogeologia e hidroquímica.

3.1 – MÉTODOS GEOFÍSICOS

A utilização de métodos diretos (sondagem, ensaios *in loco* e coleta de amostra) em estudos geológicos e ambientais de subsuperfície é um procedimento de elevado custo financeiro, pois exige a instalação de poços de monitoramento para análises físico-químicas e ensaios físicos no caso de estudos de água subterrânea. Desta forma, os métodos indiretos (Geofísica), estão sendo cada vez mais utilizados nas geociências, especificamente em estudos ambientais. Entre inúmeras aplicações de ferramentas geofísicas em estudos ambientais, destaca-se a identificação e caracterização litológica, determinação do nível d'água e mapeamento da direção do fluxo subterrâneo (Silva *et al.* 2007).

Diversos autores, a saber, Soares (2007) e Lacerda *et al.* (2007), apresentam os métodos Geofísicos elétricos e Eletromagnéticos, como os mais indicados para estudos de caracterização rasa por serem métodos de baixo custo e fácil aquisição. Almeida *et al* (2007) apresentam a técnica de perfilagem para a caracterização de furos não revestidos com bom resultado para identificação de diferentes litologias e do diâmetro do poço.

Neste trabalho foram aplicados os métodos de Eletroresistividade e Perfilagem devido à disponibilidade do equipamento. Inicialmente foi aplicada a Eletroresistividade e após a análise dos resultados obtidos neste levantamento, foram definidos os locais de instalação dos poços. Após a perfuração dos poços foi executada a perfilagem ao longo destes.

3.1.1 Método Geofísico de Eletroresistividade

O método de eletroresistividade requer uma corrente elétrica que seja aplicada no solo por meio de eletrodos fixados à superfície do terreno. A diferença de potencial que se forma no solo é medida utilizando-se um segundo par de eletrodos. A resistividade pode ser calculada conhecendo-se a geometria da disposição dos eletrodos, a corrente elétrica aplicada e a voltagem medida (Benson *et al* 1982 in Oliveira 2005). A partir deste potencial medido é possível identificar em subsuperfície as diferentes anomalias que se apresentam com valores de maior ou menor resistividade ou condutividade, e correlacionar estas anomalias às estruturas e condições geológicas locais. A Figura 3.1 ilustra a disposição dos eletrodos na aplicação do método de superfície do terreno (Freitas Filho 2006).

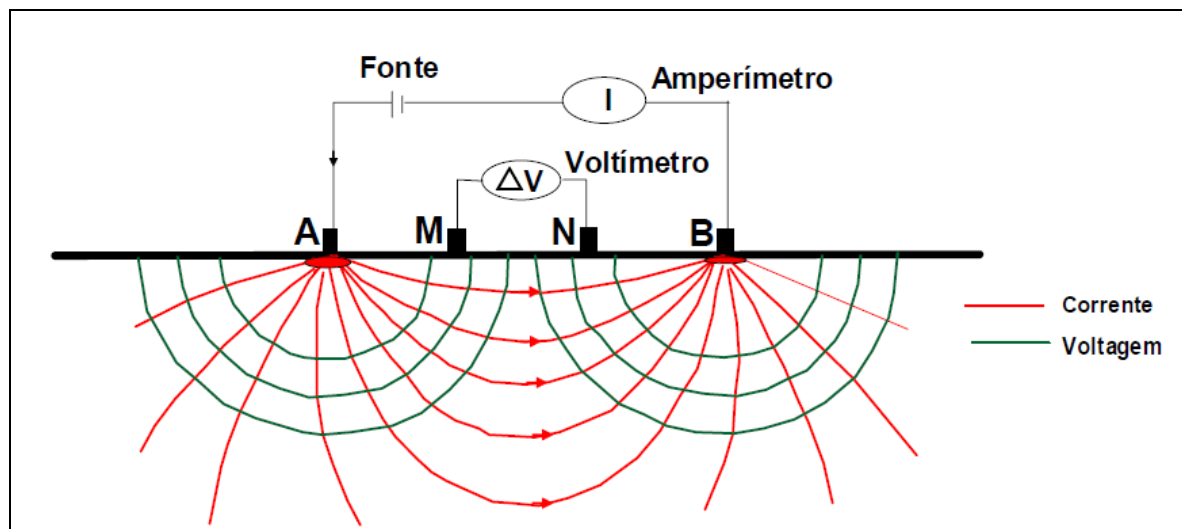


Figura 3.1: Disposição dos eletrodos na superfície do terreno e fluxo de corrente (Freitas Filho 2006).

O método de Eletroresistividade irá apresentar a resistividade aparente e/ou a medida de cargabilidade do meio. A resistividade aparente é dada por Cruz *et al.* (2007):

$$\rho_a = \Delta v k / I \quad \text{sendo,} \quad k = \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot a \quad (1)$$

onde: ρ_a = resistividade aparente da subsuperfície
k = fator geométrico que depende do espaçamento entre os eletrodos
 Δv = diferença de potencial entre os eletrodos
I = corrente injetada pelos eletrodos
n = nível de investigação em profundidade
a = distância entre os eletrodos

As variações de voltagem podem ser medidas no domínio do tempo ou da frequência. No domínio do tempo a corrente elétrica é periodicamente injetada e desligada através do eletrodo AB (Figura 3.1). Após o desligamento da corrente a voltagem medida nos eletrodos MN (Figura 3.1) sofre um caimento. A integral medida através da curva de caimento da voltagem resulta na cargabilidade (M) da equação abaixo (Costa 2007).

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP} dt \quad (2)$$

onde: M= cargabilidade
Vp= voltagem primária
t = tempo
I = corrente injetada pelos eletrodos
n = nível de investigação em profundidade

Os métodos de eletroresistividade envolvem medidas de uma impedância, com subsequente interpretação em termos de propriedades elétricas da subsuperfície, e finalmente da superfície geológica (Ustra 2008).

Os equipamentos utilizados possuem uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e medidores da corrente e voltagem geradas. Neste trabalho foi utilizado o equipamento da marca ABEM, modelo SAS 4.000, que mede a voltagem aplicada e valores da curva de caimento da voltagem, fornecendo dados de resistividade e cargabilidade.

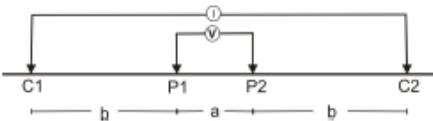
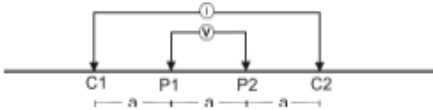
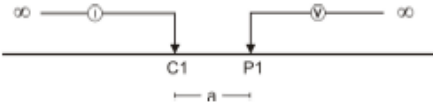
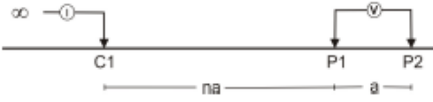
3.1.1.1 Arranjos

Todos os arranjos geométricos usados para obter a resistividade e a cargabilidade aparentes são baseados na equação 1. O fator geométrico **k** será diferente para cada tipo de arranjo. Um resumo dos arranjos mais aplicados é mostrado na Tabela 3.1 (Ustra 2008).

Como pode ser observado na Tabela 3.1 existem vários tipos de arranjo, o arranjo Wenner, técnica de caminhamento elétrico que consiste em deslocar sobre o terreno um quádruplo AMNB (Figura 3.1) fixo realizando leituras em estações regularmente espaçada, foi escolhido para ser utilizado nesta pesquisa devido a atender as condições indicadas por Freitas Filho (2006) e Silva, Dourado *et al.* (2007). Conforme apresentado por Freitas Filho (2006) em locais onde se deseja estudar as variações laterais de resistividade do subsolo, utiliza-se o caminhamento Wenner. Silva *et al.* (2007), relata que o arranjo Wenner é ideal para meio

geológico heterogêneo por caracterizar os contrastes laterais, anomalias de resistividade decorrentes da presença de hidrocarbonetos, água subterrânea e estruturas enterradas. Além deste método apresentar bons resultados para caracterização de variações laterais e da presença de água subterrânea, o mesmo foi escolhido por ser o de mais rápida aquisição de campo, maior produtividade e conseqüentemente menor custo.

Tabela 3.1: Arranjos eletródicos mais utilizados (Ustra 2008).

Arranjo	Posição dos eletrodos	Fator geométrico
Schulumberger		$K = \pi \cdot b \cdot (b + 1) \cdot a$
Wenner		$K = 2 \cdot \pi \cdot a$
Pólo-pólo		$K = 2 \cdot \pi \cdot a$
Pólo-dipolo		$K = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot a$
Dipolo-dipolo		$K = \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot a$

3.1.1.2 Interpretação dos dados coletados

Através dos valores de resistividade (Ohm.m) obtidos pelo método de eletroresistividade pode-se identificar os diferentes tipos litológicos e outras características do aquífero. Oliva *et al.* (2007) identificam o contato entre zona saturada e zona não saturada pela determinação do N.A. (nível d'água do aquífero) através da análise dos valores de resistividade. A Figura 3.2 apresenta um quadro com as variações dos valores de resistividade em matérias conhecidos (Ustra 2008):

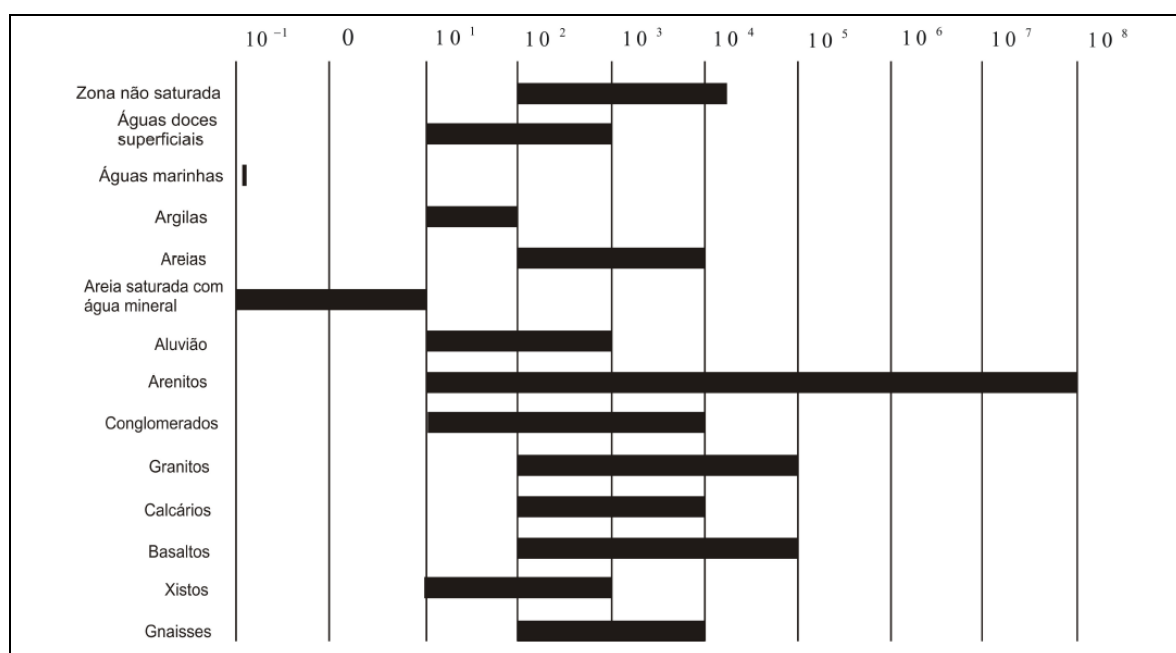


Figura 3.2: Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos (modificado de Elis 1998 in Ustra 2008).

A medida de resistividade elétrica em rochas e minerais pode apresentar valores diferentes dos representados na Figura 3.2 devido a condições geológicas específicas. Exemplos de situações adversas são os valores de resistividade elétrica obtidos em rochas cristalinas (pouco porosa), conforme pode ser observado na Figura 3.2 estes valores serão normalmente altos, no entanto, se esta rocha estiver muito fraturada, a água que circula através das fraturas contendo sais minerais dissolvidos diminuirá bastante a resistividade da rocha. Após a análise do perfil de resistividade obtido pode-se observar diferentes materiais e identificar a zona saturada e insaturada da área de pesquisa.

3.1.2 Método de Perfilagem Geofísica de Poços

O método de perfilagem de poços consiste na realização de um perfil em um poço, vertical ou inclinado, com medições de determinados parâmetros específicos de cada ferramenta. O perfil é traçado por meio de uma sonda que percorre ao longo do poço e registra simultaneamente os parâmetros medidos. Uma mesma sonda poderá medir diferentes parâmetros. Os principais parâmetros obtidos por meio da perfilagem geofísica de poços são: perfis de resistividade, perfis de radiação, perfil ótico e perfil de diâmetro do poço (*caliper*).

Encontramos na literatura diferentes aplicações para o método de perfilagem de poços. Oliveira (2005) aplica a perfilagem para co-estimativas de variáveis geológicas minerais identificando os horizontes de depósitos de carvão em subsuperfície. Almeida *et al.* (2007) aplicam a perfilagem para identificar correlações estratigráficas e estimativas de densidade para a complementação de informações de coleta de testemunhos de sondagem em litologias associadas. Souza (2005) aplica a perfilagem no mapeamento de aquíferos. Porém é como auxílio na pesquisa e monitoramento de poços para extração de petróleo que a perfilagem de poços vem sendo usualmente aplicada, como pode ser observado no trabalho de Leite *et al.* (2007) que encontram bons resultados na caracterização de poços de produção de petróleo a partir da perfilagem geofísica.

3.1.2.1 Perfis de Resistividade

A resistividade de um material homogêneo medida em dadas condições de temperatura e saturação é constante e independe do volume. A resistividade é normalmente medida em ohm x metro e é definida como a resistência elétrica de um material quando uma corrente de 1 ampere é aplicada em 1 metro de comprimento de material de seção de 1 metro quadrado, nas condições normais de temperatura e pressão (Hoffman *et al.* 1990 in Oliveira 2005).

A Tabela 3.2 apresenta os valores de resistividades (Telford *et al.* 1990 in Oliveira 2005). A partir dessa tabela pode-se concluir que com apenas um único parâmetro não é possível identificar o tipo de litologia do aquífero.

Tabela 3.2: Exemplo dos valores de resistividade em alguns minerais ou rochas (Telford *et al.* 1990 in Oliveira 2005).

Mineral / Rocha	Resistividade (variação ou valor médio em ohm.m)
Bauxita	200 - 6000
Água superficial (doce)	10 - 100
Água do mar	0,2
Grafita	$10^4 - 5 \times 10^3$
Granito porfiritico (saturado)	$4,5 \times 10^3$
Diabasio	$20 - 5 \times 10^7$
Basalto	$10 - 1,3 \times 10^7$
Xisto	20×10^4
Gnaisse	3×10^6
Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$
Argilas consolidadas	$20 - 2 \times 10^3$
Argilas inconsolidadas (úmidas)	20
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenito	$1 - 6,4 \times 10^8$
Calcário	50×10^7

Perfis de resistividade apresentam a forma de propagação do fluxo de corrente elétrica emitido pelo eletroresistivímetro nas diferentes camadas em diferentes profundidades. Dois processos controlam o fluxo de corrente: condução eletrolítica e troca de íons. Cada litologia apresenta uma maneira de condução de corrente elétrica diferente. A umidade e porosidade facilitam a condução do fluxo de corrente e reduzem a resistividade. A forma, distribuição dos grãos, cimentação e a matriz também afetam o fluxo de corrente fazendo com que a resistividade aumente. Com o aumento da compactação nas camadas.

Uma corrente é gerada no eletroresistivímetro e é transmitida ao eletrodo de corrente fixado no solo. A corrente passa pelo solo entre os eletrodos, o fluido do poço e a estratigrafia por condução eletrolítica no fluído e por troca de íons em minerais argilosos. A corrente aplicada no eletrodo é mantida constante. A diferença de potencial elétrico gerada entre o eletrodo de corrente e um eletrodo de referência aterrado na área é proporcional à soma das resistências de todos materiais. Desta forma a resistência poderá ser obtida a partir da equação desenvolvida por George Simon Ohm, lei de ohm, 1827.

$$R = E/I \quad (3)$$

onde: E= diferença de potencial em volts
R= resistência
I = corrente em amperês

Um diagrama esquemático da sonda de resistividade pontual, utilizada neste trabalho, é apresentada na Figura 3.3 (Oliveira 2005). Esta sonda é provida de eletrodo de corrente. O tamanho do eletrodo de corrente controla a profundidade de investigação. Se o eletrodo for esférico, o volume efetivo de investigação será aproximadamente cinco vezes o diâmetro do eletrodo (Guyod 1944 *in* Oliveira 2005).

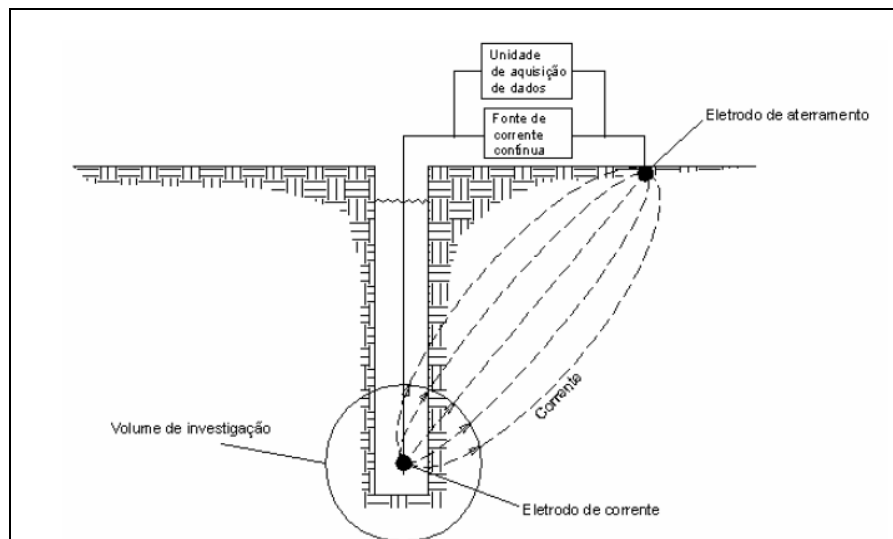


Figura 3.3: Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem resistividade pontual (Oliveira 2005).

Os eletrodos e equipamentos de medição de resistividade devem, sempre, ser imersos em líquido para que a corrente seja transmitida da sonda para a parede do furo. As medidas são interpretadas qualitativamente, ou seja, os valores de resistência permitem estabelecer se uma camada é mais ou menos resistiva que outra (Figura 3.4). São observadas as seguintes características gerais de comportamento para resistividade, conforme Souza (2005):

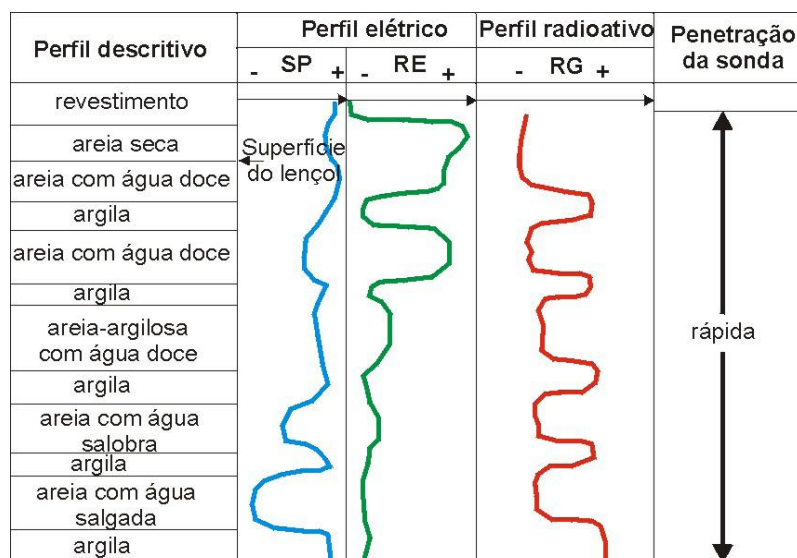


Figura 3.4: Comportamento da curva dos perfis de Resistividade e Radioatividade (Souza 2005)

Resistividade baixa – qualquer aumento na salinidade (devido à composição da lama ou presença de água salgada na formação ou ainda arenitos contendo salmouras) provocará decréscimo na resistência, devido à presença de minerais argilosos que são bons condutores. Caso o poço sofra um alargamento em algum ponto (presença de regiões fraturadas ou desmoronamento de camadas arenosas inconsistentes) a resistência sofrerá também decréscimo. Camadas delgadas prejudicam o fluxo de corrente, dificultando seus reconhecimentos e quantificações.

Resistividade alta – engloba rochas portadoras de água doce, bem como areia/arenito e seixo/conglomerado onde, nestas duas últimas litologias, a presença freqüente do mineral quartzo é a causa para a elevada resistência, pois este mineral não é bom condutor de corrente elétrica.

O raio de investigação do perfil de resistividade está ligado ao grau de salinidade e diâmetro do poço, onde ambos afetam o valor de resistência. O primeiro em virtude da facilidade de passagem do fluxo de corrente frente à presença dos íons e o segundo devido ao volume de fluido que preenche o poço. Portanto, a ausência de linearidade na resposta do perfil de resistividade o torna meramente qualitativo. É utilizado na localização e determinação de espessuras de aquíferos, variações litológicas e correlação entre poços.

O perfil de resistividade e de radiação gama poderá ser interpretado conforme o tipo de rocha e sua relação com a resistividade, como pode ser observado na Figura 3.5.

Parâmetro		Raios gama			Densidade		Sônico		Resistividade ohm.n					
Tipo de rocha		0	API	150	1	g/cm³	3	140	µs/ft	40	0	10	100	1000
Folhelho	Marinho													
	Não marinho													
Carvão	Betuminoso													
	Inferior													
	Linhito													
	Antracito													
Arenito	Poroso													
	Compacto													
Siltito														
Calcáreo	Poroso													
	Compacto													

Figura 3.5: Sumário de respostas de perfilagem geofísica em algumas litologias (Oliveira 2005).

3.1.2.2 Radiação Gama

A radiação gama γ consiste na energia liberada pelo núcleo atômico na forma de onda eletromagnética para sua estabilização após a emissão de uma partícula α ou β . As rochas e solos apresentam elementos radioativos que estão em desintegração. Estes elementos podem ser identificados por meio de perfilagem geofísica a partir de um detector instalado em uma sonda que irá percorrer toda extensão do poço a ser perfilado.

O perfil da radiação gama é amplamente empregado para identificação de litologias (Oliveira 2005). A perfilagem de radiação gama natural pode ser executada em poços preenchidos com líquidos ou vazios e é pouco afetada por irregularidades, fluídos de perfuração ou revestimento do poço. As sondas de perfilagem de emissão natural de raios gama são formadas por um detector de radiação γ natural emitida pela rocha através de leitor Geiger-Mueller ou cintilômetros. A profundidade de investigação está diretamente relacionada à densidade do material perfilado. Com o aumento da densidade diminui a profundidade de investigação (Oliveira 2005).

O sistema de detecção de radiação γ é composto por cintilômetros o qual determina o número de decaimentos por unidade de tempo (CPS – contagens por segundo). Os cintilômetros são cristais de Iodo e de Sódio ativados com pequena porção de Tálho, que, quando ionizados, por partículas, emitem luz visível. A intensidade dessa luz é proporcional a energia de ionização da partícula. A luz é detectada por um tubo multiplicador onde, este produz um pulso com

amplitude proporcional a energia da partícula detectada. Nas sondas empregadas, o tubo fotomultiplicador conta com pulsos sem distinção de faixa de energia que realizam a contagem total dos decaimentos (Oliveira 2005).

De maneira a indicar quais isótopos ocorrem naturalmente, sendo responsáveis pela atividade de raios gama da formação, é importante comparar a meia vida com a idade estimada da Terra em cerca de 4×10^9 anos. Há somente três isótopos com meia vida nesta magnitude: ^{40}K com $1,3 \times 10^9$ anos, ^{232}Th com $1,4 \times 10^{10}$ anos e ^{238}U com $4,4 \times 10^9$ anos. O decaimento do ^{40}K é acompanhado pela emissão de um raio gama simples com energia de 1,46 mev. O ^{232}Th e o ^{238}U decaem através de duas séries diferentes de doze ou mais isótopos intermediários para um isótopo estável de chumbo. Este fator torna o espectro de raios gama complexo, com emissões de diferentes energias. A emissão de raios gama proeminente da série do urânio é devida a um isótopo de bismuto, enquanto que a série do Tório é um isótopo de Tálcio (Ellis 1987 in Lima 2006).

O perfil de raios gama é, ainda hoje, um dos melhores indicadores litológicos, principalmente nas rochas sedimentares. Esta é a razão pela qual ele é utilizado nos trabalhos de correlação entre poços, uma vez que se pode distinguir arenitos e/ou carbonatos dos folhelhos, desde que os dois primeiros tipos não estejam contaminados (Lima 2006).

O potássio natural contém 0,012% do isótopo radioativo ^{40}K . Ele é abundante nos feldspatos e nas micas, que se decompõe em argilominerais, que por sua vez concentram outros elementos pesados através dos processos de troca catiônica e de adsorção. O folhelho é, portanto, a litologia mais radioativamente natural entre rochas sedimentares, à exceção dos evaporitos potássicos. Desta forma o perfil de raios gama reflete a proporção de folhelho ou argila de uma formação (Lima 2006).

As rochas sedimentares podem ser classificadas de acordo com sua radioatividade natural. Esses valores são aplicados na análise dos perfis de radioatividade como pode ser observado na Tabela 3.3. Um perfil gama mostra um aumento de radiação nas camadas que contenham folhelho rico em potássio/fósforo/argila (Figura 3.4). Sabe-se que este perfil reflete a proporção de folhelho ou argila da formação, portanto, pode-se utiliza-lo como um indicador do teor de folhelho ou argilosidade das rochas. Sendo assim, um arenito argiloso pode ser diferenciado de um arenito limpo. Em aquíferos há um fluxo muito baixo de raios gama, devido a pouca concentração de argila (Souza 2005).

Tabela 3.3: Classificação das rochas sedimentares de acordo com sua radioatividade natural (Nery 1997 *in* Souza 2005).

Alta Radioatividade	Média Radioatividade	Baixa Radioatividade
Folhelhos de águas profundas (lamas de radiolários e globigerinas) e folhelhos pretos betuminosos	Folhelhos e arenitos argilosos e águas rasas	Grande maioria de carvões
Evaporitos potássicos (carnalita e silvita)	Carbonatos	Evaporitos não potássicos (halita, anidrita e gipsita)
Algumas rochas ígneas/metamórficas	Dolomitos	Arenitos limpos

O grau de investigação do perfil de radiação depende da energia do fóton, litologia, tipo de detector, lama, diâmetro do poço e massas específicas das camadas. O que não deve ultrapassar 40 cm. É um dos melhores indicadores litológicos, principalmente para rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados, possibilitando a identificação de unidades permo-porosas. Ajuda na correlação entre poços vizinhos, avaliando a continuidade lateral dos aquíferos. Tem a vantagem de poder ser realizado em furos secos revestidos e não revestidos, onde nestes últimos os furos são preenchidos com lama de estabilização (Souza 2005).

3.1.2.3 Perfilagem com Compasso Calibrador (*Caliper*)

A ferramenta *Caliper* é utilizada para a verificação do diâmetro do poço perfilado (sem revestimento) e sua variação em toda sua extensão. Além de apresentar a integridade do poço, esse perfil pode ser relacionado com características mecânicas das rochas. Em rochas friáveis ou fraturadas, o diâmetro do poço tende a aumentar. Normalmente o compasso calibrador não é o único dispositivo em uma sonda, podendo estar acoplado em uma mesma sonda de medição de raios gama natural. A combinação do compasso calibrador com outros equipamentos pode ser fundamental para a identificação adequada da estratigrafia. O compasso calibrador também contribui para manter a sonda reta e encostada na parede ou no centro do poço. Esse equipamento deve ser calibrado com uma escala com diâmetros conhecidos (Oliveira 2005).

O *Caliper* consiste em um ou mais braços que pressionam constantemente a parede do poço durante toda perfilagem. Qualquer mudança de diâmetro do poço provocará uma variação na abertura do braço que é registrada e informada conforme unidade definida no processo de calibração (Oliveira 2005).

3.1.2.4 Perfilagem Ótica

A perfilagem ótica é uma ferramenta pouco empregada por ser de alto custo. Não se tem conhecimento de trabalhos aplicados a pesquisa ambiental com utilização desta ferramenta, desta forma este trabalho será pioneiro na aplicação deste método.

A perfilagem ótica consiste na geração de uma imagem da parede do poço captada por uma câmera digital, a partir da reflexão da parede do poço, através da emissão de luz branca vinda de LEDs contidos na própria ferramenta de perfilagem. A imagem obtida pela câmera é orientada de modo que não haja rotação. Esta orientação é feita através de magnetômetros e acelerômetros triaxiais. Estes sensores permitem traçar a trajetória do poço, fornecendo sua inclinação, direção e a caracterização de estruturas geológicas para poços não revestidos. Em poços revestidos, o sensor ótico, permite analisar o estado do revestimento, a qualidade da água do poço e o volume de contaminante quando houver. O ângulo de incidência da luz é variável, assim o sistema é capaz de manter o foco da parede do poço, mesmo variando o diâmetro. Robertson (2008) apresenta variadas aplicações para esta perfilagem sendo de extrema importância para a identificação de fraturas ao longo do poço perfilado.

3.2 – SONDAGEM E PERFURAÇÃO PARA COMPLETAÇÃO DE POÇOS

O principal objetivo ao se realizar uma sondagem é a coleta de testemunhos para descrição geológica. Em trabalhos de pesquisa ambiental para águas subterrâneas as perfurações são executadas para coleta de amostras solo e instalação de poços de monitoramento para posterior coleta de água e ensaios hidrogeológicos, como aplicado por Ogihara (2000), e na execução de perfilagem geofísica nos poços perfurados para pesquisa, como aplicado por Souza (2005). Nos dois estudos acima discriminados houve bons resultados para a aplicação destas técnicas, várias metodologias de sondagem são conhecidas.

Vários métodos de perfuração são conhecidos, Demetrio *et al.* (2008) definem os métodos de perfuração, materiais de completação e perfil construtivo dos poços, conforme apresentado abaixo:

3.2.1 Método de Percussão

O método de perfuração à percussão baseia-se no movimento contínuo de subida e descida de uma ferramenta pesada, golpeando as rochas, desagregando-as e/ou fragmentando-as. Embora existam equipamentos das mais diversas dimensões, as perfuratrizes utilizadas neste método são geralmente pequenas e de simples operação, facilmente transportadas em um chassi de caminhão adaptado (Demetrio *et al.* 2008).

Indicações do Método de Perfuração à Percussão – o método a percussão é mais indicado para rochas consolidadas, que geralmente não apresentam muitos problemas de desmoronamento. Para rochas não consolidadas, a perfuração é feita com o poço preenchido com lama ou com a utilização de revestimento provisório, o que dificulta e onera o custo da perfuração (Demetrio *et al.* 2008).

O método à percussão é recomendado também para profundidades inferiores a duzentos metros e os diâmetros de perfuração não devem ultrapassar 14 polegadas. Embora esses limites possam ser ampliados, as dificuldades são geralmente muito grandes e os equipamentos precisam ser de maior porte (Demetrio *et al.* 2008).

3.2.2 Método Rotativo

O método rotativo baseia-se na trituração e/ou desagregação da rocha pelo movimento giratório de uma broca. O início das primeiras perfurações pelo método rotativo datam de 1860. As perfuratrizes para perfuração pelo método rotativo, ou simplesmente sondas rotativas, podem ser máquinas de pequeno ou grande porte, dependendo das profundidades e diâmetros a que se destinam (Demetrio *et al.* 2008).

Amostragem de calha – a amostragem do material atravessado durante a perfuração de um poço é uma informação fundamental para o projeto final do mesmo, bem como para o conhecimento da geologia da área. O intervalo de amostragem depende da precisão pretendida, normalmente é utilizado o espaçamento de três metros entre as amostras. Para maiores detalhamentos coletam-se amostras a cada metro perfurado. No método de perfuração à percussão a amostragem é feita a partir do material coletado na caçamba de limpeza. Esta coleta normalmente gera amostras. No método rotativo de perfuração não há paralisação do avanço da broca para coleta de material, a amostragem é feita antes da lama passada pela peneira ou, quando inexistente peneira, na calha do tanque de lama. As amostras colhidas são assim chamadas de amostras de calha (Demetrio *et al.* 2008).

3.2.3 Método Rotopneumático

Este método consiste na fragmentação da rocha através da combinação de uma percussão em alta frequência com pequeno curso e rotação. O fluido utilizado e principal agente da operacionalidade deste método é ar comprimido procedente de compressores de alta potência (Demetrio *et al.* 2008).

Em geral é utilizado para a perfuração de rochas compactadas (cristalino) com excelente rendimento. A coluna de perfuração consiste de uma broca (bit) e uma peça denominada “martelo”, que conecta o bit ao hasteamento e proporciona, em função da passagem do ar, a frequência de percussão (Demetrio *et al.* 2008).

Devido à disponibilidade de equipamento e da necessidade em se coletar as amostras para descrição do perfil geológico dos poços este método foi escolhido para a perfuração dos poços deste trabalho.

3.2.4 Revestimento do Poço Perfurado

O revestimento é composto de tubos instalados ao longo de toda a perfuração, cuja principal finalidade é sustentar as paredes do poço, impedindo que a seqüência litológica atravessada desmorone. A porção do revestimento onde se instala a bomba chama-se câmara de bombeamento. O trecho do revestimento onde se localiza a zona de admissão de água para o poço, ou zona de entrada d'água do aquífero, é ocupado por tubos perfurados, denominados filtros (Demetrio *et al.* 2008).

A escolha do tipo de material será em função da resistência mecânica e química, de modo a adaptar-se às condições a que será submetido. Assim sendo, entre outras coisas, a escolha depende da qualidade da água, da profundidade do poço, do diâmetro de perfuração, do método de perfuração e também do custo. Os tipos de revestimento empregados em poços tubulares são basicamente dois: aço e PVC. No passado, o aço era o material mais comumente empregado em todos os casos. Nos últimos anos, porém, o PVC está se tornando cada vez mais utilizado, principalmente em poços com menos de 300 m de profundidade que captam águas muito corrosivas (Demetrio *et al.* 2008). Neste trabalho devido à profundidade dos poços ser menor que 300 metros foi escolhido revestimento de PVC para instalação.

O filtro, como já mencionado, é um revestimento especial, que permite a passagem da água do aquífero para dentro do poço. O seu comprimento é definido basicamente em função das características locais do aquífero (Demetrio *et al.* 2008).

Vários são os tipos de filtros que podem ser empregados. A escolha adequada depende da natureza do material a ser telado, da demanda a ser atendida e dos recursos disponíveis para a obra. Os filtros geomecânicos (PVC), empregados neste trabalho, são bastante utilizados, principalmente em poços para o abastecimento de condomínios e residências (Demetrio *et al.* 2008).

3.2.5 Pré-Filtro

O pré-filtro é o preenchimento de cascalho colocado no espaço anelar, existente entre o revestimento/filtro e a perfuração. Tem por finalidade estabilizar areias muito finas e bem selecionadas e permitir maior percentagem de área das ranhuras do filtro (Demetrio *et al.* 2008).

O pré-filtro é indicado em praticamente todos os casos, quando não se deseja perder muito tempo com desenvolvimento natural. É indispensável no caso de sedimentos muito finos e uniformes, a menos que sejam utilizados filtros com ranhuras pequenas demais (por exemplo, menores do que 0,25 mm), o que pode trazer problemas de colmatação prematura, sobretudo quando existe alguma fração argilosa na matriz arenosa fina, e nas formações granulares em geral. É sempre preferível utilizar o pré-filtro porque o mesmo permite a instalação de filtros com ranhuras mais abertas, o que contribui para uma maior eficiência hidráulica do poço. Os poços deste estudo foram instalados com a utilização de pré-filtro devido à formação ser composta por rochas alteradas de granulometria fina (Demetrio *et al.* 2008).

3.2.6 Cimentação

A colocação de pasta de cimento no espaço anelar entre o revestimento e a parede do poço, ou em casos especiais, dentro do próprio poço, é denominada de cimentação, cujas principais finalidades são (Demetrio *et al.* 2008):

1. Vedação – quando um poço é abandonado, seja qual for o motivo, deve ser totalmente preenchido com pasta de cimento, eliminando um meio de acesso para a penetração de poluentes no aquífero.
2. Fixação – é uma das finalidades básicas no que diz respeito à construção do poço e tem como objetivo fixar o revestimento à parede do poço de forma a estabilizar permanentemente a obra.
3. Proteção sanitária – a cimentação do espaço anelar da parte mais superior do poço impedirá que águas poluídas da superfície se infiltrem e contaminem a água captada pelo poço.
4. Proteção – tem como objetivo proteger o revestimento da ação de águas agressivas.

5. Separação de Aquíferos – quando existem vários níveis aquíferos e entre eles um ou mais apresentam água imprópria para consumo, os níveis indesejáveis são separados por cimentação.
6. Correções de Desvios de Perfuração – quando por algum problema a perfuração sofre desvio de verticalidade que venha comprometer a descida do revestimento ou outras operações, pode-se corrigir este defeito fazendo-se uma cimentação do trecho que sofreu desvio, e posteriormente reabrir o poço.

A cimentação é feita com uma pasta formada de cimento + água. Às vezes acrescenta-se bentonita na proporção de 3 a 6%. Para todos poços instalados neste trabalho foi executada cimentação. A Figura 3.6 apresenta um perfil esquemático do poço (Demétrio *et al.* 2008).

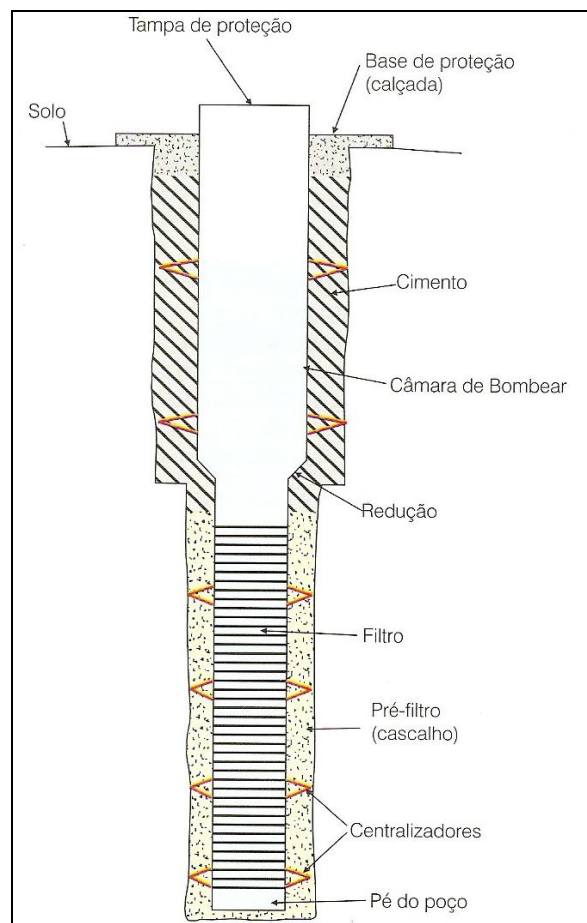


Figura 3.6: Perfil esquemático de um poço tubular (Demétrio *et al.* 2008).

3.3 – NOÇÕES DE HIDROGEOLOGIA E HIDROQUÍMICA

Estudos de Hidrogeologia e Hidroquímica, desde algumas décadas, vem desenvolvendo métodos para análise e caracterização de águas subterrâneas. Agregando-se técnicas destas duas áreas de conhecimento pode-se obter importantes informações das características do aquífero. A exemplo de Oliva *et al* (2005) que aplicou metodologias hidrogeológicas para a determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro, através de análise granulométrica e teste de *Slug*. E de Migliorini *et al.* (2006) que aplicou metodologias hidroquímicas para a caracterização da qualidade das águas subterrâneas em áreas de cemitérios na região de Cuiabá – MT, através da análise de seus parâmetros físico-químicos. Para esta pesquisa foram aplicadas várias metodologias hidrogeológicas e hidroquímicas para a caracterização do aquífero e da composição de suas águas. Este capítulo apresenta a descrição de variados métodos Hidrogeológicos e Hidroquímicos utilizados como ferramenta na caracterização de águas subterrâneas.

3.3.1 Hidrogeologia

3.3.1.1 Características Hidrodinâmicas dos Aquíferos

Um dos principais objetivos de estudos hidrogeológicos é a determinação das características hidrodinâmicas dos aquíferos. As constantes hidrodinâmicas podem ser obtidas por meio de ensaio de bombeamento, teste de slug, ou outros métodos que não serão abordados neste trabalho. As principais constantes hidrodinâmicas utilizadas na caracterização de aquíferos, são a condutividade hidráulica (k), a transmissividade (T) e o coeficiente de armazenamento (S) que serão descritas a seguir, juntamente com os ensaios aplicados para sua obtenção:

Condutividade Hidráulica (k)

O principal fator que determina a disponibilidade de água subterrânea não é a quantidade de água que os materiais armazenam, mas a sua capacidade em permitir o fluxo de água através dos poros. Esta propriedade dos materiais conduzem água é chamada de permeabilidade, que depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles (Cabral 2008).

Um sedimento argiloso, por exemplo, apesar de possuir alta porosidade é praticamente impermeável, pois os poros são muito pequenos e a água fica presa por adsorção. Por outro lado, derrames basálticos, onde a rocha em si não tem porosidade alguma, mas possui abundantes fraturas abertas e interconectadas como disjunções colunares (juntas de resfriamento), podem apresentar alta permeabilidade devido a esta porosidade secundária.

Cabral (2008) aplica a lei de Darcy para obtenção do coeficiente de proporcionalidade k , que pode ser chamado de condutividade hidráulica e leva em conta as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma das partículas, arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica). Obviamente um fluido viscoso terá no meio poroso, velocidade diferente da que a velocidade da água que apresenta baixa viscosidade. Além disso, um líquido mais denso terá características de escoamento diferentes de um líquido menos denso.

Conforme Cabral (2008) em um meio isotrópico a condutividade hidráulica (k) pode ser definida como a velocidade aparente do fluido pelo gradiente hidráulico unitário. A constante k refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico. O experimento de Darcy baseou-se na medição da vazão de água (Q) com um cilindro preenchido por material arenoso, para diferentes gradientes hidráulicos. O fluxo de água para cada gradiente foi calculado pela relação entre vazão (Q) e a área (A) da seção do cilindro. O fluxo de água foi definido como vazão específica (q) do material. A condutividade hidráulica pode ser, então, expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido da seguinte forma (Cabral 2008):

$$K = k\rho g / \mu = kg / \nu \quad (4)$$

onde: K = condutividade hidráulica (L/T)
 k = permeabilidade intrínseca do meio poroso (L²)
 ν = volume
 ρ e μ = representam as características do fluido, respectivamente massa específica e viscosidade
absoluta, ou pode ser usada a viscosidade cinemática.

A condutividade hidráulica pode ser expressa em m/s ou cm/s, poderá ser determinada através de fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo. Os ensaios de campo incluem o *Bail test* e teste de bombeamento, ambos aplicados neste trabalho e descritos a seguir. Os valores médios de condutividade hidráulica conforme Cabral (2008) são para argila 10⁻⁸ a 10⁻

⁵, silte e silte arenoso 10^{-5} a 10^{-3} , areia argilosa 10^{-5} a 10^{-3} , areia siltosa e areia fina 10^{-4} a 10^{-2} , areia bem distribuída 10^{-2} a 10^{-1} e cascalho 10^{29} a 10^0 em m/s.

Transmissividade (T)

Cabral (2008) define que a transmissividade corresponde a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda espessura saturada do aquífero. O conceito de transmissividade é utilizado em estudos bidimensionais e tridimensionais. Para aquíferos confinados a transmissividade é dada pela equação:

$$T = K.b \quad (5)$$

onde: T = Transmissividade (m/s^2)
K = condutividade hidráulica (m/s)
b = espessura do aquífero (m)

Coeficiente de Armazenamento (S)

A capacidade de um aquífero armazenar e transmitir água depende das propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e das propriedades do meio poroso (porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade). Estas propriedades são responsáveis por todo comportamento do aquífero. O armazenamento específico de um aquífero saturado é definido como o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica (Cabral 2008).

Teste de Slug

O teste de *slug*, conforme definem Oliva *et al.* (2005), é realizado em nível variável (zona saturada), onde é aplicada uma carga ou descarga através da introdução (sólido cilíndrico de volume conhecido) ou remoção súbita de volume dentro do poço (remoção de água), de forma que o nível d'água (N.A.) seja elevado ou rebaixado instantaneamente. A estabilização desse nível pode ser tão rápida que muitas vezes só é possível acompanhá-lo através de transdutores de pressão.

Quando o volume é removido o teste é conhecido como “*bail test*” e, quando adicionado, *slug test*. Este volume deslocado é igual à adição ou à remoção de água do aquífero. O resultado do monitoramento da posição do nível d'água (NA) é uma curva de rebaixamento ou recuperação do

N.A., com o tempo. Desta curva são extraídos os parâmetros que, juntamente com as características geométricas do poço, fornecem o valor de condutividade hidráulica. A interpretação do nível d'água x tempo para o *bail test* e o *slug test* pode ser obtida pelo método de Hvorslev (1951) in Oliva *et al.* (2005) conforme equação abaixo. A figura 2.7 apresenta o desenho esquemático do *slug test* com os parâmetros geométricos, necessários para estimar a condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951) in Oliva *et al.* (2005).

$$K = \frac{r^2 \ln(Le / R)}{2LeT_0} \quad (6)$$

onde: k = condutividade hidráulica (cm/s)
 r = raio do revestimento (cm)
 R = raio do poço (cm)
 Le = comprimento do filtro (cm)
 T_0 = tempo que leva para o nível de água cair a 37% da posição inicial (s)

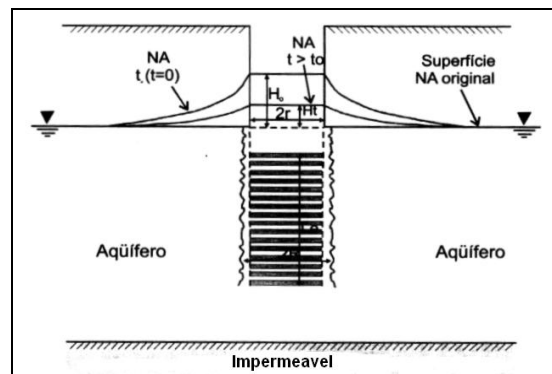


Figura 3.7: Desenho esquemático do teste de *Slug* com os parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica pelo método Hvorslev (1995) in Oliva *et al.* (2005).

Para Demir & Narasimhan (1994) o método de Hvorslev constitui uma forma rápida de se obter a condutividade hidráulica de aquíferos, devido ao método ser largamente usado e sua prática trazer benefícios para a definição de seus limites de atuação e precisão. Um importante aspecto deste método é que em sua aplicação é desconsiderado o coeficiente de armazenamento (S) sendo indicado para o *Slug test* onde a condutividade hidráulica (k) é obtida pontualmente. Em casos onde não se tem conhecimento do tipo de aquífero e da forma geométrica do mesmo, não se poderá negligenciar o valor do coeficiente de armazenamento (S) e desta forma não será indicado à aplicação do método de Hvorslev. Neste estudo foi aplicado o *bail test* devido à facilidade de remoção da água armazenada dentro dos poços.

Ensaio de Bombeamento

Rebouças *et al.* (1971) definem o ensaio de bombeamento como o teste que irá apresentar melhores resultados teóricos para a obtenção das constantes hidrodinâmicas, a saber, condutividade hidráulica (k), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) por permitir obter o maior número de informações sobre o comportamento das águas subterrâneas e anomalias geológicas locais. Devido a esta indicação este método foi escolhido para ser aplicado neste estudo.

A metodologia para execução do ensaio de bombeamento é apresentada por Rebouças *et al.* (1971). O poço deverá ser bombeado e a partir deste bombeamento um volume que se encontra disponível é prontamente retirado. O nível piezométrico das águas do aquífero começa a baixar nas imediações do poço bombeado. Esta baixa provoca um desequilíbrio da pressão hidrostática do sistema e devido a isso, a água do aquífero começa a se escoar para o interior do poço bombeado. Mas como a viscosidade da água não é nula, seu movimento convergente para o poço se realiza com perdas de energia, as quais produzem uma queda de pressão ao longo das linhas de fluxo. Nestas condições a superfície da água subterrânea se aprofunda adquirindo a forma de um cone de revolução de geratriz curvilínea, que se convencionou chamar de cone de depressão.

Assim, pouco a pouco a influência do bombeamento cresce e se aprofunda, consumindo o volume de água de saturação ou armazenamento que está estocado no aquífero. Com a expansão do cone, o volume de água liberado por unidade de abaixamento de nível torna-se cada vez maior e desta forma a velocidade de aprofundamento diminui, até atingir uma estabilização aparente. A partir da medição do nível piezométrico dos poços de observação em intervalos de tempo pré-determinados irá se identificar o raio de influência do bombeamento como pode ser observado na Figura 3.8 A e B (Rebouças *et al.* 1972).

Vários métodos são aplicados para a interpretação dos ensaios de bombeamento, a escolha do método irá ser relacionada ao tipo de condição física do aquífero associado ao comportamento da evolução dos rebaixamentos (regime permanente ou transitório).

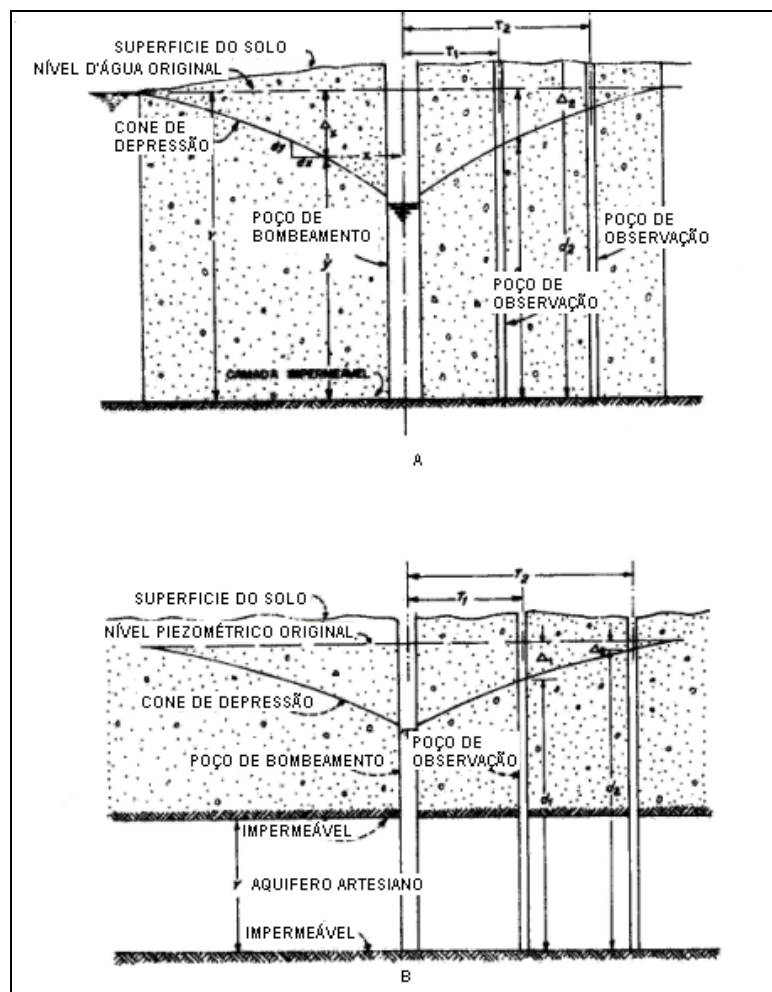


Figura 3.8: Formação do cone de depressão a partir do ensaio de bombeamento (Rebouças *et al.* 1971).

Segundo Feitosa *et al.* (2008) o termo regime está relacionado ao comportamento evolutivo do cone de rebaixamento durante o bombeamento de um poço. Ao iniciar-se o bombeamento em qualquer tipo de aquífero, ocorre um rebaixamento progressivo, no espaço e no tempo, do nível d'água ou do nível de pressões do aquífero. Inicialmente a água extraída é proveniente apenas do armazenamento do aquífero, ocasionando um contínuo rebaixamento da superfície piezométrica. Este comportamento onde o cone de rebaixamento evolui progressivamente com o tempo é chamado regime transiente. Com a continuidade do bombeamento o cone de rebaixamento pode chegar a atingir massas de águas superficiais ou provocar drenagem a partir de outros aquíferos, passando a existir uma contribuição de água de uma fonte externa ao sistema (recarga induzida). Quando a parcela correspondente à fonte externa igualar-se à vazão bombeada, cessará a contribuição do armazenamento, ocorrendo uma estabilização no tempo e no espaço do cone de rebaixamento. Este comportamento é chamado de regime permanente ou estacionário. A característica fundamental do regime permanente é que o

aquífero deixa de ser um fornecedor de água, passando a funcionar apenas como um meio de transmissão.

A Tabela 3.4 apresenta os métodos de interpretação de testes de aquífero em função do tipo de aquífero e do regime de bombeamento (Feitosa *et al.* 2008). Devido às características do sistema aquífero da área de estudo, observadas durante o bombeamento, o método de Theis foi escolhido para tratamento dos dados obtidos. Desta forma a descrição deste método será apresentada a seguir.

Tabela 3.4: Métodos de análise de fluxo para poços em função do tipo de aquífero e regime de bombeamento (Feitosa *et al.* 2008).

Regime de Bombeamento	Aquíferos Confinados		Aquíferos Livres
	Não Drenante	Drenante	
Estacionário	Thiem	De Glee Hantush/Jacob	Dupuit & Forchheimer
Transiente	Theis Jacob	Walton Hantush	Hantush & Jacob Boulton & Prickett Theis

O método de Theis, apresentado por Feitosa *et al.* (2008) consiste na seguinte relação, onde s será o rebaixamento:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{tirando-se } T \text{ e } S \text{ teremos:} \quad T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \quad \text{e} \quad S = \frac{4\pi T}{r^2} \quad (7)$$

onde: T = Transmissividade
 Q = vazão de bombeamento
 s = rebaixamento a uma distância r do poço bombeado
 S = coeficiente de armazenamento
 t = tempo a partir do início do bombeamento

A correção de Jacob, apresentado em Feitosa *et al.* (2008) é dada pela seguinte relação que deverá ser aplicada para aquífero livre de regime transitório:

$$s_c = s - \frac{s^2}{2H_0} \quad (8)$$

onde: s_c = rebaixamento corrigido
 s = rebaixamento medido
 H_0 = espessura saturada inicial
 S = coeficiente de armazenamento

A metodologia para execução do teste de bombeamento consiste nos seguintes passos (Feitosa *et al.* 2008):

1. Realização de um teste de aquífero com acompanhamento de no mínimo, um poço de observação.
2. Correção dos rebaixamentos medidos (s) utilizando-se a equação de correção proposta por Jacob.
3. Construção da curva padrão $\log W_{(u)} \times \log 1/u$ ou $\log u$.
4. Construção da curva de campo plotando-se os valores de rebaixamento s x tempo, em papel bilog. Deve-se utilizar o mesmo módulo logaritmo da curva teórica.
5. Superposição da curva de campo sobre as curva padrão até a obtenção do melhor ajuste e escolha de um ponto qualquer, denominado ponto de superposição. Como observado na Figura 3.9. Na medida do possível deve-se escolher um ponto de superposição para valores inteiros de $W_{(u)}$ e $1/u$ para facilitar os cálculos.
6. Mantendo a superposição, efetuar o registro dos valores de $W_{(u)}$ e $1/u$, na curva padrão, e s e t , na curva de campo, correspondentes ao ponto de superposição escolhido. Tal como apresentado na Figura 3.9.
7. Cálculo da transmissividade (T) e do coeficiente de armazenamento (S) através das equações apresentadas pelo método de Theis.
8. Conhecendo-se a espessura do aquífero, calcula-se a condutividade hidráulica (K).

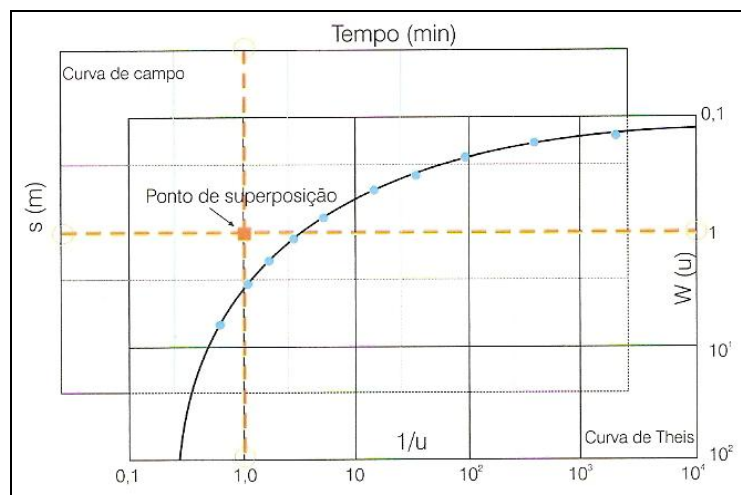


Figura 3.9: Método gráfico de superposição para a determinação de T e S utilizando a metodologia de Theis (Feitosa *et al.* 2008).

3.3.2 Hidroquímica

Para determinar o tipo de análise a que será submetida à água é necessário definir o objetivo da pesquisa. As análises freqüentemente aplicadas a estudos de água subterrânea são: análise físico-química, análises bacteriológicas, análises microbiológicas, análises radioativas e análises ambientais. Em geral são feitas análises dos constituintes maiores e menores e as propriedades físicas. A coleta para análise química e físico-química da água tem como objetivo sua caracterização quanto a potabilidade e uma comparação dos parâmetros obtidos por outras campanhas de amostragem efetuadas na mesma formação aquífera por outros autores.

3.3.2.1 Parâmetros Físico-Químicos da Água.

Os parâmetros físico-químicos da água são uma ferramenta de grande importância na caracterização de águas subterrâneas. Todos parâmetros citados foram analisados neste estudo. A Tabela 3.5 apresenta a descrição destes parâmetros baseado em Santos (2008) e sua aplicação na caracterização das águas subterrâneas.

Tabela 3.5: Definição dos principais parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas, modificado de Santos (2008).

Parâmetros	Definição	Valores de Referência
Temperatura	Amplitude térmica da água.	Para água subterrânea varia de 1 a 2 °C.
Turbidez	Dificuldade da água para transmitir a luz, provocada pelos sólidos em suspensão.	Unidade de medida <i>UNT</i> (Unidade Nefelométrica de Turbidez). Limite para água subterrânea de até 5 UNT.
Sólidos em suspensão	Corresponde à carga sólida em suspensão (silte, argila, matéria orgânica) presente na água depois de seca e pesada, sendo medida em mg/l.	As águas subterrâneas, na sua maioria, praticamente não têm sólidos em suspensão.
Condutividade Elétrica (CE)	Medida da facilidade da água em conduzir corrente elétrica, estando diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons.	Em águas contaminadas as medidas de condutividade são altas.
pH	Medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes. O pH é essencialmente uma função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. Varia de 1 a 14, sendo ácido com valores inferiores a 7 e alcalino ou básico com valores superiores 7 e neutro com o valor igual a 7.	Valores de pH para águas subterrâneas entre 5,5 e 8,5 e em casos excepcionais pode variar entre 3 e 11.
Sólidos Totais dissolvidos	Peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. Representa a concentração de todo o material dissolvido na água, seja ou não volátil.	Para água subterrânea apresenta valor de até 1000 mg/l.
Oxigênio dissolvido (OD)	Quantidade, em mg/l de oxigênio dissolvido na água.	Nas águas naturais de superfície o índice OD varia de 0 a 19 mg/l. Em águas subterrâneas a quantidade de oxigênio dissolvido é muito baixa pelo fato de estar fora do alcance da atmosfera.

3.3.2.2 Classificação e Origem dos Constituintes das Águas Subterrâneas

Os constituintes das águas subterrâneas são derivados das interações entre a água e os diversos sólidos, líquidos e gases que acontecem desde a área de recarga até a área de descarga. Assim a origem de seus constituintes esta associada à qualidade da água de infiltração, ao tempo de transito e aos tipos litológicos atravessados (Mestrinho 2008).

As espécies inorgânicas presentes em concentração >5mg/L são referidas como os constituintes maiores ou principais. Os constituintes menores e traços (0,01-10 mg/L) estão em maior proporção, mas sua concentração não pode exceder a dos elementos principais (Mestrinho 2008).

Os constituintes classificados como principais são os íons Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} e em algumas situações, os íons NO_3^- , CO_3^{2-} , K^+ e Fe^{3+} . As substâncias dissolvidas pouco ionizadas como alguns ácidos, hidróxidos de Fe e a sílica (SiO_4H_4) em estado coloidal, podem ser importantes, assim como seus íons derivados (Fe^{2+} , Fe^{3+} e SiO_4H_3^-). Entre os gases dissolvidos gás carbônico (CO_2) e o oxigênio (O_2) são os principais ainda que não sejam analisados sistematicamente nas águas subterrâneas (Mestrinho 2008).

Os constituintes menores incluem NO_3^- , CO_3^{2-} , K^+ e Fe^{2+} , além do NO_2^- , NH_4^+ e Sr^{2+} . Outros íons menores freqüentes são o Br^- , S^{2-} , PO_4^{2-} , H_3BO_3^- , NO_2^- , OH^- , I^- , Fe^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , H^+ , Al^{3+} . Os traços são os íons metálicos As^{2+} , Sb^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , etc que podem apresentar concentrações superiores ao background regional em áreas de jazidas naturais ou com contaminação antrópica (Mestrinho 2008).

3.3.2.3 Técnicas de Coleta

Conforme apresentam Clesceri *et al.* (2005) a coleta de amostras de água é a etapa de pesquisa mais importantes para a correta interpretação hidroquímica, pois ela representa a síntese do universo estudado e dela dependem todas as demais etapas (análises laboratoriais, interpretação dos dados, elaboração de relatórios). Desta forma é essencial que a amostragem seja feita com técnicas e equipamentos adequados para evitar todas as fontes possíveis de contaminação e perdas.

3.3.2.4 Preservação e Armazenamento de Amostras

Conforme definem Clesceri *et al.* (2005) no intervalo de tempo entre a coleta de amostras d'água e a realização das análises no laboratório especializado, podem ocorrer modificações físico-químicas, biológicas e radiológicas na amostra, que alteram as características da água amostrada. Para se evitar, diminuir ou retardar essas modificações faz-se necessário utilizar técnicas adequadas de preservação e armazenamento das amostras d'água subterrânea. Os principais métodos de preservação de amostras d'água são o controle de pH, refrigeração e adição química, tendo como efeito o retardamento e/ ou redução da:

- Ação biológica
- Hidrólise dos complexos químicos
- Hidrólise dos compostos químicos
- Volatilização dos constituintes

- Efeitos de absorção e/ou aderência ao material do recipiente armazenador

Mesmo com a preservação da amostra coletada, conforme exposto acima, esta preservação não é totalmente eficaz. Desta forma para garantir uma amostragem representativa deve-se atender a um intervalo de tempo máximo, entre a coleta e a realização da análise laboratorial. Para cada parâmetro físico-químico, biológico e radiológico, o intervalo pode variar desde algumas horas até meses. Os resultados das análises laboratoriais serão mais confiáveis, quanto menor for o intervalo de tempo entre a coleta e a análise. Convém evitar variações de temperaturas, agitações, vibrações e se deve armazenar as amostras de água em local fresco e escuro. Alguns parâmetros devem ser determinados *in situ*, como a temperatura, condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido etc. A análise deve ser feita o mais breve possível, para evitar que a amostra de água se altere e perca as suas características físico-químicas originais (Clesceri *et al.* 2005).

3.3.2.5 Tratamento e Apresentação dos Resultados das Análises

3.3.2.5.1 Verificação da Validade das Análises de Água

Os seguintes procedimentos são aplicáveis à validação das análises de amostras de água, desde que elas tenham sido realizadas de forma relativamente completa, incluindo parâmetros como pH, condutividade, STD (sólidos totais dissolvidos), e os principais constituintes aniônicos e catiônicos. Os testes descritos não requerem análises laboratoriais adicionais e se baseiam em cálculos teóricos, comparados aos resultados medidos. Para cada teste, existe um critério típico de aceitabilidade e, caso os resultados não atendam a esse critério, os dados não possuem confiabilidade e devem ser reavaliados, podendo ser necessária a realização de novas análises. Três testes de validação mais importantes serão abordados. São eles: balanço iônico, comparação entre STD medido e calculado, e comparação entre condutividade medida e calculada (Clesceri *et al.* 2005).

Balanço Iônico

Teoricamente, a soma de cátions deve ser igual à soma de ânions, quando expressa em *meq/L*, se todos os componentes forem analisados corretamente. Essa avaliação é aplicável a todas as águas potáveis, por serem eletricamente neutras.

$$\Sigma \text{ cátions} = \Sigma \text{ ânions} \quad (9)$$

Esse cálculo é chamado balanço iônico e pode ser usado para verificar a validade das análises. O teste é baseado na avaliação da diferença percentual, como definida a seguir:

$$\text{Diferença \%} = 100 \frac{\Sigma \text{cátions} - \Sigma \text{ânions}}{\Sigma \text{cátions} + \Sigma \text{ânions}} \quad (10)$$

Segundo Clesceri *et al.* (2005), o critério de aceitabilidade típico para a diferença percentual é:

Tabela 3.6: Critério de aceitabilidade para análise de água pelo balanço iônico (Clesceri *et al.* 2005)

Soma dos ânions <i>meq/L</i>	Diferença % Aceitável
0-3,0	± 0,2 <i>meq/L</i>
3,0-10,0	± 2%
10,0-800	5%

Águas subterrâneas que apresentam condutividade muito baixa (3-60 $\mu\text{S/cm}$), podem ser consideradas similares a águas de chuva. Nesses casos, é importante a incorporação das concentrações de H^+ , que podem ter influência significativa, e devem ser baseadas nas medidas de pH realizadas concomitantemente às análises químicas no laboratório, e não nas medidas de pH *in loco* ou após a coleta de amostras, a não ser que as análises químicas tenham sido realizadas imediatamente após a coleta. Esse cuidado é devido a consideráveis alterações que podem ocorrer no pH, como resultado de eventuais reações na amostra durante o armazenamento. Ainda para águas de chuva, se a razão ($\Sigma \text{ cátions} / \Sigma \text{ ânions}$) é menor que 0,85 ou superior a 1,15, os dados são considerados questionáveis. Deve-se, neste caso, avaliar a necessidade de re-análise da amostra (Clesceri *et al.* 2005).

Sólidos Dissolvidos Totais

Outra forma de validação de resultados consiste na comparação entre o valor de sólidos dissolvidos totais medidos e o valor obtido pelo seu cálculo. Os sólidos totais dissolvidos em uma amostra de água são calculados através da soma das concentrações expressas em *mg/L* dos constituintes, como segue abaixo (Clesceri *et al.* 2005):

$$\text{SDT} = 0,6 \times (\text{alcalinidade}) + \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{F}^- \quad (12)$$

A concentração medida de sólidos dissolvidos totais deve ser mais alta que a concentração calculada, já que algum constituinte de contribuição significativa pode não estar incluído no cálculo. Se o valor medido é menor que o calculado, a soma de íons mais elevada ($\sum$ cátions ou $\sum$ ânions), bem como o valor medido de SDT, são considerados suspeitos, indicando a necessidade de nova análise da amostra. Por outro lado, se a concentração medida de sólidos é superior em 20% ou mais que a calculada, o resultado da soma mais baixa de íons é suspeito, e os constituintes selecionados devem ser analisados novamente. A inequação abaixo apresenta a aceitabilidade para o teste de SDT, segundo Clesceri *et al.* (2005):

$$1,0 < \frac{\text{SDT medidos}}{\text{SDT calculados}} < 1,2 \quad (13)$$

Condutividade Elétrica

Um teste adicional que pode ser aplicado às análises envolve o cálculo da condutividade. Clesceri *et al.* (2005) sugere que se a condutividade elétrica calculada for superior à medida, deve-se reavaliar a soma de íons mais elevada (cátions ou ânions). No caso contrário, se a condutividade calculada for menor do que a medida, a soma mais baixa de íons deve ser analisada novamente. O critério de aceitabilidade, baseado na razão entre a condutividade calculada e medida é:

$$0,9 < \frac{\text{condutividade calculada}}{\text{condutividade medida}} < 1,1 \quad (14)$$

3.3.2.5.2 Representação Gráfica das Análises

A representação gráfica tem sido usada, para a classificação da tipologia química da água e para verificar a abundância relativa dos elementos maiores. É um método rápido de avaliar a evolução química da água, indicando diferenças e similaridades entre amostras ou processos e reações químicas. Contudo o tratamento das diferentes populações de amostras relacionadas a distintas origens ou fácies minerais exige a aplicação de métodos estatísticos. Os diagramas de Piper (Piper 1994), Stiff (Stiff 1951) e Schoelller (Schoelller 1962) ilustram características das águas associadas a diferentes tipos litológicos. Para a execução dos diagramas é necessário obter as relações iônicas que podem ser calculadas com o auxílio de *softwares* adequados como o *Aquachem*, (Mestrinho 2008). Estes diagramas são apresentados respectivamente nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 e foram utilizados nesta pesquisa através da aplicação do programa *Aquachem*.

Quando existem muitas análises, utiliza-se o diagrama de Piper que deve ser analisado em conjunto com o mapa geológico ou hidrogeológico (Figura 3.10). Para tal deve-se calcular a percentagem em miliequivalente por litro de cada composto em relação ao total de cátions e ânions. Este diagrama irá determinar o tipo de aquífero (fácies hidroquímica).

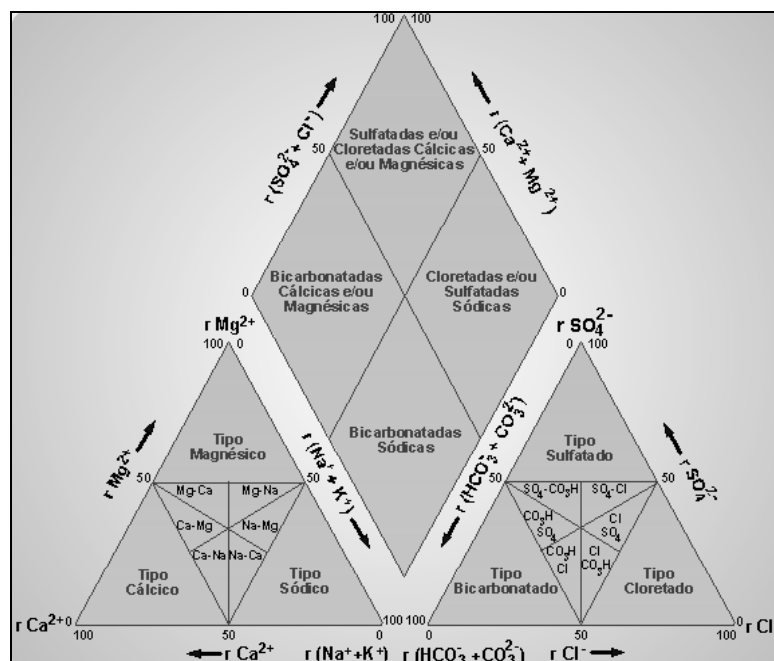


Figura 3.10: Diagrama de Piper, modificado de Piper (1994).

O diagrama de Stiff (1951) pode ser usado juntamente com mapas hidrogeológicos e representa quais íons estão em maiores concentrações formando figuras geométricas distorcidas. (Figura 3.11).

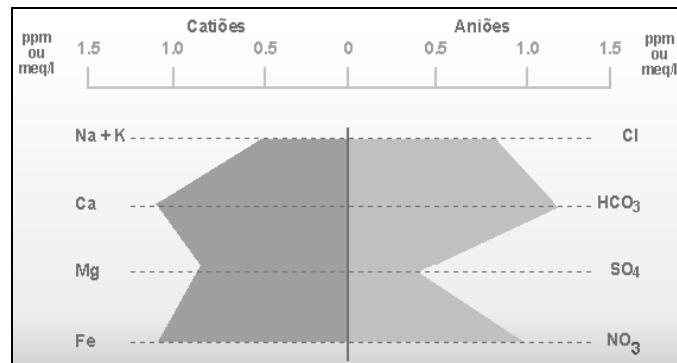


Figura 3.11 – Diagrama de Stiff, modificado de Stiff (1951).

O diagrama de Schoeller (1962) é bastante difundido para o uso e representação das amostras de água, nele podem ser representadas várias amostras e pode se comparar o teor de cada elemento nas diferentes amostras por meio de linhas (Figura 3.12).

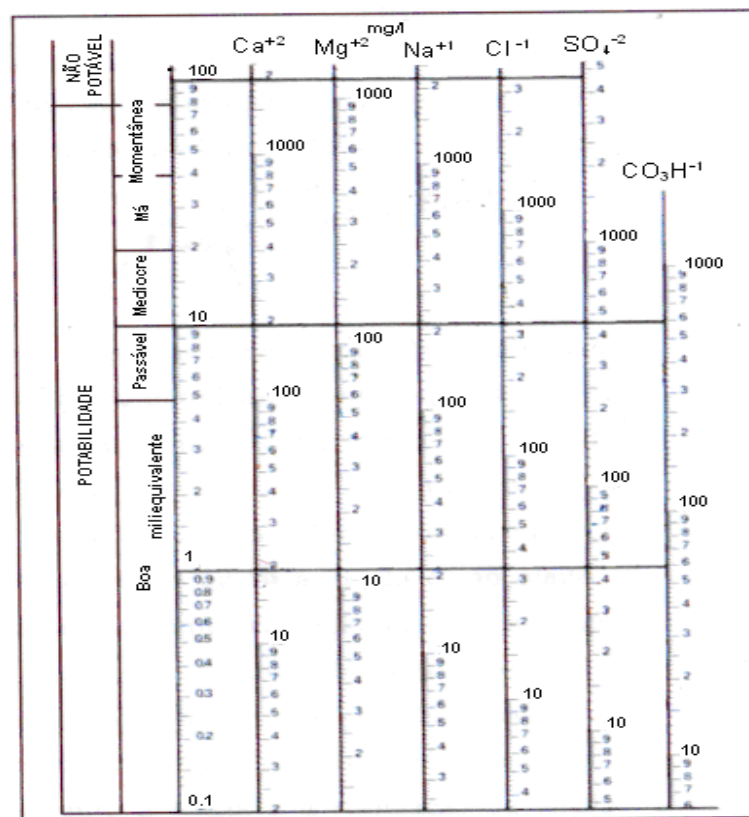


Figura 3.12: Diagrama de Schoeller, modificado de Schoeller (1962).

CAPÍTULO 4

4 – MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia foi criteriosamente definida com o objetivo de caracterizar o aquífero xistoso dentro da área de pesquisa. A seqüência de atividades foi definida de tal forma que os resultados obtidos em uma etapa foram plenamente analisados antes que a etapa seguinte dos trabalhos fosse executada. Buscou-se aplicar metodologias diversas que em conjunto caracterizem da melhor forma o aquífero da área de pesquisa. As etapas desenvolvidas são apresentadas na Figura 4.1.

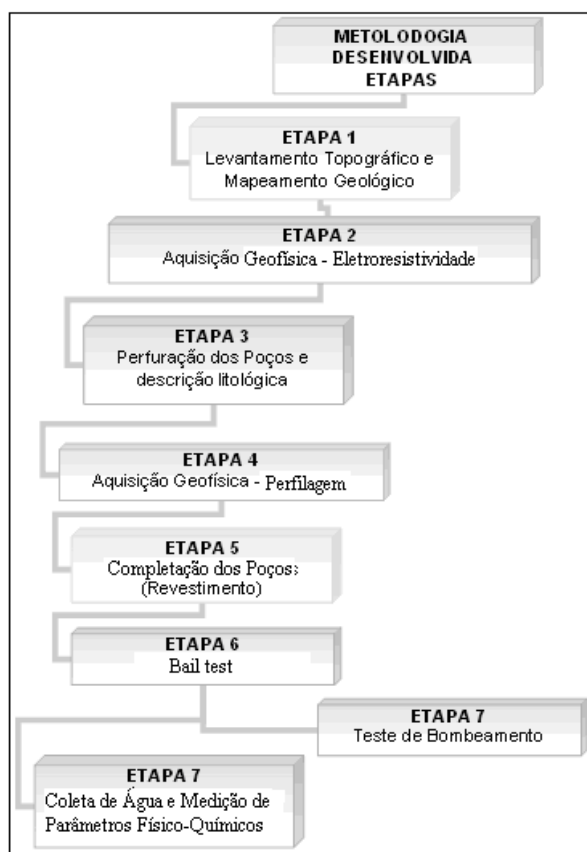


Figura 4.1: Fluxograma das etapas de pesquisa executadas.

4.1 – LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E MAPEAMENTO GEOLÓGICO

Inicialmente foi executado o levantamento topográfico que constitui a base detalhada de todas as informações geradas neste trabalho. Este levantamento visa posicionar e amarrar as informações coletadas num sistema de coordenadas geográficas georeferenciado, realizado através de estação total completa Topcom GTS 229, modelo UP 2151.

Após o levantamento topográfico foi executado o reconhecimento dos aspectos litológicos e estruturais das unidades geológicas locais. Foram tomadas medidas de direção e mergulho das camadas e fraturas. A partir da análise deste levantamento obteve-se a compreensão do condicionamento geológico-estrutural e geomorfológico e do possível comportamento do fluxo da água subterrânea, localizando dentro da área de pesquisa as regiões de alto topográfico (área de recarga do aquífero) e baixo topográfico. Como conclusão desta primeira etapa foi gerado o mapa geológico topográfico com as unidades geológicas de ocorrência na área e a delimitação das áreas de alto e baixo topográfico na escala de 1:1200.

4.2 – AQUISIÇÃO GEOFÍSICA - ELETRORESISTIVIDADE

Na área de pesquisa foi executado o levantamento geofísico eletroresistivo caracterizado como SEVME (Sondagem Elétrica Vertical Multi-eletrodos). Este levantamento constitui um imageamento subterrâneo através de seções elétricas verticais multi eletrodos (SEVME), que permitem visualizar, em quaisquer direções e profundidades, os contrastes elétricos entre os diferentes meios físicos em subsuperfície. Tal levantamento tem como principal vantagem a característica de proporcionar suporte e amarração com a interpretação dos dados geológicos obtidos na descrição geológica executada durante a perfuração dos poços.

O equipamento utilizado é da marca ABEM, Modelo SAS 4.000 (Figura 4.2). Foi executado arranjo entre eletrodos de Wenner, que melhor representa as características da área de pesquisa, conforme descrito e justificado no capítulo 3.



Figura 4.2: Eletroresistivímetro da marca ABEM, modelo SAS 4.000.

Após a análise do mapa geológico e topográfico, foi definida a localização da seção geofísica A-B. A seção A-B foi locada na área de baixo topográfico (região menor cota topográfica da área de pesquisa), com o objetivo de avaliar a profundidade do nível d'água e os diferentes horizontes litológicos em subsuperfície. A área de baixo topográfico é a mais indicada para instalação dos poços pela maior facilidade de perfuração. Após a análise dos resultados de eletroresistividade, foi definida a localização dos pontos de instalação dos três poços de monitoramento e o poço de abastecimento.

A Figura 4.3 apresenta uma foto aérea com a localização da seção de SEVME executada (linha amarela). A seção executada apresenta comprimento de 100m atingindo uma profundidade de leitura no centro da seção de 16,5 metros. O objetivo da SEVME nesta pesquisa é identificar os diferentes horizontes litológicos e o nível d'água em profundidade. Os dados obtidos foram processados e tratados pelo programa Res 2d inv produzindo um mapa de anomalias que será apresentado no capítulo 5.



Figura 4.3: Foto área com a localização da linha de sevme executada (linha amarela).

4.3 – PERFURAÇÃO DOS POÇOS E DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Após a análise dos resultados obtidos pelo levantamento geofísico de eletroresistividade foi definida a instalação de 4 poços, sendo 3 poços de monitoramento e 1 poço para abastecimento das dependências da empresa. Foi empregada uma perfuratriz Roto pneumática com compressor acoplado. A sonda apresenta a seguinte especificação: Sonda S-100 rotopneumática montada sobre caminhão Volvo NL10 utilizando motor PERKINS com rotação máxima de 2.000 RPM para acionamento do sistema de perfuração, cabeçote

hidráulico com rotação máxima de 90 RPM e perfuração em conjunto com compressor de ar com pressão de 150 psi e capacidade de 750 pcm.

A perfuratriz executa a perfuração a partir de inserção de gás comprimido em conjunto com um sistema de broca rotativa que provoca o deslocamento do material perfurado para a superfície (Figura 4.4). A cada metro perfurado é coletada uma amostra para descrição e composição do perfil litológico do poço.

A perfuração é prosseguida até que se encontre a entrada d'água. Após esta profundidade a perfuração, para os poços de monitoramento, foi executada até alcançar a profundidade máxima de 20 metros o que garante uma coluna d'água representativa para a execução dos ensaios hidrodinâmicos propostos nesta pesquisa. Para o poço Tubular Profundo a perfuração avançou até encontrar a segunda entrada d'água no aquífero fissural do itabirito.



Figura 4.4: Perfuração e coleta de amostra de solo nos poços instalados.

4.4 – AQUISIÇÃO GEOFÍSICA - PERFILAGEM

O objetivo da perfilagem é identificar mudanças litológicas expressivas, presença de fraturas, nível d'água e a integridade das paredes do Poço. O perfil de perfilagem é executado com quatro ferramentas distintas (*caliper*, ótica, resistividade e gama) que adquirem suas leituras simultaneamente. A perfilagem foi executada nos 4 Poços (PA 01, PM 01, PM 02, PM 03) perfurados na área de pesquisa, logo após a perfuração, antes de serem revestidos. A partir da análise dos resultados de perfilagem e descrição dos testemunhos, foi possível definir o perfil

de completção dos 4 poços. Este perfil apresenta a profundidade do revestimento, a seção filtrante e o intervalo do pré-filtro. A metodologia aplicada em cada ferramenta é descrita a seguir.

4.4.1 Perfilagem Caliper

A perfilagem *caliper* foi empregada para se medir o diâmetro do poço. Foi utilizada para tal finalidade é a sonda 3ACS – 3 Arm Caliper Sonde. Ela possui três hastes (braços) acopladas na parte inferior do corpo da sonda (Figura 4.5).



Figura 4.5: Sonda 3ACS – 3 Arm Caliper Sonde, com as hastes (braços) abertas.

Um mecanismo na parte interna da sonda faz com que as hastes se movam de forma sincronizada, num movimento de abertura e fechamento. Um motor acionado pelo computador mantém as hastes fechadas, permitindo descer a sonda até o fundo, para poder dar início à operação de medição do diâmetro do poço. Ao se chegar ao fundo do poço, o motor é acionado para abrir os braços da sonda. O mecanismo de abertura e fechamento está acoplado a um potenciômetro que converte a posição dos braços em voltagem, sendo registrada pelo microprocessador da sonda. Esta voltagem é então convertida em diâmetro, que é a quantidade física que se quer medir. Ao proceder a subida do equipamento ele irá registrar o diâmetro de todo o poço.

4.4.2 Perfilagem Ótica

A perfilagem ótica consiste na geração de uma imagem da parede do poço, captada por uma câmera digital, através da emissão e reflexão de luz branca, vinda de LED's contidos na própria ferramenta, que incide na parede do poço perfilado. Para execução da perfilagem ótica foi aplicada uma sonda do tipo D-OPTV – Digital Optical Televiewer (Figura 4.6). A sonda

OPTV utiliza uma câmera miniaturizada, com um comprimento de 50 mm. A câmera opera com o poço vazio ou com água limpa, podendo obter imagens da parede do poço com resolução moderada a alta. A sonda combina a visão axial de uma câmera de vídeo com um espelho hiperbolóide para obter uma visão de 360 graus da parede do poço.

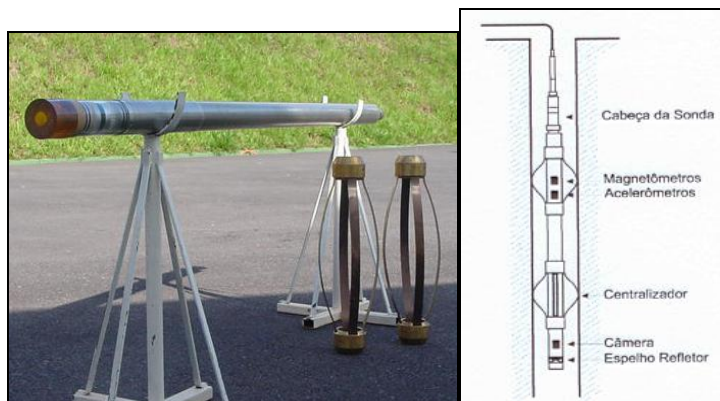


Figura 4.6: sonda D-OPTV – Digital Optical Televiewer (ao lado, os centralizadores), e representação esquemática dos sensores.

A imagem obtida pela câmera é orientada de modo que não haja rotação. Esta orientação é feita através de magnetômetros e acelerômetros triaxiais contidos na ferramenta. Estes sensores traçam a trajetória do poço, fornecendo sua inclinação e direção. Devido ao fato do ângulo de incidência da luz ser variável, dependendo da posição vertical do raio de luz refletido pelo espelho, o sistema é capaz de manter o foco na parede do poço, mesmo variando o diâmetro do poço.

A imagem da parede do poço obtida pela sonda óptica, uma vez que é orientada, irá identificar, as diversas estruturas geológicas (fraturas e acamamentos) e sua distribuição espacial.

4.4.3 Perfil de Resistividade

O requisito básico para a execução da perfilagem elétrica é que o fluido de perfuração seja eletricamente condutor, de modo a propiciar bom contato elétrico entre a ferramenta (sonda) e os horizontes atravessados pela sondagem. Nesta pesquisa foi utilizado como fluido a água do próprio aquífero. À semelhança dos métodos de superfície o que se determina é a resistividade aparente em função da geometria dos eletrodos. Os arranjos mais difundidos são os do tipo mono, bi e trieletródicos. Para esta pesquisa foi aplicada a ferramenta ELOG, que utiliza o arranjo bieletrodico, apresentando as curvas de resistividade curta (SHN),

resistividade longa (LON) e resistência pontual (SPR). Neste arranjo, uma corrente de valor constante flui entre os eletrodos A e B; a diferença de potencial é medida entre os eletrodos M e N (Figura 4.7). O perfil, resultado do levantamento com arranjo bieletródico, é mais indicativo da resistividade da formação, se comparado ao arranjo monoelétródico, uma vez que o uso de dois eletrodos permite medir a resistividade da formação nas proximidades da sonda. A profundidade de investigação é diretamente proporcional ao espaçamento entre eletrodos A e M.

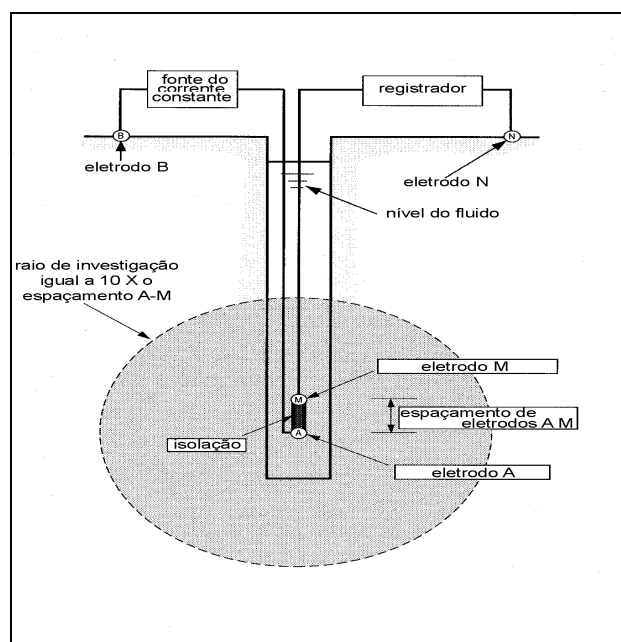


Figura 4.7: Arranjo bieletródico (distância AM em polegadas).

4.4.4 Perfilagem Gama

A perfilagem gama consiste na medida da radioatividade natural das formações atravessadas pela perfuração. Os três elementos que contribuem para a radioatividade da formação são: tório, urânio e potássio. As radiações gama são rapidamente absorvidas, porém, podem atravessar o revestimento e/ou fluido de perfuração.

O sensor de raios gama consiste basicamente de um detector e de um contador de pulsos elétricos. O detector é um cintilômetro que produz um pulso elétrico discreto para cada raio gama detectado. O detector não determina a intensidade da energia do raio gama ele apenas registra um pulso acima de um nível de energia determinado. A informação obtida é apenas uma taxa de amostragem - pulso/segundo (ou CPS, do inglês “counts per second”) para cada profundidade.

4.5 – COMPLETAÇÃO DOS POÇOS PERFURADOS

Após a análise dos dados obtidos pela descrição geológica dos testemunhos de sondagem de cada poço, em conjunto com os resultados obtidos pela perfilagem e eletroresistividade, foi definido o perfil de completação dos 4 poços.

Após a remoção de toda a ferramenta de perfuração, em cada um dos 4 poços, foi instalado revestimento com tubo geomecânico de 4” (Figura 4.8) e colocação do pré-filtro, de diâmetro 0,20 a 0,50 mm. Este procedimento garante a integridade do poço e a qualidade dos dados obtidos. Os perfis geológicos e construtivos dos poços foram processados no programa *Visual Poços*.



Figura 4.8: Instalação do revestimento dos poços, tubo geomecânico.

4.6 – BAIL TEST

Para determinação da permeabilidade do meio aquífero da área de pesquisa foi executado o *Bail test* nos poços de monitoramento PM 01, PM 02 e PM 03. Os dados coletados foram extraídos por meio do programa específico de cada equipamento empregado em cada poço. Todos os dados foram processados no programa *Aquifer Test* pelo método de Hvorslev (1951) in Oliva *et al.* (2005).

Para o *Bail test* foram utilizados os equipamentos *bailer* de inox da marca Brasbailer (Figura 4.9), medidor de nível d'água da marca Brasbailer (Figura 4.10), *Solinst Levellogger Gold* (Figura 4.11) e *Mini Diver* da marca Schlumberger (Figura 4.12), os dois últimos fazem a leitura da pressão d'água sobre o equipamento e transformam na variação de nível d'água durante o ensaio.

O ensaio foi executado programando-se os equipamentos *Levellogger* e *Mini Diver* para leituras em intervalos de 60 segundos. Inicialmente é medido o nível d'água (N.A.) do poço com o medidor de nível d'água. Em seguida o equipamento é colocado dentro do poço e é inserido o *bailer*, que irá remover uma coluna d'água de aproximadamente 50cm, o N.A. é rebaixado em 50cm. O medidor de N.A. é mantido na leitura inicial e o equipamento irá permanecer dentro do poço até que o N.A. retorne ao valor inicial. O ensaio é finalizado removendo o equipamento do poço ao ser verificado com o medidor de nível d'água que o poço retornou ao N.A. inicial.



Figura 4.9: Bailer de inox Brasbailer.



Figura 4.11: Solinst Levellogger Gold.



Figura 4.10: Medidor de nível d'água Brasbailer.



Figura 4.12: Mini Diver Schlumberger.

4.7 – ENSAIO DE BOMBEAMENTO, COLETA DE ÁGUA E MEDIÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

4.7.1 *Ensaio de Bombeamento*

Com o objetivo de se conhecer as condições hidrodinâmicas do poço tubular profundo (PA 01) para cálculo de exploração e dimensionamento do equipamento (moto-bomba) a ser instalado no poço, foi executado inicialmente um teste de vazão de 24 hs. Neste ensaio foi utilizado um compressor de especificação PEG 60 PCM e um medidor de nível d'água da marca Brasbailer de 50 metros (Figura 4.10).

Primeiramente é medido o nível d'água do poço sem bombeamento (nível estático). Em seguida é instalada dentro do poço uma mangueira de diâmetro interno 30 mm acoplado ao compressor e outra mangueira de mesmo diâmetro para saída de água até a profundidade de 35 metros. O compressor produz um volume de ar que é inserido dentro do poço e provoca a saída de água. O volume de água que sai do poço é controlado e a vazão (m^3/h) é medida. A vazão foi medida utilizando-se um recipiente graduado. O ensaio é controlado de forma a manter-se uma vazão constante de saída de água do poço.

O ensaio é executado durante 24 hs mantendo-se uma vazão constante que será a vazão de exploração do poço, o nível d'água no intervalo de bombeamento é medido e chamado nível dinâmico. Após a conclusão do bombeamento de 24 hs, o compressor é desligado e a recuperação do poço é controlada até que seu nível dinâmico retorne a seu nível estático. Durante o teste de vazão os poços de monitoramento (PM 01, PM 02 e PM 03) foram monitorados medido-se o nível d'água para verificar o raio de influência do bombeamento do Poço tubular profundo. Foram feitas medidas durante o início do bombeamento, onde o rebaixamento ocorre rapidamente e no final do ensaio após as 24 hs de bombeamento. Todos dados coletados neste ensaio permitiram dimensionar a bomba a ser instalada no poço tubular profundo.

Após o teste de vazão do poço PA 01 e o dimensionamento de sua vazão de exploração foi instalada uma bomba elétrica neste poço com capacidade para bombeamento de até $3 \text{ m}^3/\text{h}$ que será usada para futura exploração do poço e para o teste de bombeamento. Os equipamentos: hidrômetro, 4 medidores de nível d'água da marca Brasbailer (Figura 4.10), 2 *Solinst Levellogger*

Gold (Figura 4.11), 1 *Mini Diver Schlumberger* (Figura 4.12), 1 sonda de medição de nível (Figura 4.13) e 1 computador portátil da marca ACER (Figura 4.13) foram instalados para a execução do teste de bombeamento. Foram programados e instalados 3 *Solinst levelogger* um em cada poço de monitoramento para leituras a cada 60 segundos.

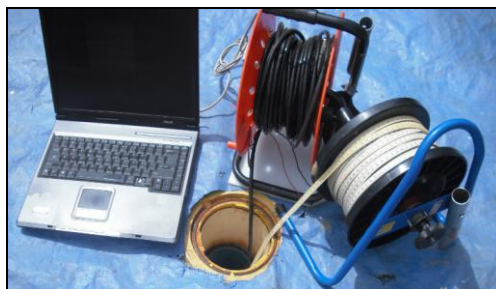


Figura 4.13: Sonda de medição de nível d'água.

O teste de bombeamento foi executado a vazão constante, sob regime transiente, o que consiste no bombeamento contínuo do poço para a obtenção de sua curva de rebaixamento e/ou recuperação *versus* tempo. Em conjunto com o bombeamento, foram feitas medições de rebaixamento e recuperação de nível d'água do poço bombeado assim como nos 3 poços de monitoramento (PM 01, PM 02 e PM 03) situados dentro da área de pesquisa (figura 4.14). Ao longo do teste de bombeamento e após a parada da bomba foi medida a recuperação dos níveis a intervalos de tempo pré-estabelecidos em escala logarítmica, visando obter a curva de rebaixamento e recuperação *versus* tempo, para determinação de parâmetros hidráulicos do aquífero – tais sejam, a transmissividade hidráulica “T” e condutividade hidráulica “k”. O tubo de saída d'água do poço foi levado até uma canaleta que encaminha a água para o esgoto público para que a água bombeada não retorne para o local do poço em bombeamento e realize infiltração e recarga do mesmo, falseando resultados. Neste tubo de saída d'água de bombeamento, foi instalado um registro de controle de vazão (hidrômetro), juntamente com os equipamentos citados foi utilizado cronômetro de precisão. O tratamento e interpretação dos dados para determinação dos parâmetros hidráulicos do aquífero (transmissividade e condutividade) foram obtidos pelo método de Theis através do programa *Aquifer Test*.

De forma a garantir a execução adequada do teste, o poço a ser bombeado ficou em repouso durante 24 hs antecedente ao ensaio, garantindo que o seu nível estático estivesse em condições naturais.



Figura 4.14: Leitura de recuperação com medidor de N.A. no PM 02.

4.7.2 Coleta de Água e Medição dos Parâmetros Físico-Químicos

Durante o bombeamento do Poço PA 01 foram medidos os parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, sólidos totais dissolvidos, salinidade e temperatura) da água bombeada com a Sonda Multi Parâmetros Hanna modelo HI 9828 (Figura 4.15). A partir da medição constante dos parâmetros físico-químicos foi gerado um gráfico onde se acompanha todo tempo de medição até que as leituras se mantiveram constantes. Como garantia de uma amostra representativa do aquífero, no momento em que se verificou que os parâmetros físico-químicos se tornaram constantes foi coletada uma amostra de água. As análises químicas da amostra foram realizadas pelo Laboratório Geochemical. Com base no conhecimento prévio de que as águas deste aquífero eram pouco mineralizadas (Mourão 2007), e que este aspecto afeta a qualidade das análises, definiu-se trabalhar com os tipos litológicos principais envolvidos na interação água-rocha. Desta forma dezenove parâmetros foram analisados e comparados a Portaria 518 do Ministério da Saúde *in* Mestrinho (2008). Os resultados analíticos, secundários e obtidos na pesquisa, foram importados para o banco de dados do aplicativo *Aquachem 3.7* para avaliação e tratamento.



Figura 4.15: Sonda Multi parâmetros Hanna modelo HI 9828.

CAPÍTULO 5

5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 – TOPOGRAFIA E GEOLOGIA LOCAL

A partir do levantamento topográfico e mapeamento geológico foi produzido o mapa geológico topográfico da área apresentado na Figura 5.1a. Posteriormente uma seção geológica foi obtida visando reconhecer as condições estruturais da área de baixo topográfico, local definido para o levantamento geofísico e instalação dos Poços (Figura 5.1 b).

5.1.1 Topografia

Observando-se a distribuição e cotas das curvas de nível e seus valores de cota no Mapa da Figura 5.1a pode-se identificar duas regiões distintas, caracterizadas como área de alto topográfico e área de baixo topográfico. O sentido do fluxo subterrâneo, com raras exceções, irá acompanhar a topografia do terreno, desta forma estas duas regiões representam para o aquífero respectivamente: alto topográfico caracterizado como área de recarga e baixo topográfico, como pode ser observada na Figura 5.1a. A análise do mapa da Figura 5.1 mostra o fluxo subterrâneo deslocando de SW para NE.

A escolha dentro da área de pesquisa do local para instalação dos 4 poços previstos deve considerar vários fatores, sendo o principal, a condição topográfica do terreno. Para diminuir o tempo e custo de perfuração foi definida a área de baixo topográfico para instalação dos poços. A locação dos poços e o método de perfuração a ser aplicado foram definidos após a análise dos resultados do levantamento geofísico de resistividade. Foi definida uma seção de geofísica a ser executada cobrindo toda extensão da área de baixo topográfico com o objetivo de conhecer suas condições em subsuperfície antes da locação dos poços.

5.1.2 Geologia Local

A área de pesquisa está inserida na seqüência metassedimentar do Grupo Nova Lima, unidade do Supergrupo Rio das Velhas. Esta área está localizada em terreno particular da empresa Georadar Levantamentos Geofísicos S.A. no município de Nova Lima – MG. A área apresenta cerca de 17.000m² e mostra afloramentos de xistos em uma parede subvertical e no piso devido a um corte executado, para terraplagem do local.

Predomina em toda área a presença do clorita-talco xisto esverdeado, por vezes amarronzado ou amarelado, com modificação de cores devido à ação intempérica. Podem-se observar nesta rocha porções variáveis com maiores concentrações de clorita ou talco. A xistosidade é bem visível, bem como, dois afloramentos de itabirito fraturado (Figura 5.1a). As duas unidades litológicas observadas na área são descritas a seguir.

5.1.2.1 Itabirito

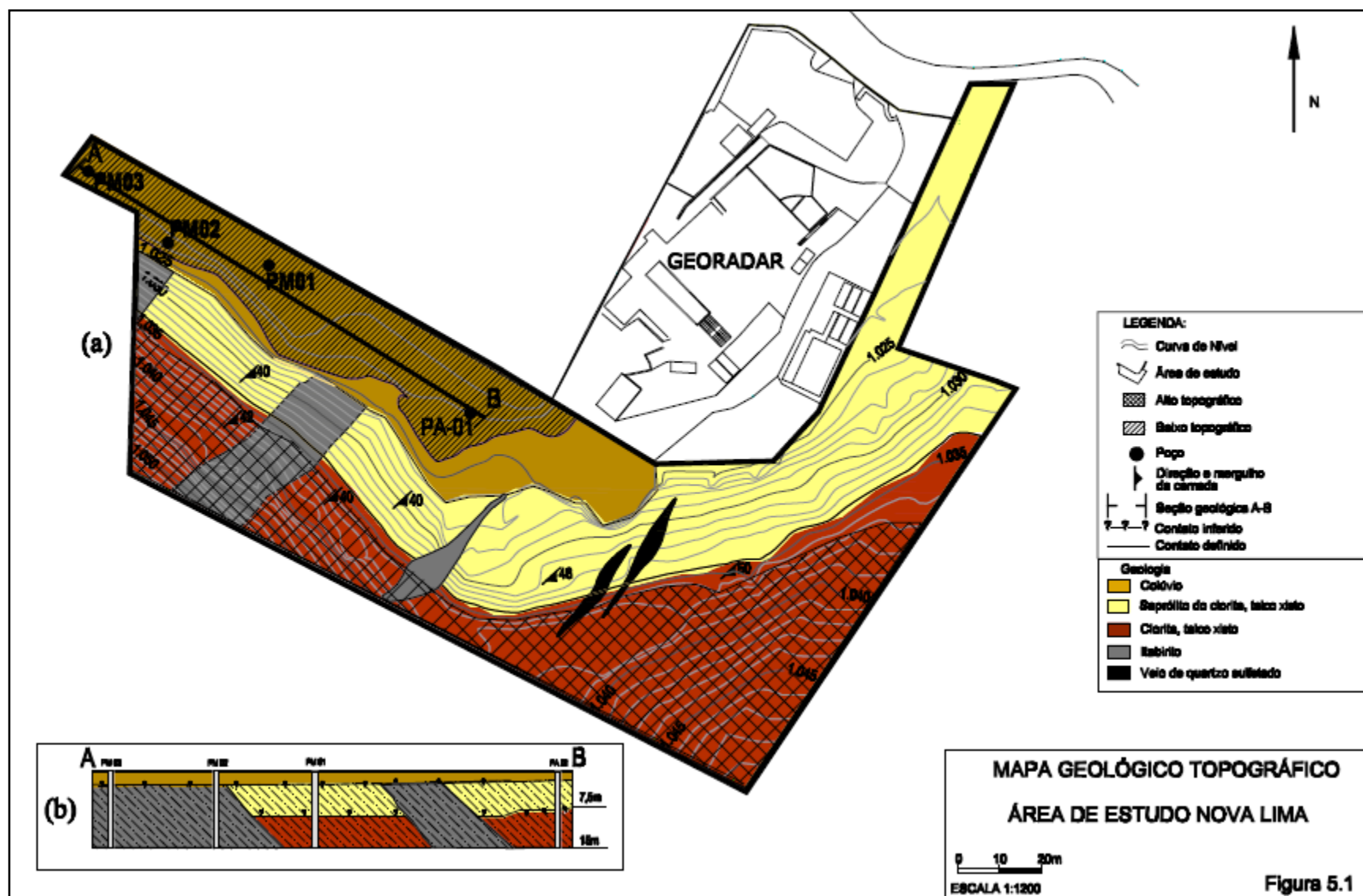
Rocha metassedimentar de ocorrência em camadas contínuas, com porções ricas em quartzo, carbonato e magnetita. Apresenta-se na área, como pode ser observado na Figura 5.1a, em três afloramentos localizados a oeste, com direção e mergulho de camada 140/30.

Conforme definem Carneiro *et al.* (1995), os itabiritos do Grupo Nova Lima apresentam-se bastante fraturados. Estas fraturas originam uma zona aquífera de porosidade fissural intercalada por zonas de porosidade intersticial, o que caracteriza um aquífero com elevada capacidade de armazenamento e elevada condutividade hidráulica.

5.1.2.2 Clorita-Talco Xisto

O clorita-talco xisto, é a principal unidade litológica da área de pesquisa, aflorando por toda sua extensão com veios de quartzo sulfetados (Figura 5.1a), apresenta direção e mergulho de camada 140/40. Esta unidade faz parte do Grupo Nova Lima, de origem vulcano-sedimentar (Carneiro *et al.* 1995). Os xistos esverdeados representam o metamorfismo de basaltos ou tufos básicos, que se intercalam com sedimentos pelíticos ricos em matéria orgânica. O contato com o itabirito é brusco, porém as camadas são concordantes. Esta unidade não apresenta grande potencial aquífero, e ocorre como aquitardes, com baixos valores de condutividade hidráulica.

O perfil geológico A-B executado na área de baixo topográfico (Figura 5.1b) apresenta uma camada de colúvio de 1 a 3 metros sobre as unidades litológicas principais a saber, saprólito do clorita-talco xisto, saprólito do xisto e o itabirito. O mergulho e direção da camada do itabirito, em perfil, foram analisados para a locação dos poços. O poço PA 01 foi locado no final da seção A-B para captar água do aquífero fissural e os demais poços ao longo da seção A-B.



5.2 – LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORESISTIVIDADE

O levantamento geofísico de eletroresistividade tem como objetivo, nesta pesquisa, identificar em subsuperfície o nível d'água (N.A.) e os diferentes níveis litológicos. Estas informações irão auxiliar na definição da metodologia de sondagem a ser executada na perfuração dos poços que serão instalados na área de pesquisa.

O caminhamento geofísico de eletroresistividade foi executado ao longo da área de descarga do aquífero, definida para a instalação dos poços. Foi executada uma seção geofísica ao longo da linha A-B (Figura 5.1a) de mesma localização da seção do perfil geológico apresentado na Figura 5.1 b.

A seção geofísica obtida como resultado do levantamento de eletroresistividade da linha A-B é apresentada na Figura 5.2. A Figura 5.2a apresenta o perfil de resistividade em ohm.m. Para esta seção foram identificados quatro diferentes intervalos de leitura que foram denominados domínios A, B, C e D. A Tabela 5.1 apresenta os diferentes valores de resistividade dos domínios A,B,C e D e seus materiais correspondentes pela classificação de Elis (1998) *in* Ustra (2008).

Tabela 5.1: Valores de resistividades dos domínios A,B,C e D para a seção A-B da área de pesquisa e seus materiais correspondentes pela classificação de Elis (1998) *in* Ustra (2008).

Domínio	Resistividade (ohm.m)	Tipo de material *
B	> 3.000	Muito arenoso
A	1.000 – 3.000	Arenoso
C	200 – 1.000	Pouco arenoso
D	< 200	Rocha sã ou pouco alterada
*modificado de Elis (1998) <i>in</i> Ustra (2008).		

O perfil de resistividade (Figura 5.2a) apresenta as profundidades aproximadas e limites entre os domínios A, B, C e D. A partir das informações da Tabela 5.1 foi possível identificar dois horizontes de granulometria diferenciada, sendo os domínios A, B e C arenosos e o domínio D rocha sã ou pouco alterada. Cruzando as informações obtidas pelo perfil de resistividade (Figura 5.2a) com as informações obtidas no mapa geológico e perfil geológico (Figura 5.1), pode-se correlacionar as unidades litológicas presentes na área com os domínios A, B, C e D.

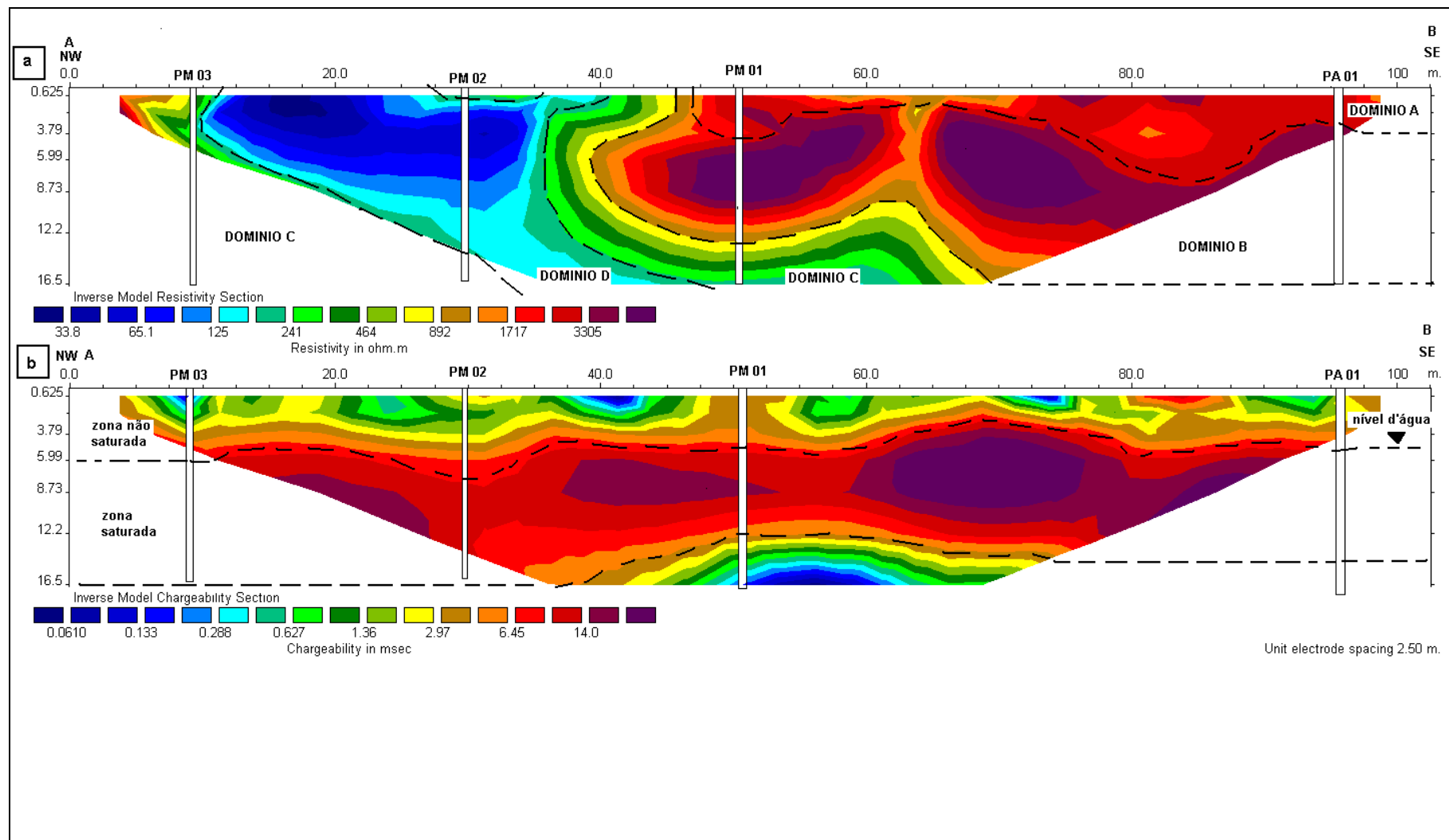


Figura 5.2: Seção A-B de Eletroresistividade da área de estudo sendo, **(a)** resistividade em ohm. e, **(b)** cargabilidade em msec.

Assim o domínio A irá corresponder ao colúvio, B ao saprólito do clorita-talco xisto, C ao clorita-talco xisto e D ao saprólito do itabirito. Uma análise hidrogeológica inicial deste contexto indica a presença de duas unidades aquíferas, sendo um aquífero granular superior (domínios A, B e C) e um aquífero fraturado inferior (abaixo do domínio D), o que poderá ser confirmado ou não com as demais metodologias a serem aplicadas nas próximas etapas desta pesquisa.

Para meios saturados com água ricas em íons dissolvidos a cargabilidade apresenta maiores valores indicando que está na zona saturada. Desta forma pode-se definir o limite entre a zona insaturada e zona saturada através da análise dos valores de cargabilidade obtidos em uma seção geofísica. O perfil de cargabilidade (Figura 5.2b) da seção geofísica executada na área de pesquisa apresentou dois domínios distintos de intervalos de leitura. O limite em subsuperfície entre estes dois domínios de leitura representa o nível d'água deste aquífero. A Tabela 5.2 apresenta os intervalos de leitura de cargabilidade e a condição aquífera referente a estas leituras.

Tabela 5.2: Intervalos de leitura de cargabilidade para a seção A-B e a condição aquífera referente a estas leituras.

Domínio	Cargabilidade (msec)	Condição aquífera
1	0 – 6	Zona insaturada
2	6- 15	Zona saturada

Uma análise do conjunto de dados obtidos pelo mapa e perfil geológico e as seções geofísicas de eletroresistividade e cargabilidade, apresentada na Tabela 5.3, torna possível identificar as características gerais em subsuperfície dos quatro poços a serem instalados. Desta forma pode-se estimar o nível d'água e as profundidades de perfuração dos 4 poços e definir a metodologia de sondagem a ser aplicada.

Tabela 5.3: Espessura estimada da camada aquífera nos poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA-01.

Poço	Espessura da camada aquífera (m)		N.A. (m) (nível d'água)
	Aquífero Granular	Aquífero fraturado	
PM 01	0 – 16		5,0
PM 02	0 – 12	12 – 16	7,0
PM 03	0 – 16		5,0
PA 01	0 – 15	15 - 30	7,0

5.3 – PERFURAÇÃO DOS POÇOS E DESCRIÇÃO LITOLÓGICA

A sondagem consiste em uma metodologia para perfuração e coleta de testemunhos (amostras para descrição geológica). Nesta pesquisa devido às condições estimadas de profundidade de perfuração e tipo de material a ser perfurado foi empregada sonda rotopneumática. Foram perfurados três poços de monitoramento (PM 01, PM 02 e PM 03) e um poço para exploração (PA 01). A localização dos quatro poços está indicada na Figura 5.1. A seguir será apresentada a descrição litológica referente aos quatro poços perfurados na área de pesquisa.

5.3.1 Descrição Litológica do poço PM 01

A perfuração do PM 01 atingiu a profundidade de 19 metros. No primeiro intervalo de perfuração (0,00 a 4,00 m) foi encontrado colúvio pouco compactado siltoso. A 5,07 m observou-se o limite entre a zona insaturada e zona saturada indicando o N.A. deste poço. No intervalo de 4,00 a 12,00 m foi encontrado saprólito de itabirito siltoso. No intervalo final de perfuração (12,00 a 19,00 m) foi encontrado saprólito da rocha predominante na área, o clorita-talco xisto, com fragmentos de quartzo provenientes dos veios quartzosos sulfetados aflorantes por toda área.

Em 12,00 m foi identificada uma segunda entrada d'água, o que representa que neste poço podemos identificar duas unidades aquíferas diferentes. A unidade superior formada pelo saprólito de itabirito de condutividade hidráulica possivelmente baixa com caráter de aquítarde. A unidade inferior é formada pelo saprólito do clorita-talco xisto de condutividade hidráulica possivelmente baixa com caráter de aquítarde. Os valores de condutividade hidráulica serão confirmados pelos ensaios hidrogeológicos.

5.3.2 Descrição Litológica do poço PM 02

A perfuração do PM 02 atingiu a profundidade de 21 metros. No primeiro intervalo de perfuração (0,00 a 4,00 m) foi encontrado colúvio pouco compactado areno argiloso. A 5,83 m observou-se o limite entre a zona insaturada e zona saturada indicando o N.A. deste poço. No intervalo de 4,00 a 15,00 m foi encontrado saprólito do itabirito areno argiloso. No intervalo final de perfuração (15,00 a 21,00 m) foi encontrado itabirito fraturado.

Em 15,00 m foi identificada uma segunda entrada d'água, o que representa que neste poço podemos identificar duas unidades aquíferas diferentes. A unidade superior é formada pelo

saprólito do itabirito de condutividade hidráulica possivelmente baixa com caráter de aquítarde. A unidade inferior é formada pelo itabirito fraturado de condutividade hidráulica possivelmente alta, devido à presença de fraturas, e com caráter de aquífero fraturado.

5.3.3 Descrição Litológica do poço PM 03

A perfuração do PM 03 atingiu a profundidade de 21 metros. No primeiro intervalo de perfuração (0,00 a 3,00 m) foi encontrado colúvio pouco compactado areno argiloso. A 4,94 m observou-se o limite entre a zona insaturada e zona saturada indicando o N.A. deste poço. Foi observado um pequeno intervalo de saprólito de itabirito de 3,00 a 4,00 m seguido de um longo intervalo (3,00 a 11,00 m) de itabirito alterado argiloso. No intervalo final (11,00 a 21,00 m) foi encontrado itabirito fraturado.

Em 15,00 m foi identificada uma segunda entrada d'água, desta forma neste poço podemos identificar duas unidades aquíferas diferentes. A unidade superior é formada por itabirito alterado argiloso de condutividade hidráulica possivelmente baixa com caráter de aquítarde. A unidade inferior é formada pelo itabirito fraturado de condutividade hidráulica possivelmente alta devido à presença de fraturas caracterizado como aquífero fraturado.

5.3.4 Descrição Litológica do poço PA 01

A perfuração do PA 01 atingiu a profundidade de 40 metros. Devido ao objetivo de futura exploração o poço foi aprofundado mais que os demais poços de monitoramento para captar água do maior número de fraturas possível. No primeiro intervalo de perfuração (0,00 a 1,00 m) foi encontrado colúvio pouco compactado areno argiloso. No intervalo de 1,00 a 12,00 metros foi encontrado saprólito do clorita-talco xisto, este intervalo apresentou intercalações entre camadas mais arenosas e camadas mais argilosas. A 6,89 m observou-se o limite entre a zona insaturada e zona saturada indicando o N.A. deste poço. No intervalo de 12,00 a 16,00 metros foi encontrado o clorita-talco xisto maciço. No intervalo final de perfuração (16,00 a 40,00 m) foi encontrado itabirito fraturado, de 24,00 a 34,00 m foi observado um horizonte característico de brecha com grande concentração de fraturas centimétricas.

Em 16,00 e 31,00 metros foram identificados dois diferentes pontos de aporte d'água, em diferentes unidades litológicas o que representa duas unidades aquíferas diferentes. A unidade superior é formada pelo saprólito do clorita-talco xisto de condutividade hidráulica

possivelmente baixa com caráter de aquítarde. A unidade inferior é formada pelo itabirito caracterizada como aquífero fraturado. Devido à presença de duas regiões com grande incidência de fraturas este poço terá possivelmente um grande aporte de água do aquífero gerando uma condutividade hidráulica alta.

5.3.5 Análise Comparativa entre a Seção de Eletroresistividade A-B e as Litologias Encontradas na Perfuração dos Poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA 01

Com base nos dados obtidos pela descrição litológica dos poços perfurados na área de pesquisa foi possível gerar um perfil geológico referente à linha A-B da Figura 5.1 (mesma seção A-B de eletroresistividade) com sua caracterização hidrogeológica, definindo os limites e unidades aquíferas presentes. A Tabela 5.4 apresenta resumidamente as características hidrogeológicas referentes a todos horizontes litológicos identificados na área de pesquisa.

Tabela 5.4: Descrição das unidades litológicas presentes na área de pesquisa e suas características

Unidades litológicas	Classificação	Granulometria	Condutividade hidráulica	Tipo de aquífero
colúvio	Zona insaturada	arenoso	Alta	
Saprólito do itabirito	Unidade 1	Areno argiloso	Baixa	Aquítarde
Saprólito do clorita-talco xisto	Unidade 2	Silto argiloso	Baixa	Aquítarde
Clorita-talco xisto maciço	Camada semipermeável	Maciço	Muito baixa	
Itabirito	Unidade 3	Maciço fraturado	Alta	Aquífero fraturado

hidrogeológicas.

A Figura 5.3c apresenta o perfil geológico gerado a partir dos dados da Tabela 5.4 e demais informações obtidas na descrição litológica dos poços da seção A-B da figura 5.1. O perfil geológico contém as cinco unidades litológicas da Tabela 5.4. Este perfil apresenta uma camada superior de colúvio (1 a 4 metros) e abaixo desta camada aparecem intercalações do do clorita-talco xisto com o itabirito e o saprólito dessas unidades. Do início do perfil em A até aproximadamente o centro encontra-se predominantemente o saprólito de itabirito, e do centro em direção a B, uma camada de saprólito do clorita-talco xisto.

Após a perfuração dos poços foi possível identificar em detalhe a estratigrafia da área de pesquisa que não foi identificada no mapeamento prévio. Entre os poços PM 02 e PM 03 existe uma intercalação de camadas do itabirito e do clorita-talco xisto que pode ser observada no perfil apresentado na Figura 5.3c. Devido à extensão da camada superior de colúvio esta intercalação não foi observada no mapeamento prévio.

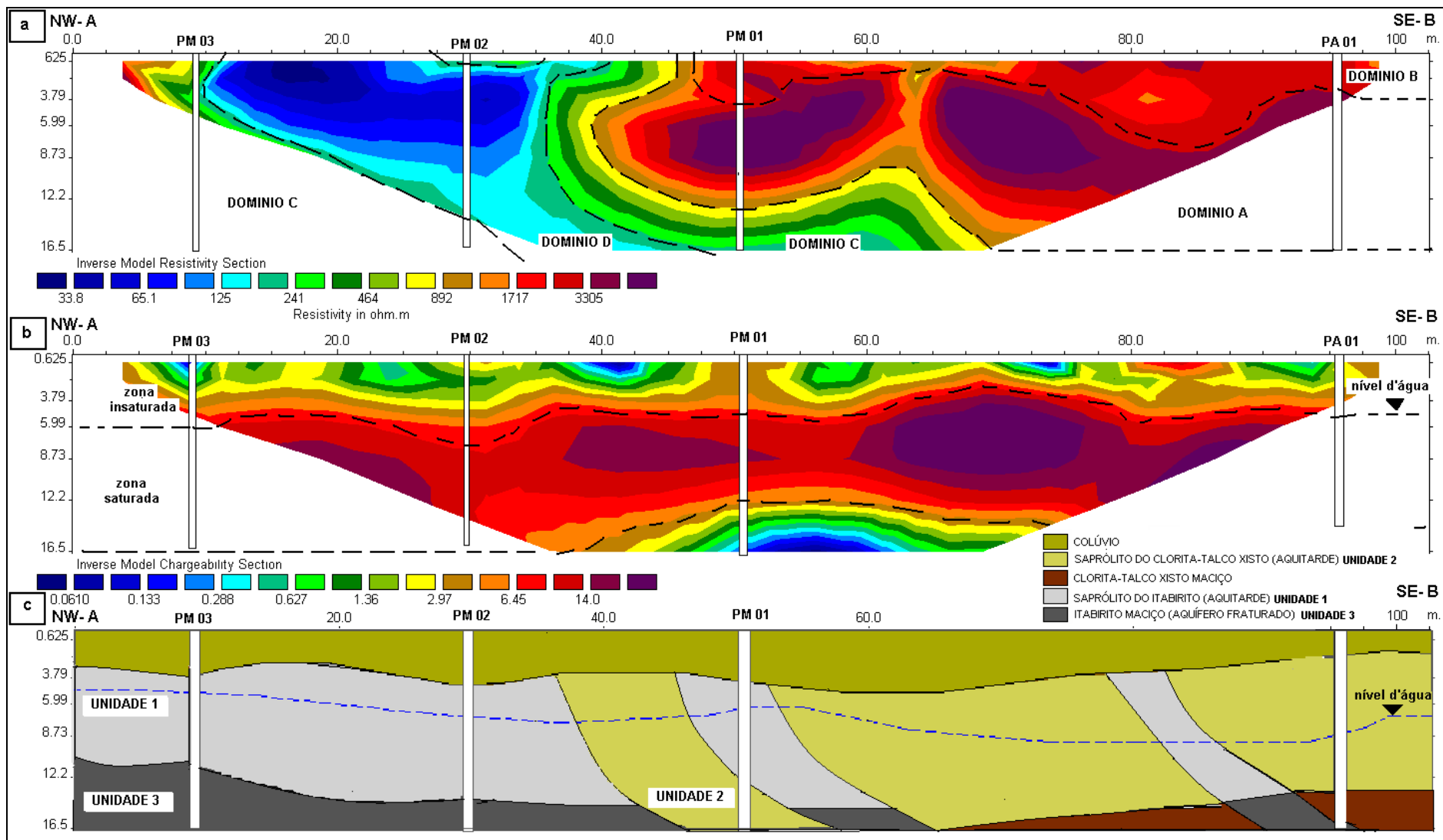


Figura 5.3: Seção A-B na área de pesquisa, sendo (a) resistividade, (b) cargabilidade e (c) perfil hidrogeológico.

Uma análise comparativa entre o perfil de cargabilidade (b) e o perfil geológico (c) da Figura 5.3 indicam que as leituras de cargabilidade apresentam bons resultados para a identificação do limite entre zona saturada e zona insaturada. O nível d'água nos poços, identificado durante a perfuração, apresentou praticamente o mesmo valor observado no perfil de cargabilidade (b). A análise do perfil de cargabilidade na seção A-B (Figura 5.1) se mostrou uma boa ferramenta no auxílio da definição da técnica de sondagem na instalação de poços, principalmente com relação à profundidade de perfuração, que foi definida a partir do valor do nível d'água previsto para cada poço pelo levantamento geofísico.

Uma análise comparativa entre o perfil de resistividade (a) e o perfil geológico (c) da Figura 5.3 indicam que a interpretação das leituras de resistividade apresentaram resultados razoáveis na definição da espessura das diferentes camadas litológicas. A interpretação das leituras de resistividade obtidas entre os poços PM 01 e PA 01 confirmam os resultados obtidos pela descrição do perfil litológico destes poços, porém os resultados obtidos nas leituras de resistividade entre os poços PM 01 e PM 03 não foram plenamente concordantes com a descrição litológica. Esta análise sugere que a aplicação desta técnica deve ser criteriosa e seus resultados devem ser usados em conjunto com outros dados para garantia de uma representação correta da área de pesquisa.

5.4 – AQUISIÇÃO GEOFÍSICA DE PERFILAGEM

O levantamento geofísico de perfilagem nesta pesquisa tem como objetivo verificar as condições construtivas dos poços, a inclinação de perfuração, as condições de desmoronamento das paredes internas, o nível d'água, a espessura das camadas e verificar a presença e localização de fraturas.

Como será descrito a seguir alguns impeditivos relativos ao perfil de perfuração dos poços tornou possível executar as quatro ferramentas de perfilagem (*caliper*, resistividade, radioatividade natural e ótica) nos quatros poços da área de pesquisa. A Tabela 5.5 apresenta a relação dos poços perfilados e as ferramentas de perfilagem utilizadas em cada um. A seguir serão apresentados os resultados das ferramentas aplicadas e discussões sobre as razões referentes às ferramentas que não puderam ser aplicadas.

Tabela 5.5: Relação dos poços perfilados e ferramentas de perfilagem utilizadas.

Poço	Ferramentas de Perfilagem			
	<i>Caliper</i>	Resistividade	Radioatividade natural	ótica
PM 01	ne	ne	ne	ne
PM 02	x	ne	ne	ne
PM 03	x	ne	x	x
PA 01	x	x	x	x
ne – não foi executado levantamento com esta ferramenta				
x – executado levantamento com esta ferramenta				

5.4.1 Resultados das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PM 01

Não foi possível realizar nenhuma perfilagem no poço de monitoramento PM 01. Ao se descer à sonda *caliper* no poço foi verificado que, a uma profundidade de 3,5 metros, houve uma queda no tensionamento do cabo de perfilagem, indicando que a ferramenta havia atingido alguma obstrução. Isto também foi verificado com o medidor de N.A. (o sensor não descia abaixo da profundidade mencionada). Desta forma, não serão apresentados resultados de perfilagem para este poço.

5.4.2 Resultados das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PM 02

A perfilagem *caliper* no poço de monitoramento PM 02 se mostrou extremamente útil, particularmente na verificação da integridade do poço e na decisão de se resguardar as outras sondas. Assim como os outros PMs, o PM 02 foi perfurado com 6 polegadas (para posterior completação com tubos de 4 polegadas). Entretanto, no intervalo de 18 a 16 metros, pode ser

observado que o diâmetro do poço decresce abruptamente para aproximadamente 4,5 polegadas, o que é inferior ao diâmetro nominal de perfuração (Figura 5.4). Isto é um indicativo de possível estrangulamento ou colapso das paredes do poço, principalmente pelo fato de que a perfilagem foi realizada imediatamente após a perfuração.

Na hipotética situação de as paredes do poço se fecharem quando a ferramenta estivesse no fundo, poderia ocorrer uma obstrução do poço e não ser possível trazer a ferramenta de volta à superfície. Assim, no sentido de não se correr riscos de perda das ferramentas, foi decidido que não seriam realizadas outras perfilagens no PM 02.

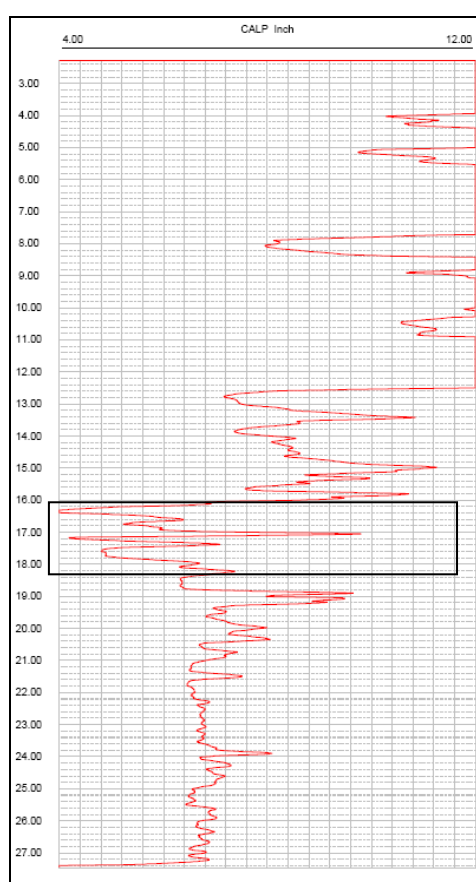


Figura 5.4: Perfil *caliper* ao longo do PM 02. Observar que entre 18 e 16 metros o diâmetro está menor que 6 polegadas indicando possível colapso nas paredes.

5.4.3 Resultados das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PM 03

A perfilagem para o PM 03 apresentou bons resultados, foi possível executar as ferramentas *caliper*, radioatividade natural e ótica. As curvas de resistividade e potencial espontâneo não apresentaram resultados válidos devido ao nível d'água do poço estar em 5,6 metros e a profundidade total atingida pela sonda ser de 15 metros. A seção não isolada do cabo de

perfilagem ficou completamente externa ao fluído dentro do poço o que impediu as leituras. Somente são possíveis leituras de resistividade e potencial espontâneo nos intervalos do poço preenchidos por fluído. A seguir serão apresentados os resultados de perfilagem obtidos pelas demais ferramentas executadas no PM 03.

5.4.3.1 Resultados de Perfilagem *Caliper* para o poço PM 03

A perfilagem *caliper* permite identificar as dimensões internas do poço e suas condições para a execução das demais ferramentas. Para o PM 03 a curva do diâmetro interno não apresentou variações significativas, com medidas entre 6,2 e 6,3 em toda sua extensão (Figura 5.5). Esta característica (variações mínimas no valor do diâmetro) seria perfeitamente compreensível no caso de um poço revestido. Entretanto, num poço não-revestido, isto é extremamente improvável, o que levou a suspeita de que, durante a descida da ferramenta, fragmentos de solo e lama tivessem penetrado entre as articulações dos braços da sonda. Esta suspeita foi confirmada quando a ferramenta foi trazida de volta à superfície: havia mesmo grande quantidade de lama nas articulações. Mais 2 tentativas posteriores foram efetuadas, mas os resultados foram os mesmos. Porém, como o diâmetro do poço não se mostrou menor que o nominal, optou-se pela execução de leitura das demais ferramentas de perfilagem, para as quais os resultados são apresentados a seguir.

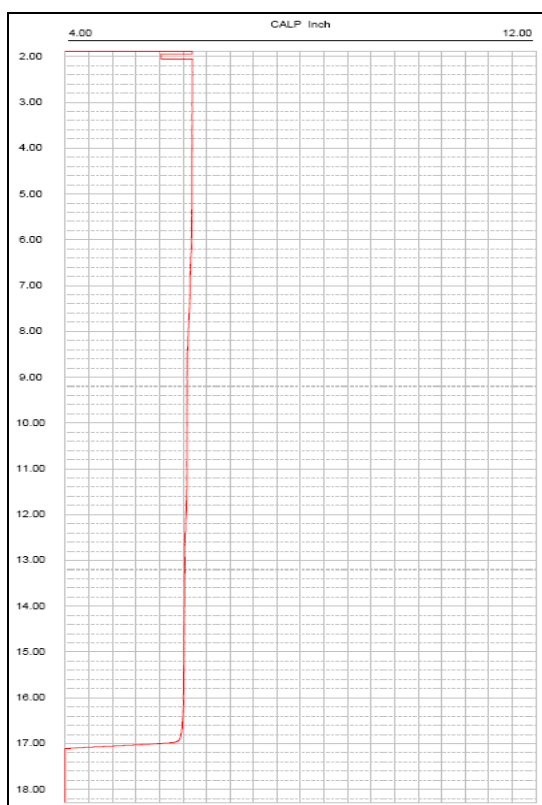


Figura 5.5: Perfil *caliper* ao longo do poço PM 03.

5.4.3.2 Resultados de Perfilagem Gama para o Poço PM 03

Os valores de gama natural para o PM 03 apresentam dois intervalos de variação de leituras, o intervalo superior de 0 a 8,40m característico de material mais argiloso (saprólito do itabirito) e o intervalo inferior de 8,40 a 15m característico de material maciço (itabirito fraturado) (Figura 5.6). Este resultado era esperado devido às informações obtidas a partir do perfil litológico deste poço.

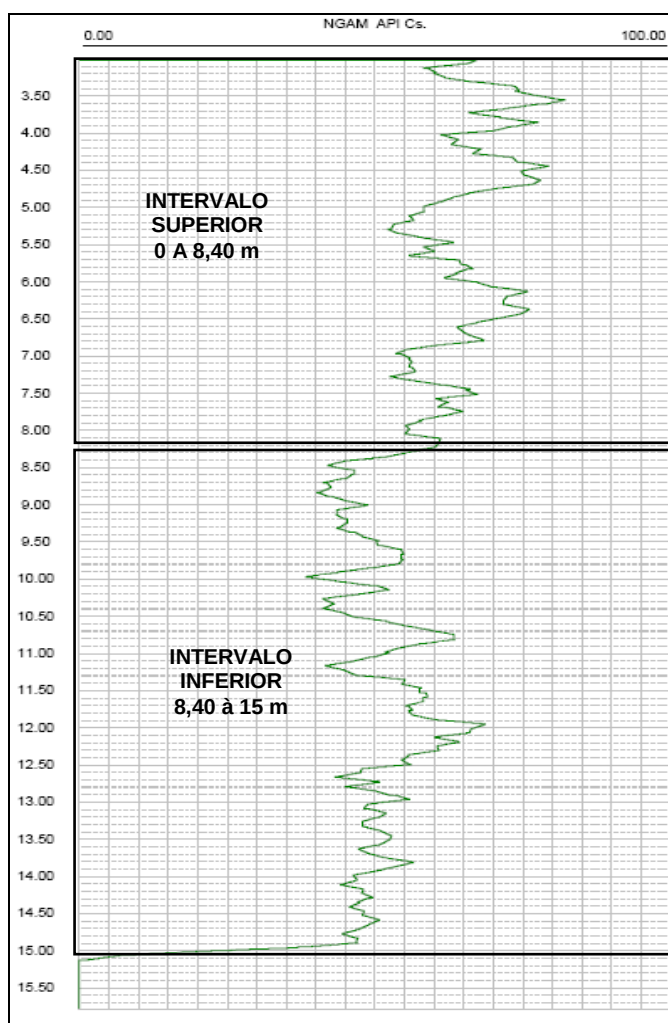


Figura 5.6: Perfilagem gama ao longo do poço PM 03.

5.4.3.3 Resultados de Perfilagem Ótica para o poço PM 03

A perfilagem ótica no PM 03 apresentou bons resultados, permitindo a visualização das paredes do mesmo, porém somente acima do nível d'água (N.A.) (Figura 5.7). Abaixo do

nível d'água, localizado em aproximadamente 5,6 metros, não foi possível a obtenção de imagens, devido à elevada turbidez do fluido no interior do poço (Figura 5.8).

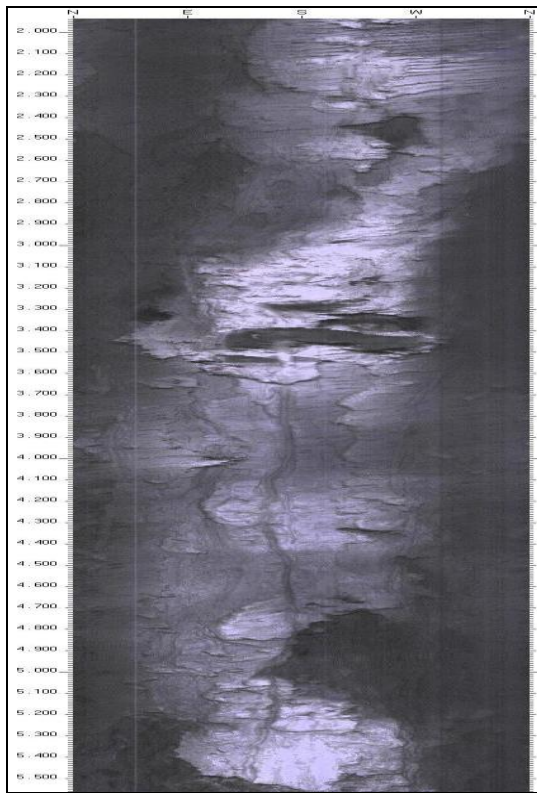


Figura 5.7: Perfilagem ótica do PM 03 acima do N.A.

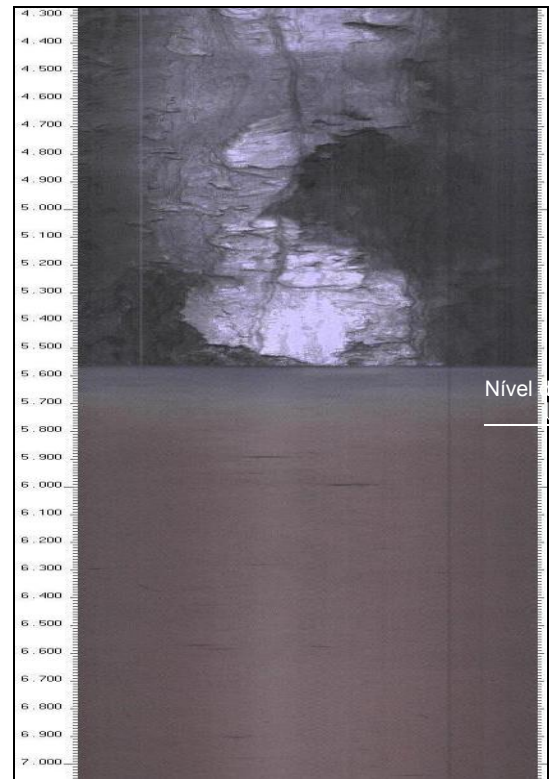


Figura 5.8: N.A. do PM 03 em 5,6 m. Observar a elevada turbidez do fluido.

Com as informações obtidas pelos acelerômetros e magnetômetros, foi possível constatar que o poço apresenta geometria praticamente vertical, com inclinação máxima de 1 grau. A representação espacial do poço está apresentada na figura 5.9.

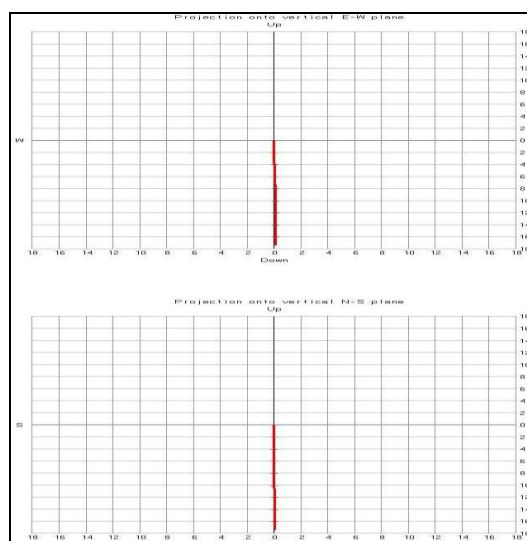


Figura 5.9: Projeção ortográfica do poço PM 03 nos planos E-W e N-S.

5.4.4 Resultados das Aquisições Geofísicas de Perfilagem para o poço PA 01

O poço PA 01 apresentou as melhores condições de perfilagem, com bons resultados para as quatro ferramentas executadas (*Caliper*, resistividade, radioatividade natural e ótica). Os resultados de cada ferramenta são apresentados e discutidos a seguir.

5.4.4.1 Resultados de Perfilagem *Caliper* para o poço PA 01

A sonda caliper foi a primeira a ser utilizada no poço, principalmente para identificar se havia alguma obstrução, estrangulamento, ou qualquer outra condição no poço que pudesse representar um potencial risco para as demais ferramentas a serem utilizadas em seguida. O perfil *caliper* obtido é apresentado na Figura 5.10.

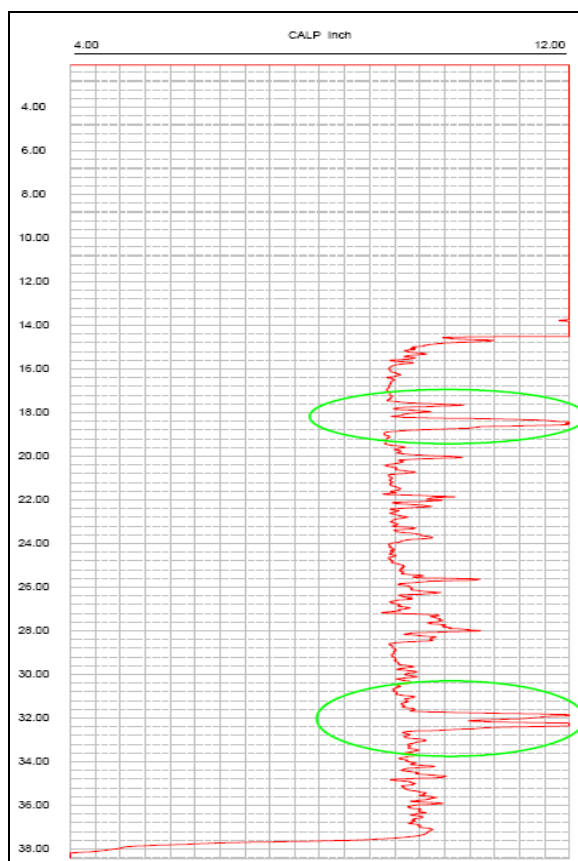


Figura 5.10: Perfil *caliper* ao longo do PA 01. Em destaque ocorrências de fraturas.

O perfil *caliper* apresentou variações expressivas no diâmetro interno ao longo de todo o poço. Particularmente, na mudança litológica da região de rocha sã para a região da rocha alterada (a transição ocorre em aproximadamente 15 metros), verifica-se um aumento significativo do diâmetro do poço. Isto pode ser explicado devido à rocha alterada, menos consolidada que a rocha sã, poder sofrer maior desgaste do que esta última, quando perfurado

pela sonda. Na região de rocha (abaixo de 15 metros), o diâmetro do poço também sofre variações (o que é perfeitamente normal em poços abertos), porém bem menos pronunciadas.

A principal característica do perfil *caliper* do poço PA 01 foram às variações observadas no diâmetro do poço no intervalo de rocha sã, em aproximadamente 18 e 32 metros. Estas variações foram justamente nas profundidades em que a descrição da sondagem apontou entrada de água no poço. Esta conjunção de fatores nos leva a crer que são nestas profundidades que estão localizadas as maiores fraturas deste poço, o que é de suma importância na definição da completação do mesmo.

5.4.4.2 Resultados de Perfilagem para Resistividade, SP e Gama do poço PA 01

Devido à ferramenta ELOG captar simultaneamente, as curvas gama, potencial espontâneo (SP) e resistividades, os resultados referentes às leituras serão apresentados em conjunto (Figura 5.11).

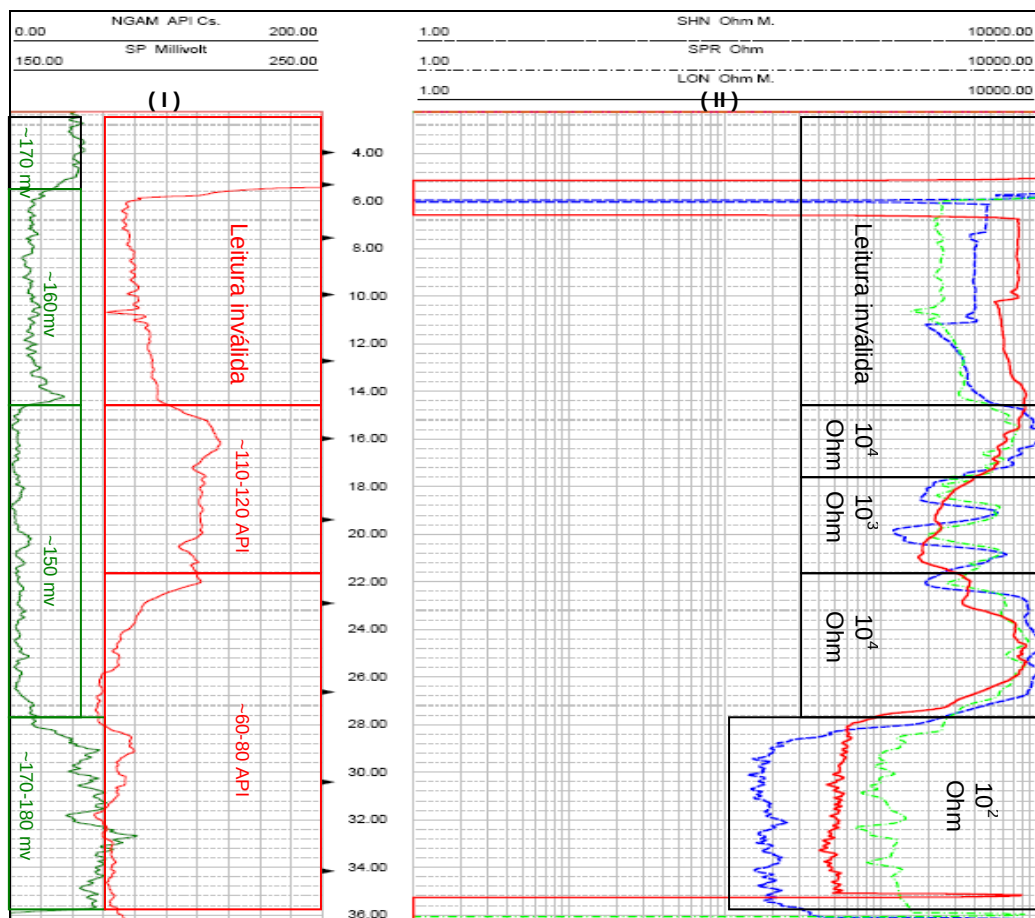


Figura 5.11 - Perfilagem com a ferramenta ELOG. I curva gama natural e SP (vermelha e verde). II curva de resistividade curta, longa e resistência pontual (azul, vermelha e verde).

A Figura 5.11 apresenta dois perfis. O perfil I apresenta as leituras de potencial espontâneo (SP) em milivolts e radioatividade natural gama em API, respectivamente curva verde e vermelha. O perfil II apresenta as leituras de resistividade curta, longa e resistência pontual em Ohm.m, respectivamente curva azul, vermelha e verde.

Analisando-se o perfil I para leituras de potencial espontâneo SP, pode-se definir quatro intervalos com leituras: 170 mv (0 a 6m), 160 mv (6 a 15m), 150 mv (15 a 28m) e 170-180 mv (28 a 36m). Cada intervalo será interpretado conforme Souza (2005) e Oliveira 2005 identificando os tipos de matérias referentes a cada leitura. O perfil I de gama natural apresentou dois intervalos de leituras, o início da seção até 15 metros os dados são inválidos devido a não ter presença de fluido neste intervalo, o primeiro intervalo com leituras de 110 – 120 API (15 a 23m) e o segundo com leituras de 170 a 180 API (23 a 36m). Cada intervalo será interpretado conforme Souza (2005) identificando os tipos de matérias referentes a cada leitura.

O perfil II de resistividade apresentou quatro intervalos de leitura. Os dados do intervalo de 0 a 15 metros da seção são inválidos. As leituras dos 4 intervalos seguintes são: 10^4 Ohm.m (15 a 17m), 10^3 Ohm.m (17 a 23m), 10^4 Ohm.m (23 a 28m), 10^2 Ohm.m (28 a 36m). Cada intervalo será interpretado conforme Telford *et al* (2009) in Oliveira (2005), Souza (2005) e Oliveira 2005 identificando os tipos de matérias referentes a cada leitura (Figura 5.11). A Tabela 5.6 apresenta a interpretação dos dados de leitura de resistividade, potencial espontâneo e gama natural para o PA 01.

Tabela 5.6: Interpretação dos dados de leitura de resistividade e radioatividade natural para o poço PA 01 e sua relação com o perfil geológico.

Interpretação das leituras de resistividade e radiatividade conforme autores							
Intervalo (m)	Perfil litológico	Souza (2005)			Oliveira (2005)		Telford <i>et al</i> (1990)
		Res. (Ohm)	SP (mv)	Rad. (API)	Res. (Ohm)	Rad. (mv)	Res. (Ohm)
0-5	Colúvio	Seção inválida	Areia seca	Seção inválida	Seção inválida	Arenito	Seção inválida
	Sap. Xisto		Areia com água doce				
5-15	Sap. Xisto			Areia argilosa com água doce	Calcáreo	Calcáreo	Xisto
15-17	Xisto sã	Arenito					Argila consolidada
17-23	Sap. Itabirito			Areia com água doce	Calcáreo	Xisto	
23-28	Itabirito	Areia argilosa com água doce	Arenito			Siltito	Bauxita
28-36	fraturado			Argila			

Res. – resistividade em Ohm.m
Rad – radioatividade gama natural em milivolts
SP – potencial espontâneo em API

Pode-se observar que a interpretação segundo Telford *et al.* (1990) *in* Souza (2005) para a resistividade é a que melhor se aproxima das condições observadas pela descrição litológica, a presença do xisto e o do saprólito de itabirito (argila consolidada) marcou o contato exato entre estas duas unidades. A interpretação de Souza (2005) para resistividade Potencial espontâneo e radioatividade natural foi a que melhor retratou as condições aquíferas do poço, identificando o limite entre a zona insaturada e zona saturada, e o limite entre os dois aquíferos representados pelo saprólito de xisto (areia argilosa com água doce) e o aquífero inferior do itabirito fraturado (areia com água doce). As interpretações segundo Oliveira (2005) não apresentaram bons resultados.

O método de perfilagem para leituras de resistividade e radioatividade apresentou bons resultados na identificação das diferentes unidades litológicas em subsuperfície. Porém deve-se definir uma classificação que seja adequada para as condições da área de pesquisa, do contrário os resultados não serão interpretados corretamente.

Para a identificação das características do meio aquífero o método de perfilagem por leituras de resistividade e radioatividade natural apresentou bons resultados, indicando o limite entre zona saturada e insaturada e sua granulometria.

5.4.4.3 Resultados de Perfilagem ótica para o poço PA 01

A perfilagem ótica foi realizada ao longo de todo o poço. Conforme previsto, devido ao elevado diâmetro (constatado após a perfilagem caliper), associado à elevada turbidez da água, a sonda OPTV não forneceu imagens ideais das paredes do poço, e não permitiu a visualização das fraturas. Mesmo assim, foi possível observarmos algumas características interessantes. É possível averiguar que o N.A. do poço estava estabilizado em 6,4 metros (Figura 5.12), o que estava em concordância com o valor determinado pelo medidor de N.A..

Com a perfilagem ótica, foi possível distinguir a transição entre o solo e a rocha em aproximadamente 14,5 metros de profundidade, o que pode ser observado na Figura 5.13. Esta profundidade se aproxima bastante da profundidade em que houve a mudança nos valores de gama natural e resistividade, demonstrando uma grande correlação entre as perfilagens realizadas com as diferentes ferramentas.

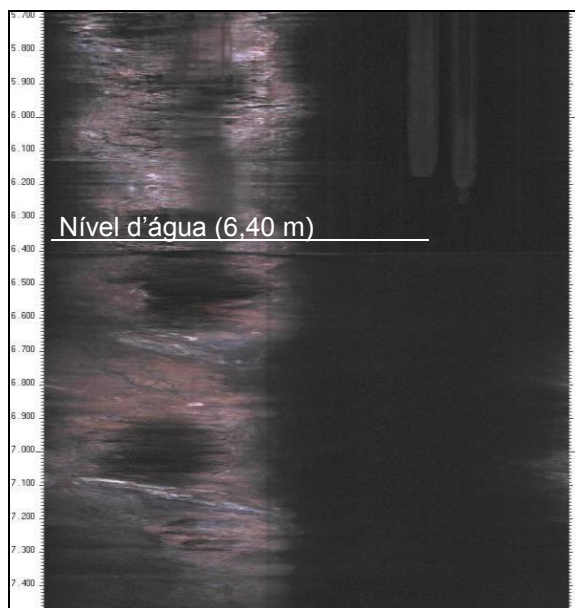


Figura 5.12: Nível d'água do poço PA 01 em 6,4 metros.

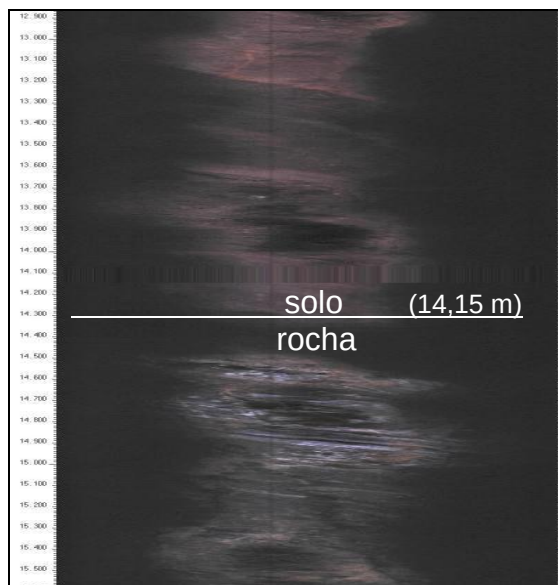


Figura 5.13: Transição entre solo e rocha a 14,5 metros, observada a partir da diferença de coloração entre as camadas

A ferramenta D-OPTV fornece, além de 360° de imagem contínua das paredes do poço, a visualização do posicionamento do poço no espaço através das informações geradas pelo conjunto de acelerômetros e magnetômetros triaxiais. Pode-se verificar que o poço apresentou a 25 metros uma inclinação máxima de 8,4 graus na direção SW, conforme ilustra a Figuras 5.14. Além disso, pode-se constatar também que o poço apresenta uma trajetória curva; em outras palavras, a inclinação aumenta a partir da superfície e, após atingir o seu máximo, decresce à medida que se aprofunda o poço.

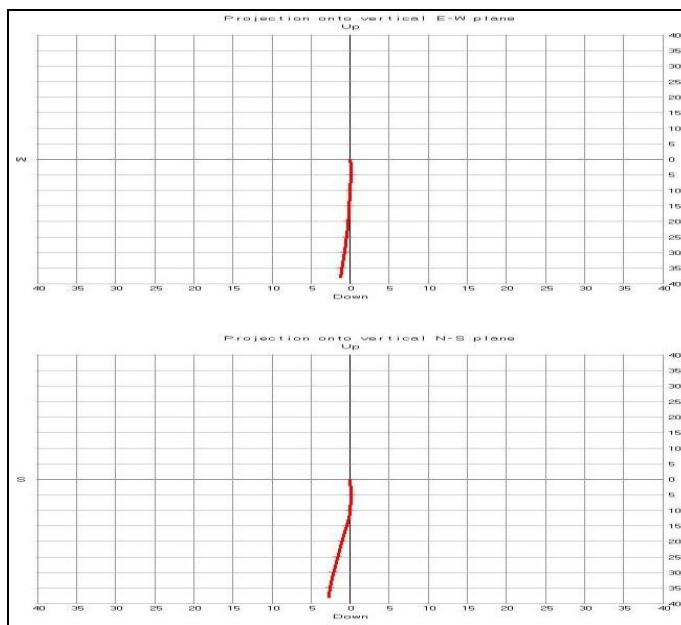


Figura 5.14: Projeção ortográfica do poço PA 01 nos planos E-W e N-S.

5.5 – COMPLETAÇÃO DOS POÇOS

A definição do perfil de completação dos poços é de extrema importância, pois todos ensaios hidrogeológicos e hidroquímicos serão executados nestes poços e refletem as condições aquíferas relativas ao intervalo onde a água está sendo ensaiada em subsuperfície. Os ensaios foram executados no intervalo da seção filtrante instalada no poço e refletem as condições específicas da unidade aquífera captada. Com base nos resultados obtidos nos levantamentos geofísicos, na descrição litológica dos testemunhos coletados na sondagem e nas informações obtidas no mapa e perfil geológico, foi possível definir a completação dos poços. A Tabela 5.7 apresenta um quadro resumo com os dados coletados.

Tabela 5.7 – Quadro resumo dos resultados obtidos nos métodos de eletroresistividade, perfilagem e sondagem aplicados aos poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA01 para a caracterização do aquífero da área de estudo.

POÇO	LITOLOGIA (metros)			Nível d'água (N.A. em metros)		
	Sondagem	Eletroresistividade	Perfilagem	Sondagem	Eletroresistividade	Perfilagem
PM 01	0 a 4 colúvio	0 a 4 muito arenoso	não foi executada	5,07	5,00	não foi executada
	4 a 12 saprólito de itabirito	4 a 12 arenoso				
	12 a 18 saprólito do clorita-talco xisto	12 a 16 pouco arenoso				
PM 02	0 a 4 colúvio	0 a 2 pouco arenoso	não foi executada	5,63	7,00	não foi executada
	4 a 15 saprólito do itabirito	2 a 12 rocha sã				
	15 a 21 Itabirito					
PM 03	0 a 3 colúvio argiloso	0 a 3 pouco arenoso	0 a 15 argiloso	4,94	5,00	5,60
	3 a 4 saprólito do itabirito argiloso					
	4 a 21 Itabirito					
PA 01	0 a 1 colúvio	0 a 3 muito arenoso	0 a 14 solo	6,89	7,00	6,40
	1 a 12 saprólito de talco xisto	3 a 12 muito arenoso	14 a 40 rocha (18 fratura 32 fratura)			
	12 a 16 clorita - talco xisto					
	16 a 40 Itabirito					

O PM 01 possui duas unidades aquíferas. A unidade superior, o aquífero no saprólito do itabirito e inferior aquífero no saprólito do clorita-talco xisto. Como forma de observar o comportamento do aquífero da unidade inferior, o intervalo de filtro foi instalado acompanhando a camada desta unidade, desta forma os ensaios de permeabilidade neste poço irão representar a condutividade hidráulica do aquífero do saprólito do clorita-talco xisto. A Figura 5.14 apresenta o perfil litológico e construtivo do poço PM 01.

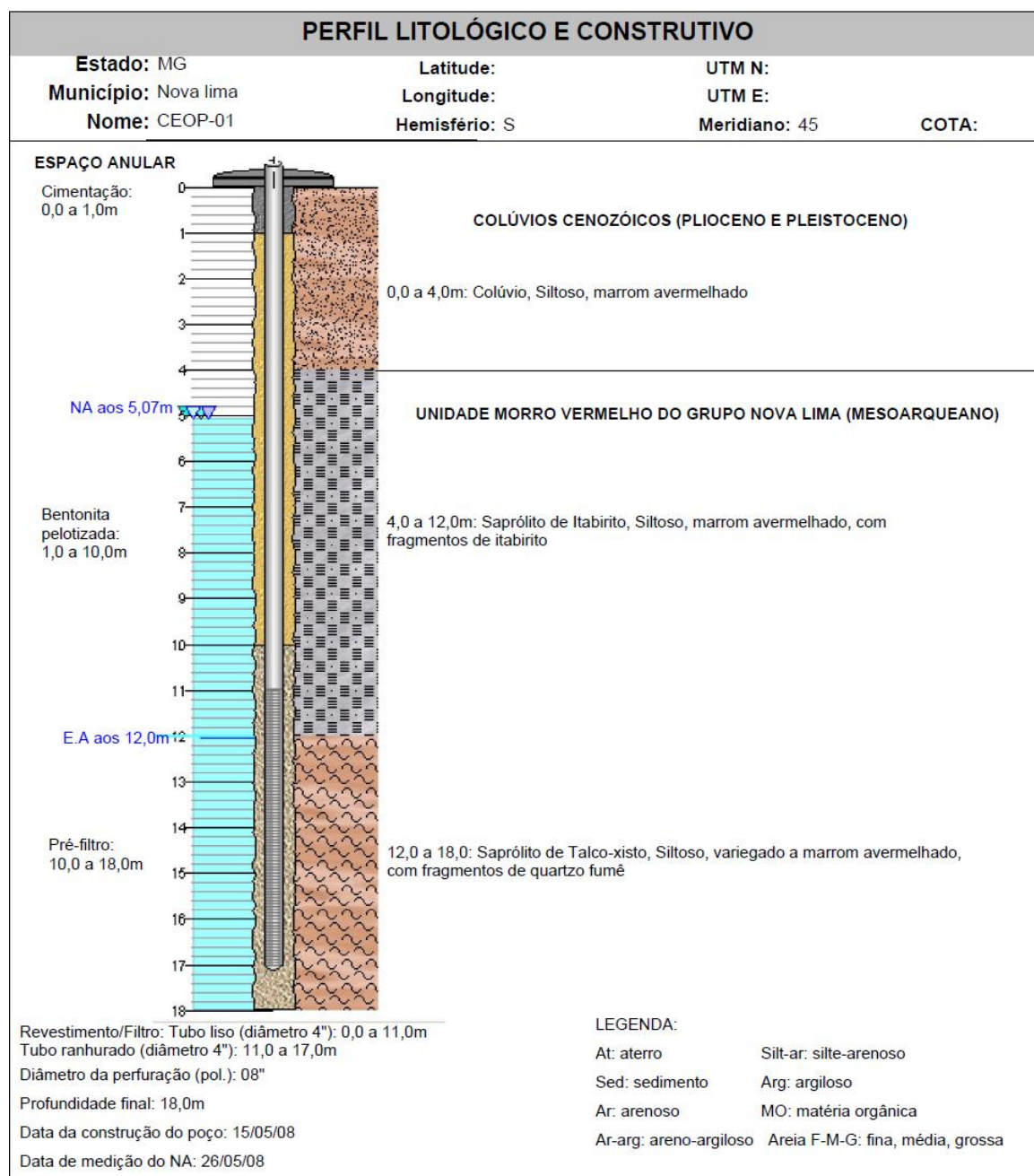


Figura 5.15: Perfil litológico e construtivo do poço PM 01.

O PM 02 possui duas unidades aquíferas. A unidade superior é formada pelo saprólito do itabirito. A unidade inferior é formada pelo itabirito fraturado. Foi definida a instalação da seção filtrante no aquífero inferior, desta forma os ensaios para cálculo da condutividade hidráulica irão representar o comportamento da unidade aquífera do itabirito fraturado. A Figura 5.16 apresenta o perfil litológico e construtivo do poço PM 02.

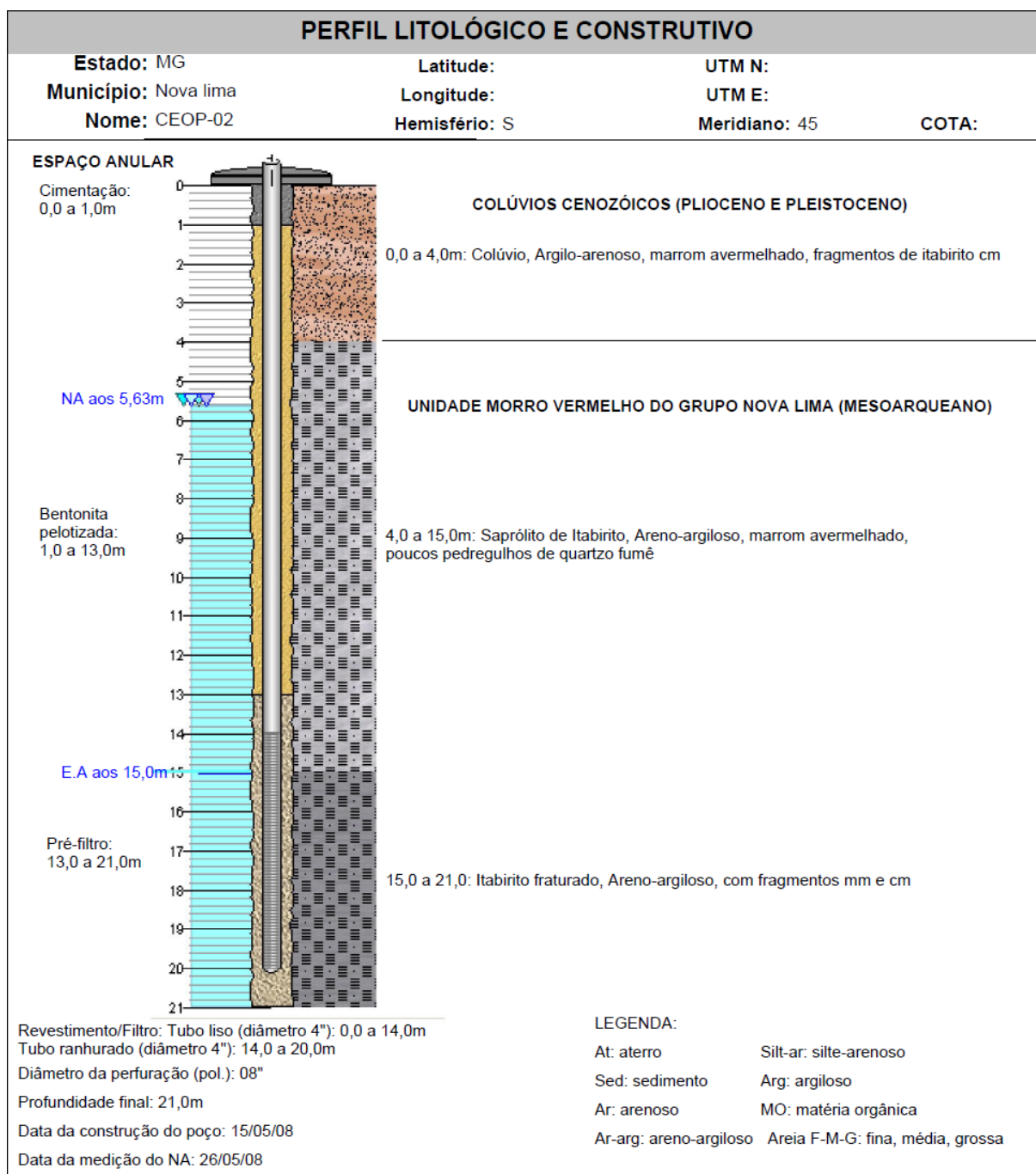


Figura 5.16: Perfil litológico e construtivo do poço PM 02.

O PM 03 possui duas unidades aquíferas. A unidade superior é formada pelo saprólito do itabirito. A unidade inferior é formada pelo itabirito fraturado. Foi definida a instalação da seção filtrante no aquífero inferior, desta forma os ensaios para cálculo da condutividade hidráulica irão representar o comportamento da unidade aquífera do itabirito fraturado. A Figura 5.17 apresenta o perfil litológico e construtivo do poço PM 03.

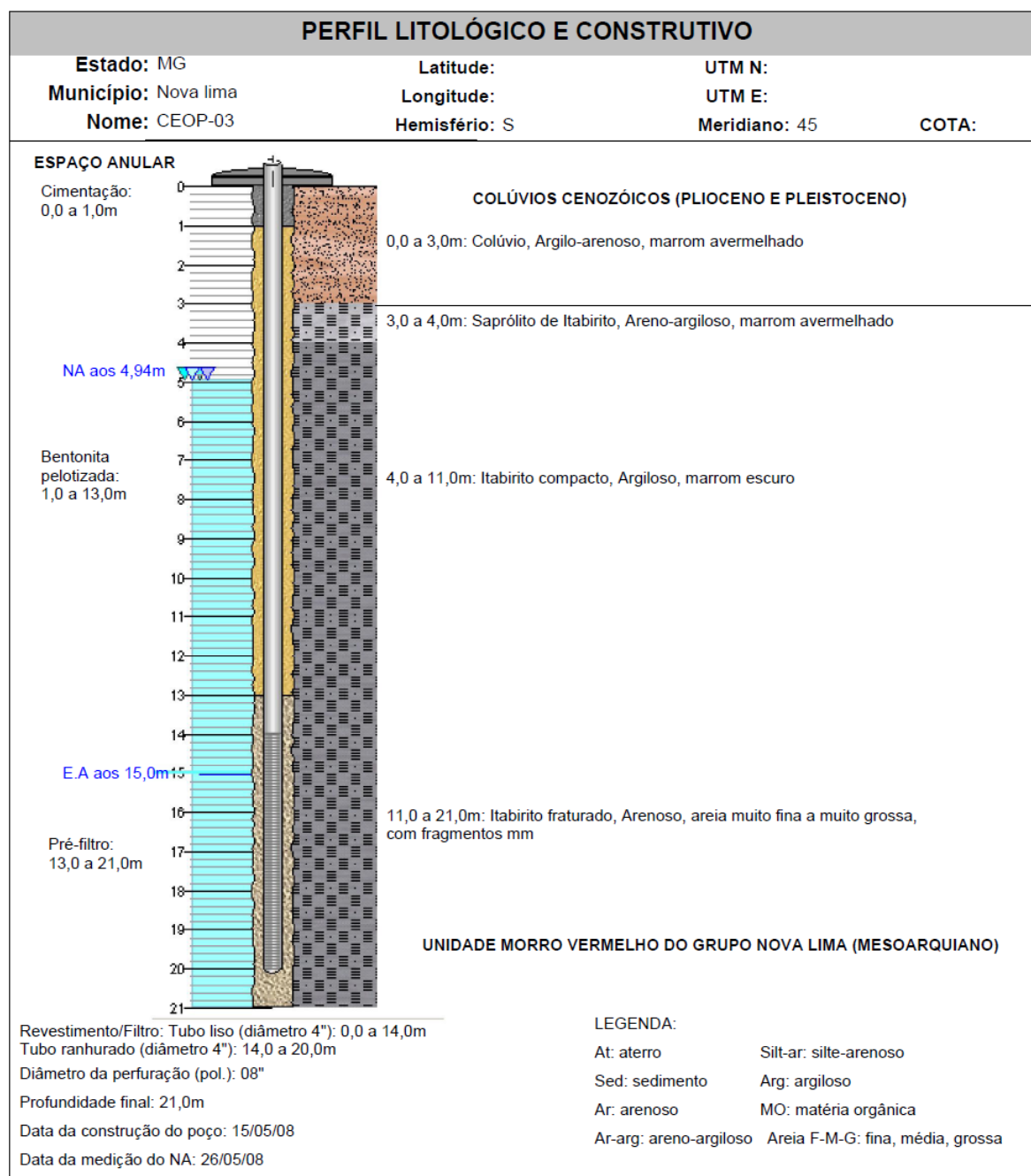


Figura 5.17: Perfil litológico e construtivo do poço PM 03

O PA 01 apresenta duas unidades aquíferas distintas e uma camada semipermeável entre as duas unidades. A unidade superior é formada pelo saprólito do clorita-talco xisto, a unidade semipermeável é formada pelo clorita-talco xisto maciço e a unidade inferior pelo itabirito fraturado. Foi definida a instalação de duas seções filtrantes para captação de água no aquífero fraturado em dois intervalos de fraturas. Os ensaios para cálculo da condutividade hidráulica neste poço representam as características exclusivamente do aquífero fraturado do itabirito.

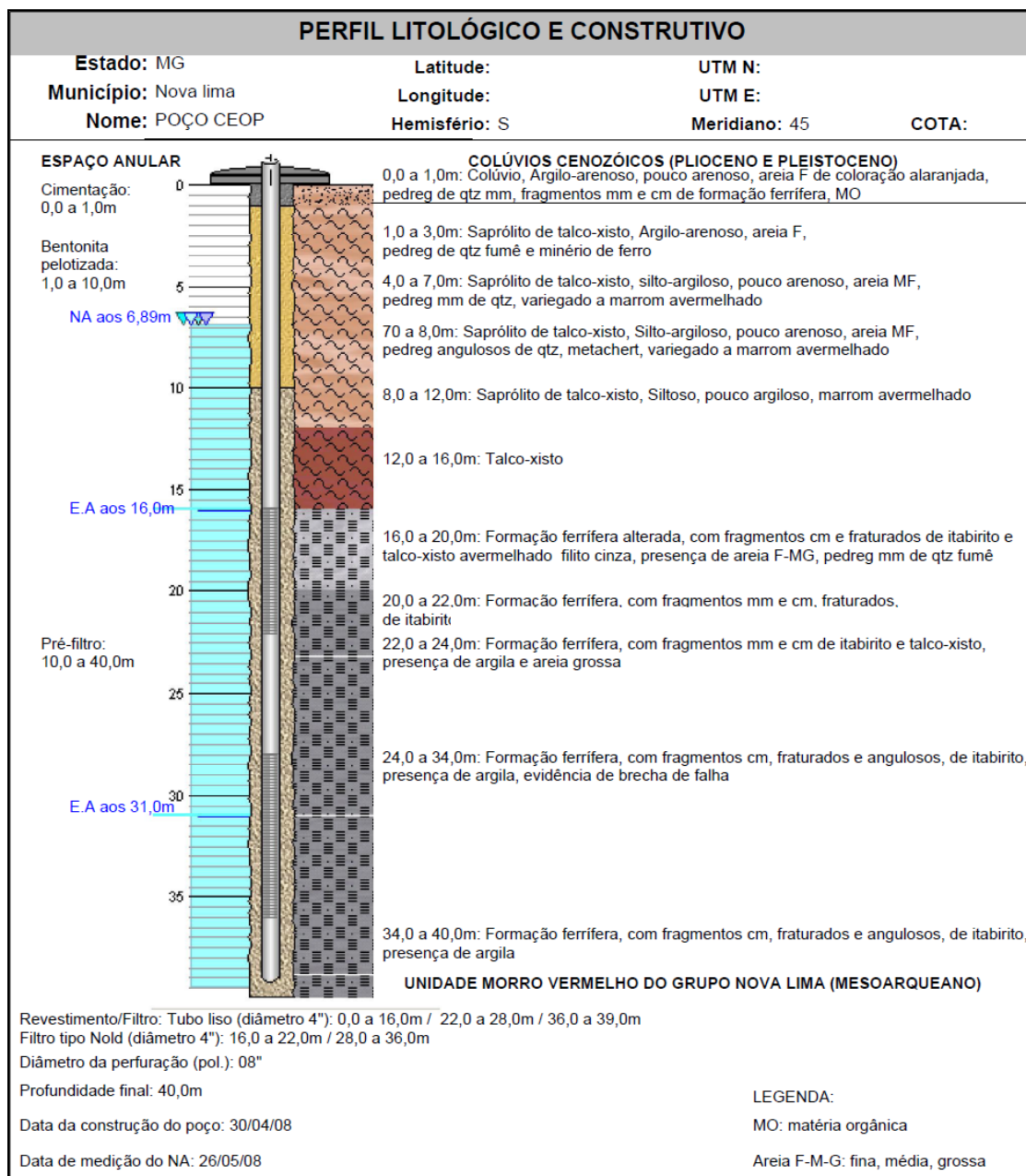


Figura 5.18: Perfil litológico e construtivo do poço PA 01.

5.6 – HIDROGEOLOGIA

O principal objetivo desta pesquisa é a caracterização das condições hidrogeológicas do aquífero. Neste sentido as demais metodologias aplicadas tiveram o objetivo de gerar informações que auxiliaram na definição de materiais e métodos para execução dos ensaios hidrogeológicos e hidroquímicos. Como resultado dos ensaios anteriormente mencionados foi possível determinar várias características do aquífero da área de pesquisa são elas:

- Vazão de exploração para o poço PA 01 através do teste de vazão com regime de bombeamento de 24 hs.
- Condutividade hidráulica das unidades aquíferas através do *Bail test* executado em cada poço de monitoramento separadamente.
- Transmissividade e condutividade hidráulica do aquífero fraturado do itabirito através do ensaio de bombeamento.
- Direção do fluxo subterrâneo através da carga hidráulica calculada para cada poço separadamente.

Os resultados obtidos e sua análise são apresentados a seguir.

5.6.1 Teste de Vazão para o poço PA 01

O poço PA 01, conforme apresentado em seu perfil litológico e construtivo (Figura 5.18), foi instalado com dois intervalos de seção filtrante de 16,00 a 22,00 m e de 28,00 a 36,00 m. Estes dois intervalos têm como objetivo, captar água em uma única unidade aquífera formada pelo itabirito fraturado. O teste de vazão tem como objetivo identificar a vazão máxima de exploração e a partir deste valor dimensionar a potência da bomba submersa a ser instalada no poço PA 01. A bomba submersa será usada no teste de bombeamento e para futura exploração do poço.

O teste de vazão foi executado com um compressor através do bombeamento contínuo do poço PA 01 por um período de 24 hs. A Tabela 5.8 apresenta os resultados obtidos no teste que identificou, a vazão do poço, o nível estático e o nível dinâmico. O nível estático encontrado para

o poço PA 01 é de 6,30 metros e o nível dinâmico de 9,70 metros, apresentando um desnível total de 3,40 metros. A vazão máxima de exploração, vazão onde o poço estabilizou seu rebaixamento, é de 6,30 m³/h. Baseado nestes dados foi instalada uma bomba submersa com capacidade de bombeamento de até 4 m³/h, vazão menor que o valor máximo de exploração e suficiente para atender a demanda da empresa, garantindo que o bombeamento não irá ultrapassar o valor de recarga do aquífero.

Tabela 5.8: Teste de vazão para o poço PA01

TESTE DE BOMBEAMENTO					Poço nº	PA 01		
Cliente: Georadar S/A				Local: Nova Lima/MG			Profundidade: 40 metros	
Nível Estático: 6,30 metros				Nível Din.: 9,70 metros		Saliência de Teste: 01 metro		
Equipamento do teste:				Horário de início:		Horário de teste:		
Compressor PEG 60 PCM				08:00 horas		:24:00 horas		
Tempo (minutos)	N.D. (m)	Vazão (m³/h)	Tempo (seg.)	Hora Local	N.D. (m)	Vazão (m³/h)	Tempo (minutos)	N.A. (m)
1	6.50	8.60	41.86	08:01			1	9.50
2	6.50	8.40	42.86	08:03			3	9.10
5	6.80	8.10	44.44	08:05			5	8.80
10	7.60	7.80	46.15	08:10			10	8.30
15	7.80	7.60	47.37	08:15			15	7.40
20	7.80	7.60	47.37	08:20			20	7.30
25	7.90	7.40	48.65	08:25			30	7.05
30	8.10	7.30	49.32	08:30			40	6.90
40	8.40	6.90	52.17	08:40			50	6.85
50	8.40	6.90	52.17	08:50			60	6.50
60	8.75	6.80	52.94	09:00			80	6.40
80	9.10	6.60	54.55	09:20			100	6.30
100	9.10	6.60	54.55	09:40			120	6.30
120	9.40	6.40	56.25	10:00			150	6.30
150	9.70	6.30	57.14	10:30			180	6.30
180	9.70	6.30	57.14	11:00			240	6.30
240	9.70	6.30	57.14	12:00				
300	9.70	6.30	57.14	13:00				
360	9.70	6.30	57.14	14:00				
420	9.70	6.30	57.14	15:00				
500	9.70	6.30	57.14	16:20				
600	9.70	6.30	57.14	18:00				
720	9.70	6.30	57.14	20:00				
800	9.70	6.30	57.14	21:20				
900	9.70	6.30	57.14	23:00				
1000	9.70	6.30	57.14	24:00				
1200	9.70	6.30	57.14	04:00				
1440	9.70	6.30	57.14	08:00				
							Data: 27 de maio de 2008	

5.6.2 Bail test

O ensaio *Bail test* é um ensaio pontual, que tem como objetivo obter a condutividade hidráulica da unidade aquífera onde está instalado o intervalo filtrante do poço ensaiado. O ensaio foi aplicado nos 3 poços de monitoramento PM 01, PM 02 e PM 03. O PM 01 tem a seção filtrante instalada no aquífero granular, formado pelo clorita-talco xisto, desta forma o resultado de

condutividade hidráulica irá representar este aquífero. Para os poços PM 02 e PM 03 a seção filtrante está instalada no aquífero fraturado do itabirito assim os resultados de condutividade hidráulica serão representativos para este aquífero. Os dados obtidos nos ensaios foram tratados pelo programa *Aquífer Test*, pelo método de Hvorslev, conforme definido na metodologia.

A Figura 5.19 apresenta a curva referente ao *Bail test* executado no PM 01 o valor de condutividade hidráulica obtido é de $4,20 \times 10^{-4}$ m/s, ou seja, uma condutividade média característica de materiais silte arenosos ou areias argilosas (Cabral 2008). No perfil litológico do PM 01 (Figura 5.15) pode-se observar que a unidade aquífera onde está inserida a seção filtrante é formada pelo saprólito do clorita-talco xisto caracterizado como siltoso, confirmando, pela sua composição, o valor de condutividade hidráulica obtida neste ensaio.

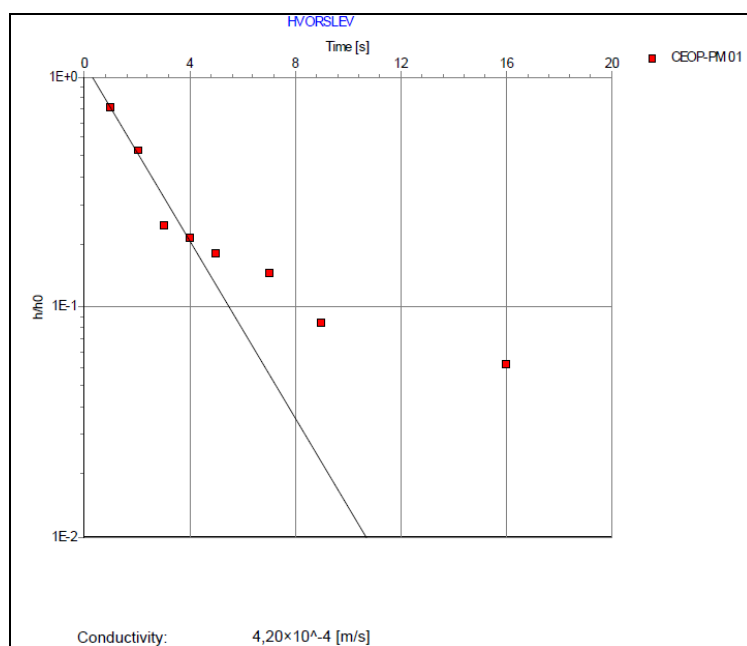


Figura 5.19: Condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev - PM 01.

Uma análise comparativa entre os dados bibliográficos (Cabral 2008) e os dados obtidos pelo ensaio indicam que a condutividade hidráulica obtida é coerente com o tipo de material de composição do aquífero. Desta forma pode-se concluir que o ensaio *Bail test* para o PM 01 apresentou bons resultados encontrando um valor de condutividade hidráulica coerente para o aquífero granular formado pelo saprólito do clorita-talco xisto.

O ensaio *Bail test* executado no PM 02 não apresentou bons resultados. Após a remoção do volume de água previsto houve uma recuperação muito rápida de seu nível estático. Desta forma não foi possível obter uma curva representativa para o cálculo de condutividade hidráulica. Os resultados obtidos no ensaio do PM 02 foram desconsiderados nesta pesquisa.

A Figura 5.20 apresenta a curva referente ao *Bail test* executado no PM 03. Como pode ser observado no perfil litológico do PM 03 (Figura 5.17) a unidade aquífera onde está instalada a seção filtrante é formada pelo itabirito fraturado. O valor de condutividade hidráulica para este aquífero é de $1,15 \times 10^{-5}$ m/s. Os valores de condutividade hidráulica previstos por Mourão (2007) para esta unidade aquífera são da ordem de 10^{-6} a 10^{-8} m/s, ou seja, o valor encontrado no ensaio difere bastante do esperado. Como foi apresentado na revisão bibliográfica, por ser um ensaio pontual, o *Bail test* poderá não representar as verdadeiras condições hidráulicas do aquífero. Para uma melhor avaliação da condutividade hidráulica de um aquífero, conforme afirmam Filho *et al.* (1971), é indicada a execução do teste de bombeamento. Este teste foi executado e seus resultados são apresentados a seguir.

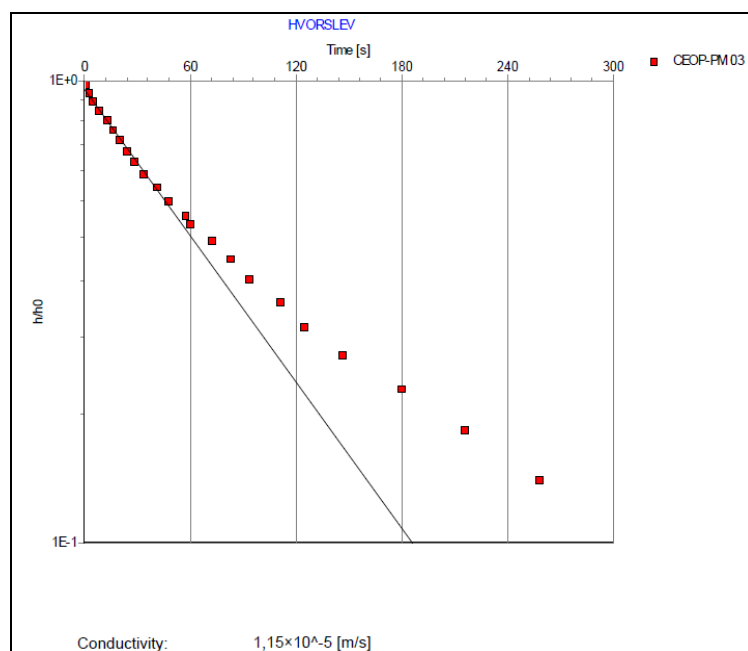


Figura 5.20: Condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev - PM 03.

5.6.3 Teste de Bombeamento

O teste de bombeamento é o ensaio que melhor representa as condições hidráulicas de um aquífero. Este teste considera as características não apenas do poço bombeado, mas também a influência deste bombeamento em poços de observação distribuídos no entorno do poço bombeado (Filho *et al.* 1971). O poço PA 01, onde foi instalada a bomba submersa, foi escolhido para ser bombeado. Os poços PM 01, PM 02 e PM 03 foram definidos como poços de observação e seus níveis d'água foram monitorados durante todo ensaio. As planilhas de acompanhamentos dos poços de observação e do poço PA 01 se encontram no anexo 1.

Feitosa *et al.* (2008) apresentam várias formas de tratamento dos dados do ensaio de bombeamento, conforme descrito no capítulo 3. Para a escolha de qual método aplicar, foram consideradas as condições do aquífero fraturado de itabirito. Este aquífero é classificado como livre devido à pressão exercida na superfície aquífera ter o mesmo valor da pressão atmosférica. Outra característica importante para a definição do método de tratamento dos dados é o regime de bombeamento, que neste caso é transiente, onde com o aumento do bombeamento o cone de rebaixamento aumenta progressivamente. Com base nestas condições e analisando as indicações de Feitosa *et al.* (2008) foi escolhido o método de Theis para o tratamento dos dados pelo programa *Aquifer Test*.

O gráfico com os resultado de tempo x nível d'água para o teste de bombeamento é apresentado na Figura 5.21. Pode-se observar que os poços PM 01 e PM 02 sofreram maior influência do bombeamento do poço PA 01. O PM 01 apresentou desnível de 0,82 metros passando do nível estático de 5,33 m para o nível dinâmico no final do bombeamento de 6,15 m. Este poço tem sua seção filtrante instalada no aquífero granular do saprólito do clorita-talco xisto. Esta unidade aquífera está localizada acima da unidade do aquífero fraturado de itabirito. Este resultado indica que os dois aquíferos são comunicantes, ou seja, um bombeamento no aquífero inferior irá provocar rebaixamento no aquífero superior. Outra razão para este rebaixamento observado no PM 01 está relacionada a seu posicionamento quanto ao PA 01(poço bombeado), quanto mais próximo o poço de observação estiver do poço bombeado maior será a influência em seu rebaixamento. Devido ao PM 01 ser o mais próximo do poço bombeado, conseqüentemente irá apresentar o maior rebaixamento.

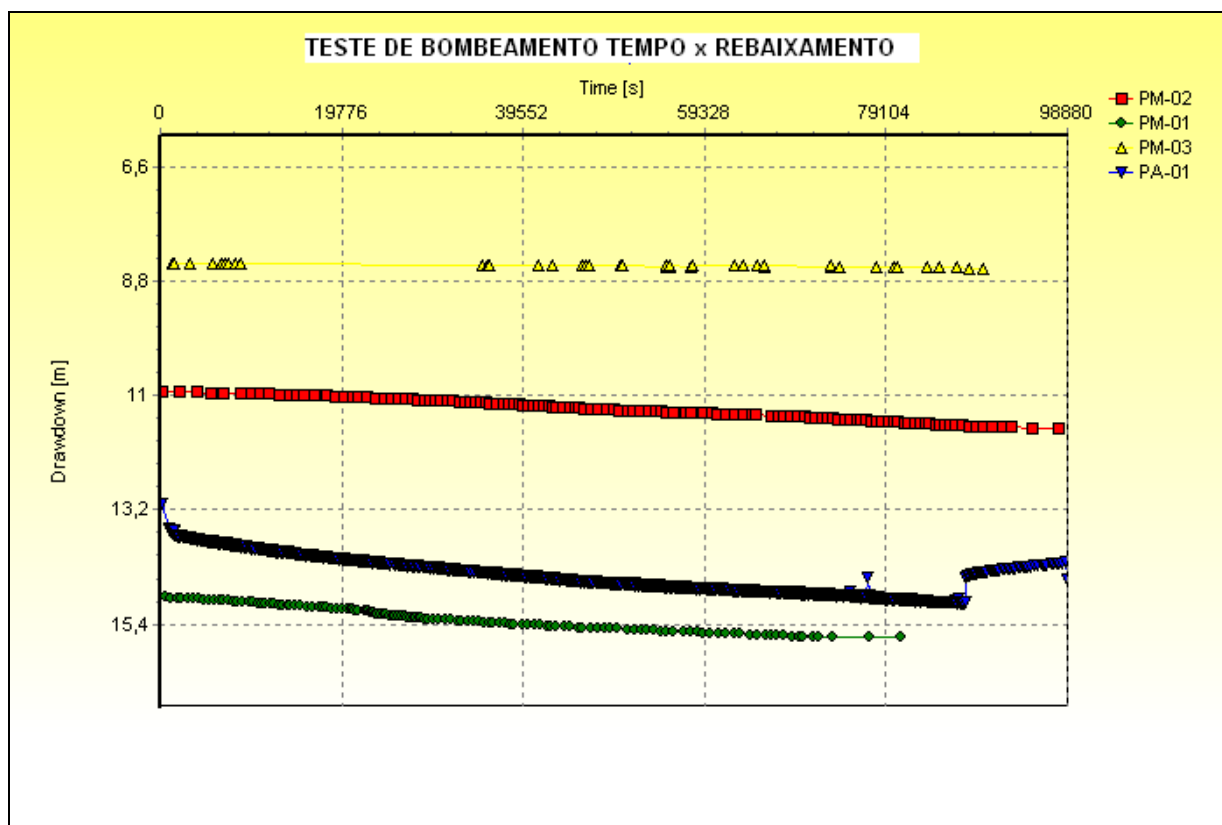


Figura 5.21- Gráfico tempo x rebaixamento para o ensaio de bombeamento na área de pesquisa.

O PM 02 apresentou pequeno rebaixamento, com desnível de 0,65 metros, passando do nível estático de 5,89 m para o nível dinâmico no final do bombeamento de 6,54 m. No PM 03 praticamente não foi observado nenhum rebaixamento, apresentando desnível de 0,07 metros, passando do nível estático de 5,86 m para o nível dinâmico no final do bombeamento de 5,93 m. Estes dois poços têm a seção filtrante instalada na unidade aquífera do itabirito fraturado.

O resultado do bombeamento observado na Figura 5.21 era esperado devido à distância entre os dois poços e o PA 01. O PM 03 é o mais distante do PA 01 e o PM 02 o mais próximo. À medida que se afasta do poço bombeado a tendência é que o rebaixamento nos poços seja menor. Pode-se concluir que o cone de rebaixamento formado pelo bombeamento do PA 01 não atingiu o PM 03, e no PM 02 sua influência foi menor que no PM 01.

Os resultados de condutividade hidráulica e transmissividade, para os poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA 01, obtidos após o tratamento dos dados do ensaio de bombeamento pelo método de Theis no programa *Aquifer Test*, são apresentados nas Figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25.

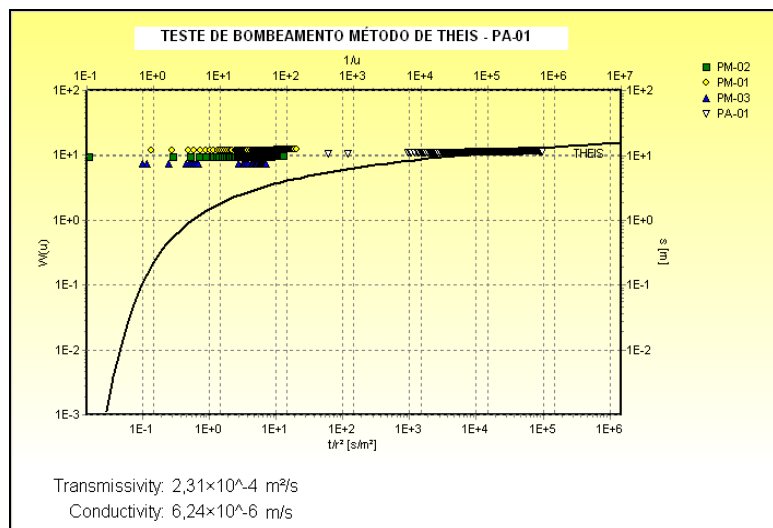


Figura 5.22: Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis - PA 01.

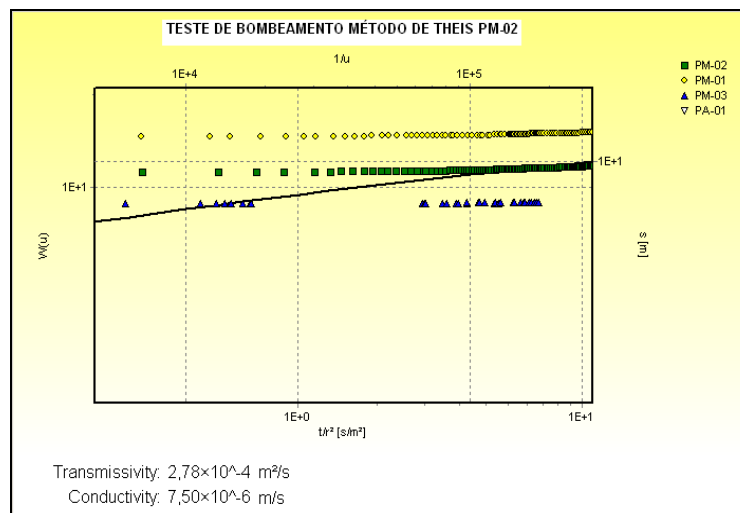


Figura 5.24: Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis - PM 02.

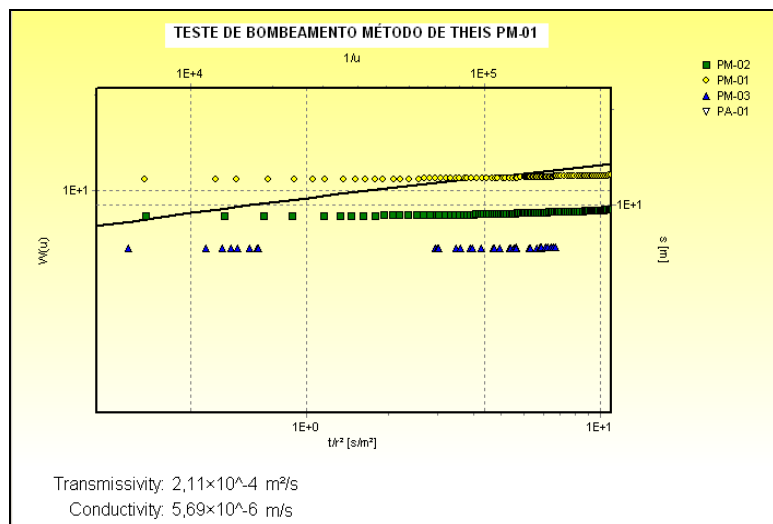


Figura 5.23: Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis - PM 01.

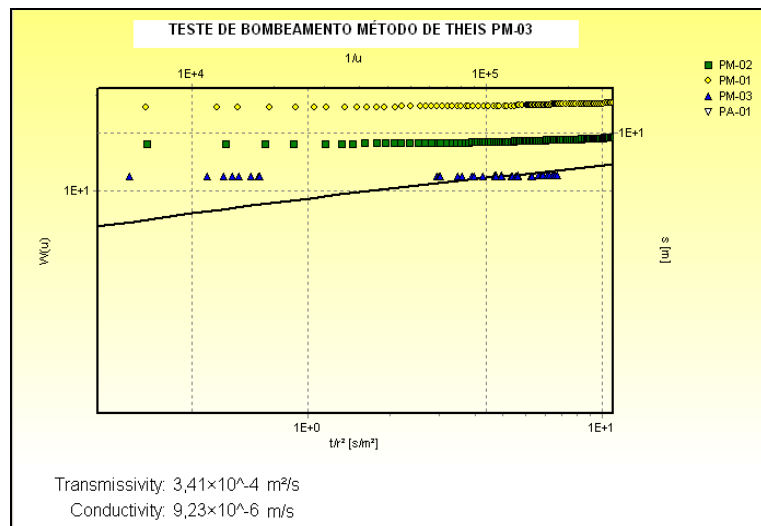


Figura 5.25: Teste de bombeamento interpretação pelo método de Theis PM 03

Os resultados obtidos de condutividade hidráulica do ensaio de bombeamento para os quatro poços apresentaram valores de $5,69 \times 10^{-6}$ m/s a $9,23 \times 10^{-6}$ m/s. Estes valores estão dentro dos limites previstos por Mourão (2007) para o itabirito do Grupo Nova Lima ($2,0 \times 10^{-9}$ m/s a $1,8 \times 10^{-5}$ m/s). Uma análise comparativa entre os dados obtidos pelos ensaios *Bail test* e ensaio de bombeamento indicam que, conforme definido por Feitosa *et al.* (2008), o ensaio de bombeamento apresentou o resultado que melhor representa a condutividade hidráulica do aquífero fraturado do itabirito da área de pesquisa (Tabela 5.9).

Tabela 5.9: Valores de condutividade hidráulica obtida pelos ensaios *bail test* e bombeamento e os valores indicativos definidos por Mourão (2007) para o aquífero no itabirito.

Poços	Condutividade hidráulica m/s para o aquífero do itabirito fraturado	
	<i>Bail test</i>	Teste de bombeamento
PA 01	Não executado	$6,24 \times 10^{-6}$
PM 01	$4,20 \times 10^{-4}$	$5,59 \times 10^{-6}$
PM 02	Resultado desconsiderado	$7,50 \times 10^{-6}$
PM 03	$1,15 \times 10^{-5}$	$9,23 \times 10^{-6}$
Valores de referência Mourão (2007)	$2,0 \times 10^{-9}$ m/s a $1,8 \times 10^{-5}$ m/s, sendo para Itabiritos frescos não fraturados máximos de $6,2 \times 10^{-10}$ m/s e para Itabiritos argilosos em média $7,0 \times 10^{-10}$ m/s.	

5.6.4 Direção de Fluxo

A direção de fluxo do aquífero da área de pesquisa foi definida com base nos valores de carga hidráulica (cota - nível d'água) de cada poço instalado, e sua localização espacial (coordenadas x e y), dados presentes na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Valores de carga hidráulica para os poços PA 01, PM 01, PM 02, PM 03.

PM	Coordenada X	Coordenada Y	Cota	Nível d'água	Carga Hidráulica
PA-01	616,104.541	7,788,078.893	1,022.691	7.35	1015.341
PM-01	616,052.000	7,788,114.270	1,021.654	5.33	1016.324
PM-02	616,028.000	7,788,119.608	1,022.254	5.89	1016.364
PM-03	616,008.488	7,788,137.300	1,022.132	5.86	1016.272

A Figura 5.26 apresenta o mapa hidrogeológico com a carga hidráulica de cada poço e a direção do fluxo subterrâneo calculada (22° radianos de direção SW – NE). Como pode ser observado no mapa hidrogeológico a direção de fluxo é perpendicular às curvas de nível, resultado esperado após a análise das condições topográficas e do relevo da área de pesquisa.

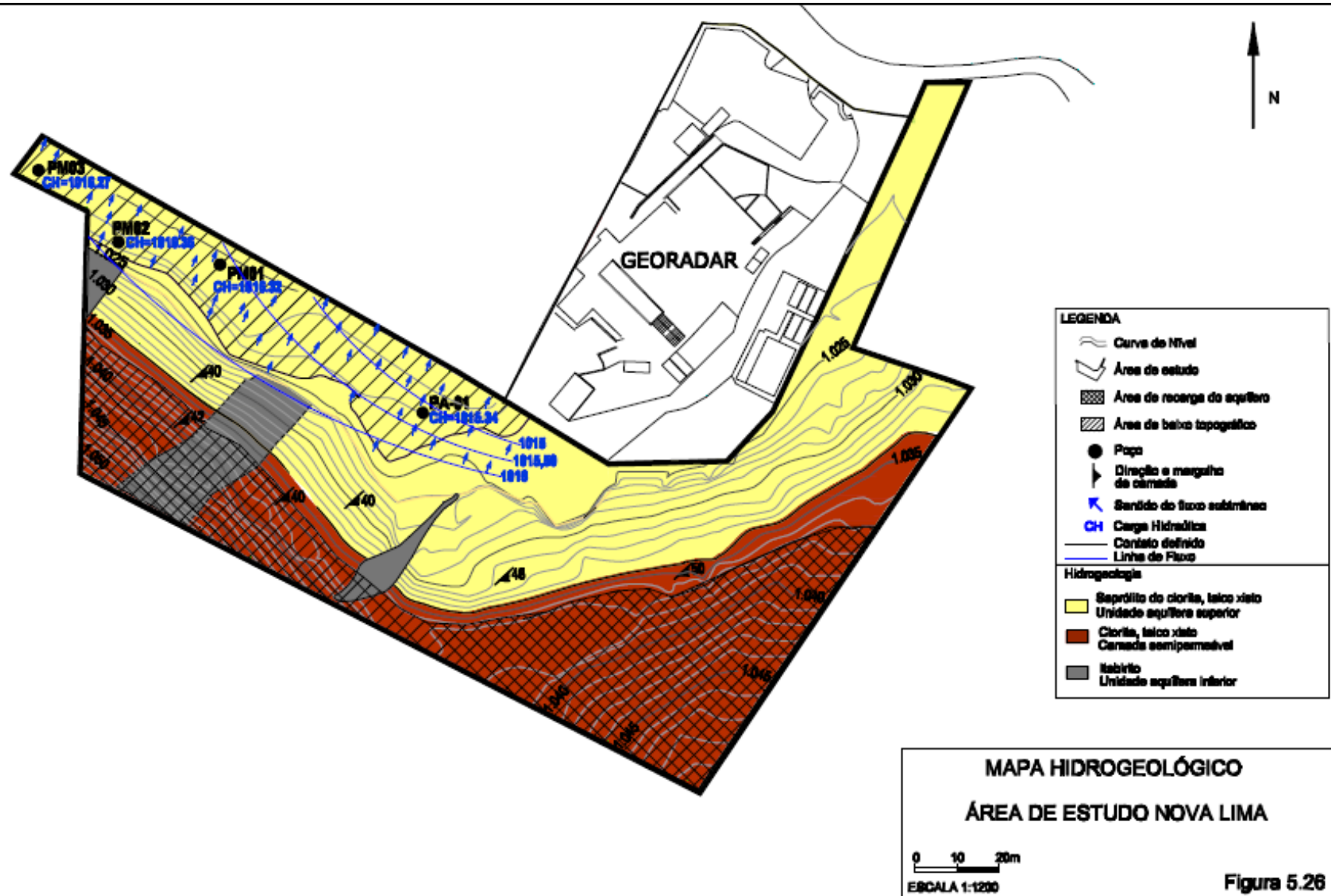


Figura 5.26

5.7 – HIDROQUÍMICA

Uma amostra de água do poço PA 01 foi coletada para leitura de parâmetros físico-químicos e análise química. A amostra foi coletada a partir do bombeamento contínuo do poço até que se mantivessem constantes as leituras dos parâmetros físico-químicos, garantindo a qualidade da água amostrada. A Figura 5.27 apresenta um gráfico identificando o horário do início da estabilização dos parâmetros físico-químicos. Como pode ser observado a partir de 15:10 os valores dos parâmetros se mantiveram constantes, desta forma a amostra foi coletada as 15:30 hs. Os resultados dos parâmetros físico-químicos e análise química tornaram possível a classificação da água quanto à fácies hidroquímica e a verificação de sua potabilidade, como serão apresentados a seguir.

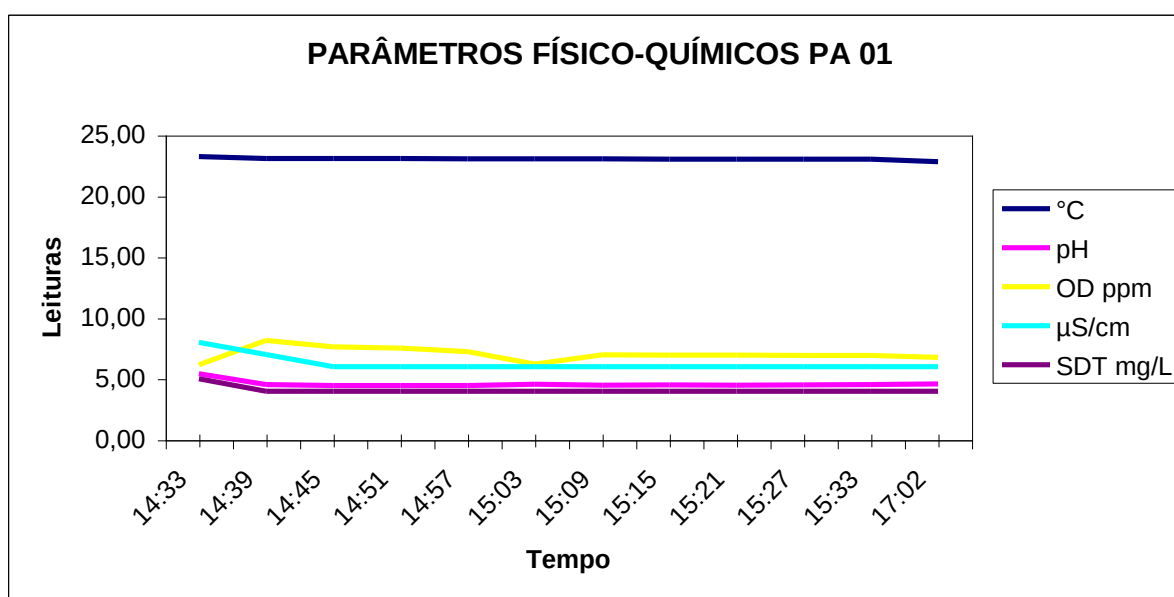


Figura 5.27: Parâmetros físico-químicos do PA 01: temperatura (°C), pH, OD - oxigênio dissolvido (ppm), condutividade elétrica (µS/cm) e SDT - sólidos totais dissolvidos (mg/L).

5.7.1 Análise dos Parâmetros Físico-Químicos da Água

Os parâmetros físico-químicos são bons indicadores para a verificação da qualidade da água subterrânea, pode-se definir o grau e tipo de contaminação presente na água ou se esta se encontra em condições de consumo, com base nos dados de condutividade elétrica, pH, OD e sólidos totais dissolvidos apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Parâmetros físico-químicos da água do PA 01

Hora	Temp °C	pH	OD ppm	Cond. $\mu\text{S/cm}$	SDT mg/l	ORP
14:33:25	23,23	5,42	6,17	8	5,00	86,1
14:39:25	23,09	4,53	8,15	7	4,60	239,7
14:45:25	23,08	4,47	7,64	6	4,60	260,4
14:51:25	23,08	4,47	7,53	6	4,60	272,4
14:57:25	23,06	4,46	7,24	6	4,60	285,3
15:03:25	23,07	4,56	6,21	6	4,60	285,6
15:09:25	23,05	4,48	6,99	6	4,60	297,3
15:15:25	23,03	4,50	6,96	6	4,60	301,2
15:21:25	23,04	4,49	6,94	6	4,60	305,7
15:27:25	23,03	4,50	6,92	6	4,60	307,9
15:33:25	23,03	4,53	6,93	6	4,60	309,0
17:02:24	22,83	4,60	6,76	6	4,60	305,6

Os valores de condutividade elétrica apresentados na Tabela 5.11 (6 a 8 $\mu\text{S/cm}$) e de sólidos totais dissolvidos (4 a 5 mg/L) são considerados baixos se comparados aos valores de referências apresentados por Mourão (2007) para este aquífero ($\sim 31,6 \mu\text{S/cm}$). Estes dados indicam que a água terá pouca concentração de íons dissolvidos e possivelmente nenhuma contaminação.

A análise dos valores de pH (5 a 4) apresentada na Tabela 5.11 indica um ambiente ácido, um pouco acima dos valores de referência apresentados por Mourão (2007) para este aquífero (pH ~ 6). Estes dados indicam que a água amostrada está dentro dos limites de acidez comuns para este aquífero.

A análise dos valores de OD apresentada na Tabela 5.11 (6 ppm) indica uma concentração muito acima dos valores de referência para águas subterrâneas indicados por Santos (2008) menor que 1 ppm. Este é um valor muito alto se considerarmos o valor de referência para água subterrânea, porém este valor não poderá ser considerado devido ao processo de coleta com bombeamento em alta vazão que promove o contato direto da água amostrada com o oxigênio presente no ar. Este processo aumenta expressivamente o oxigênio dissolvido, não refletindo as condições reais da água amostrada.

5.7.2 Análise Hidroquímica da Água do Poço PA 01

Os resultados da análise hidroquímica da amostra de água coletada no poço PA 01 são apresentados e comparados na Tabela 5.12, com os valores de referência segundo a Portaria 518 do Ministério da Saúde. A análise dos resultados indica que a água tem pouca concentração de íons dissolvidos, sendo o ânion de maior concentração Cl^{-1} e o cátion de maior concentração Mg^{+2} , o que é evidenciado pelo diagrama de Stiff (Figura 5.28). O anexo 2 apresenta o relatório de ensaio químico para a amostra de água coletada no PA 01 do laboratório Geochemical que executou a análise.

Tabela 5.12 - Análise hidroquímica da água segundo a Portaria 518 do Ministério da Saúde.

 ANÁLISE HIDROQUÍMICA METAIS TOTAIS														
SÍTIO	Poços de Monitoramento	Al	As	Sb	Se	Na	Ba	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
	LD Lab ⁽¹⁾	0,020	0,006	0,005	0,005	0,238	0,008	0,005	0,007	0,021	0,008	0,089	0,005	0,006
	Ministério da Saúde ⁽²⁾	0,2	0,01	0,005	0,01	200,0	0,7	0,05	0,1	0,3	2,00	5	0,005	0,01
CEOP	CEOP-PA01	0,16	0,006	0,01	0,02	0,38	<0,008	0,01	0,02	0,23	0,02	<0,089	<0,005	<0,006
(1) Limite de Detecção do Laboratório														
(2) Ministério de Saúde Portaria 518														
 ANÁLISES HIDROQUÍMICAS Parâmetros Complementares (ppm)														
SÍTIO	Poços de Monitoramento	Série Nitrogenada		Ânions Fundamentais			Propriedades Iônicas (Laboratório)							
		NO2	NO3 (como N)	Cl	HCO3	SO4	Condutividade elétrica $\mu\text{S/cm}$	Alcalinidade HCO_3						
	LD Lab ⁽¹⁾	0,005	0,170	0,734	Cálculo	1,700	-	4,000						
	Ministério da Saúde ⁽²⁾	-	10,00	250	-	250	-	-						
CEOP	CEOP-PA01	0,11	0,20	4,33	<4,88	<1,700	6,50	<4,000						
(1) Limite de Detecção do Laboratório														
(2) Ministério da Saúde Portaria 518.														

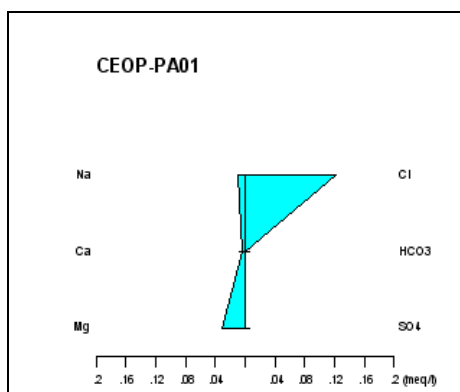


Figura 5.28: – Diagrama de Stiff para o PA 01.

Os íons metálicos em geral não apresentam concentrações expressivas, a exceção do antimônio (Sb) e selênio (Se), que mesmo em pequenas concentrações são nocivos à saúde e apresentam concentração acima dos valores de referência segundo a portaria 518 do Ministério da Saúde. A origem da presença destes íons pode estar relacionada a presença de pequenas concentrações destes metais na rocha encaixante e sua mobilização.

A Figura 5.29 apresenta uma comparação entre as amostras apresentadas por Mourão, 2007 para o aquífero em xistos com a amostra do PA 01 no digrama de Schoeller. Como pode ser observado as concentrações para os íons Mg, Ca e Na+K para o PA 01 se aproximam com as amostras do Grupo 3 caracterizadas por baixos valores de sólidos dissolvidos e pH ácido. Para o íon Cl, como já observado anteriormente, encontra-se uma concentração elevada fora dos padrões encontrados por Mourão, 2007. A incidência de alta concentração de Cl pode estar associada a alguma atividade antrópica que acarretou em contato de água tratada pela concessionária local com a água do aquífero.

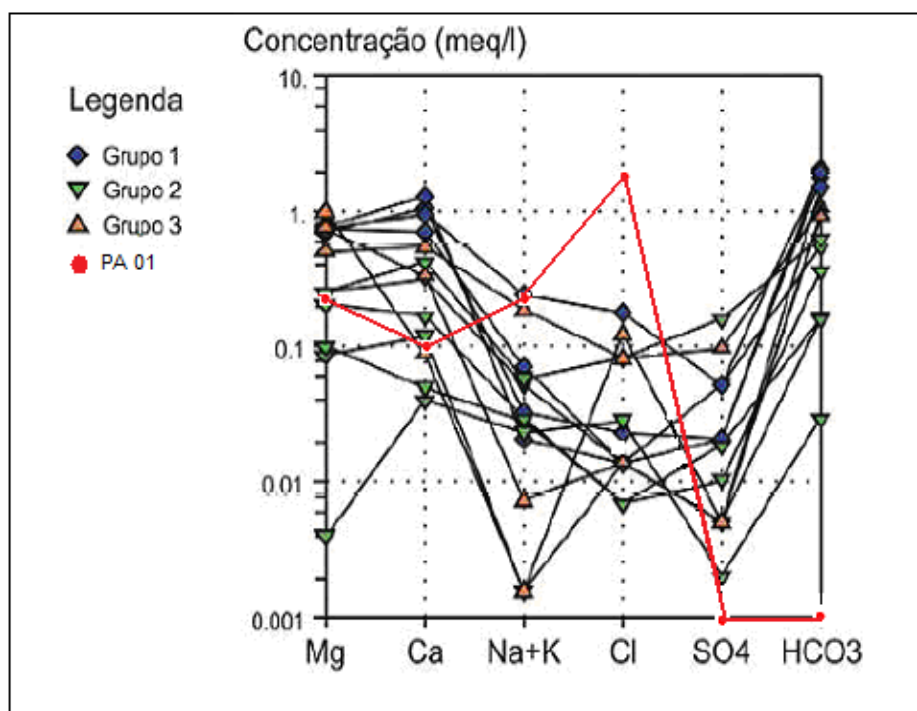


Figura 5.29: – Diagrama de Schoeller para o PA 01.

Outro importante dado das águas do aquífero fraturado do itabirito da área de pesquisa é sua classificação quanto à fácies. A Figura 5.29 apresenta uma comparação na classificação da fácies da água pelo diagrama de Piper (Piper 1944) apresentada por Mourão, 2007 com a amostra coletada no PA01. Como pode ser observado a exceção da alta concentração do íon Cl a amostra tem uma classificação próxima a apresentada para o Grupo 3. Devido a alta concentração de Cl a água do aquífero foi classificada como cloretada magnesiana, porem como a concentração de Cl tem origem antrópica esta classificação não representa corretamente a caracterização do aquífero.

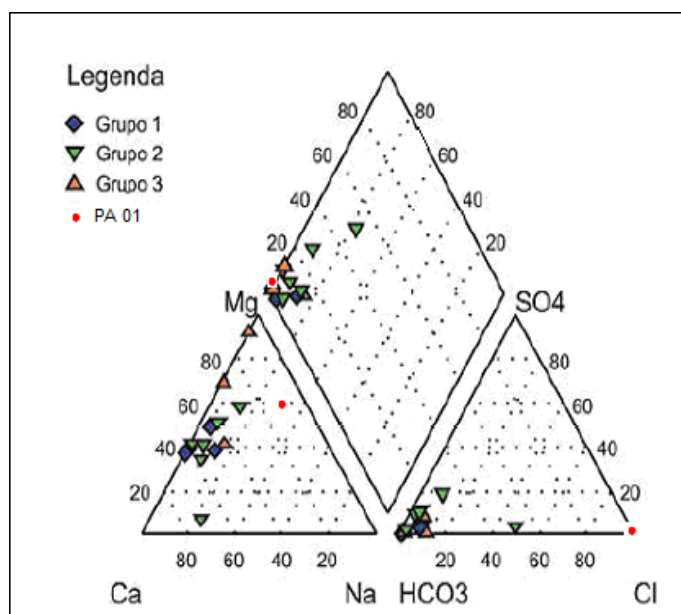


Figura 5.30: – Diagrama de Piper para o PA 01.

Uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos diagramas de Piper (cloretada magnesiana) e Schoeller e os valores indicativos apresentados por Mourão (2007) para amostras da mesma formação aquífera da área de pesquisa, indica as concentrações dos componentes da água do PA 01 apresentadas estão abaixo dos valores esperados, a exceção do cloro de possível origem antrópica. Este fato, possivelmente, está relacionado à localização de coleta das amostras de Mourão (2007) que estão mais próximas de regiões de alta mineralização do Quadrilátero Ferrífero e atividade de lavra, o que influencia diretamente na concentração iônica da água subterrânea por aumento na dissolução de íons metálicos que podem gerar contaminação do meio aquífero.

4.7.3 Verificação e Validação dos Resultados da Análise Hidroquímica da Água do poço PA 01

Para verificação e validação dos resultados obtidos pela análise hidroquímica da água coletada no poço PA 01 pelo laboratório (Geochemical) foram calculados o balanço iônico e TDS (sólidos totais dissolvidos) e comparados aos valores de indicação (Cesceri *et al.* 2005). A Tabela 5.13 apresenta os resultados do Balanço iônico e a Tabela 5.14 apresenta o valor de TDS calculado a partir dos resultados das análises de laboratório.

Tabela 5.13: Cálculo de Balanço iônico para o PA 01.

Amostra	CEOP-PA01		
Classificação	Mg-Cl		
Temperatura (°C)	22.80		
pH	4.60		
Soma de ânions	0.12	meq/L	
Soma de cátions	0.06	meq/L	
Balanço	37.54	%	
Sólidos Totais dissolvidos	5,33	mg/L	
Total hardness	1.72	mg/l CaCO ₃	
Alcalinidade	-0.04	mg/l CaCO ₃	
Ions maiores composição	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	0.24	0.01	0.01
K	0.10	0.003	0.003
Ca	0.08	0.00	0.00
Mg	0.37	0.02	0.03
Cl	4.30	0.12	0.12
SO ₄	0.00	0.00	0.00

Conforme definido por Cesceri *et al.* (2005) pode-se validar a análise hidroquímica de uma amostra segundo dois critérios:

1.Cálculo do balanço iônico:

Σ ânions (meq/l)	Diferença aceitável
0 – 3,0	$\pm 0,2$ meq/l
3 - 10	2 %
10 - 800	5 %

Cálculo para a amostra PA 01 a partir dos dados da Tabela 5.13: Cátions – ânions = 0,06 – 0,12 = 0,06 meq/l. O resultado de 0,06 está dentro dos limites aceitáveis de $\pm 0,2$ meq/l validando a análise hidroquímica da amostra do poço PA 01.

2. Cálculo de TDS:

$$1,0 < \frac{\text{STD medido}}{\text{STD calculado}} < 1,2 \quad \text{STD medido (Tabela 5.11)/ STD calculado (Tabela 5.14)} = 5/5 = 1$$

Tabela 5.14: Valor calculado de TDS (sólidos totais dissolvidos) para o PA 01.

PARÂMETROS	UNIDADES	L.D.	Concentração	Métodos	Data Análise
Prata Solúvel	mg/L	0,007	ND	EPA3005A	17/9/2008
Prata Total	mg/L	0,007	ND	EPA3005A	17/9/2008
Alumínio Solúvel	mg/L	0,020	0,03	EPA3005A	17/9/2008
Alumínio Total	mg/L	0,020	0,16	EPA3005A	17/9/2008
Arsênio Solúvel	mg/L	0,006	ND	EPA3005A	17/9/2008
Arsênio Total	mg/L	0,006	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Antimônio Solúvel	mg/L	0,005	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Antimônio Total	mg/L	0,005	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Selênio Solúvel	mg/L	0,005	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Selênio Total	mg/L	0,005	0,02	EPA3005A	17/9/2008
Sódio Solúvel	mg/L	0,238	0,24	EPA3005A	17/9/2008
Sódio Total	mg/L	0,238	0,38	EPA3005A	17/9/2008
Lítio Solúvel	mg/L	0,013	ND	EPA3005A	17/9/2008
Lítio Total	mg/L	0,013	ND	EPA3005A	17/9/2008
Potássio Solúvel	mg/L	0,100	0,10	EPA3005A	17/9/2008
Potássio Total	mg/L	0,100	0,15	EPA3005A	17/9/2008
Berílio Solúvel	mg/L	0,005	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Berílio Total	mg/L	0,005	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Cálcio Solúvel	mg/L	0,016	0,08	EPA3005A	17/9/2008
Cálcio Total	mg/L	0,016	0,13	EPA3005A	17/9/2008
Magnésio Solúvel	mg/L	0,039	0,37	EPA3005A	17/9/2008
Magnésio Total	mg/L	0,039	0,48	EPA3005A	17/9/2008
Estrôncio Solúvel	mg/L	0,007	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Estrôncio Total	mg/L	0,007	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Bário Solúvel	mg/L	0,008	ND	EPA3005A	17/9/2008
Bário Total	mg/L	0,008	ND	EPA3005A	17/9/2008
Titânio Solúvel	mg/L	0,004	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Titânio Total	mg/L	0,004	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Vanádio Solúvel	mg/L	0,006	ND	EPA3005A	17/9/2008
Vanádio total	mg/L	0,006	ND	EPA3005A	17/9/2008
Cromo Solúvel	mg/L	0,005	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Cromo Total	mg/L	0,005	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Molibdênio Solúvel	mg/L	0,010	ND	EPA3005A	17/9/2008
Molibdênio Total	mg/L	0,010	ND	EPA3005A	17/9/2008
Manganês Solúvel	mg/L	0,007	0,02	EPA3005A	17/9/2008
Manganês Total	mg/L	0,007	0,02	EPA3005A	17/9/2008
Ferro Solúvel	mg/L	0,021	0,12	EPA3005A	17/9/2008
Ferro Total	mg/L	0,021	0,23	EPA3005A	17/9/2008
Cobalto Solúvel	mg/L	0,005	ND	EPA3005A	17/9/2008
Cobalto Total	mg/L	0,005	ND	EPA3005A	17/9/2008
Níquel Solúvel	mg/L	0,008	ND	EPA3005A	17/9/2008
Níquel Total	mg/L	0,008	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Cobre Solúvel	mg/L	0,008	0,01	EPA3005A	17/9/2008
Cobre Total	mg/L	0,008	0,02	EPA3005A	17/9/2008
Zinco Solúvel	mg/L	0,089	ND	EPA3005A	17/9/2008
Zinco Total	mg/L	0,089	ND	EPA3005A	17/9/2008
Cádmio Solúvel	mg/L	0,005	ND	EPA3005A	17/9/2008
Cádmio total	mg/L	0,005	ND	EPA3005A	17/9/2008
Boro Solúvel	mg/L	0,256	ND	EPA3005A	17/9/2008
Boro Total	mg/L	0,256	ND	EPA3005A	17/9/2008
Chumbo Solúvel	mg/L	0,006	ND	EPA3005A	17/9/2008
Chumbo Total	mg/L	0,006	ND	EPA3005A	17/9/2008
Fósforo Solúvel	mg/L	0,021	ND	EPA3005A	17/9/2008
Fósforo Total	mg/L	0,021	ND	EPA3005A	17/9/2008
Cério Solúvel	mg/L	0,025	ND	EPA3005A	17/9/2008
Cério Total	mg/L	0,025	ND	EPA3005A	17/9/2008
Tálio Solúvel	mg/L	0,012	ND	EPA3005A	17/9/2008
Tálio Total	mg/L	0,012	ND	EPA3005A	17/9/2008
Urânio Solúvel	mg/L	0,064	ND	EPA3005A	17/9/2008
Urânio Total	mg/L	0,064	ND	EPA3005A	17/9/2008
Ytório Solúvel	mg/L	0,028	ND	EPA3005A	17/9/2008
Ytório Total	mg/L	0,028	ND	EPA3005A	17/9/2008
Cloreto	mg/L	0,734	4,33	8113 Mercuric Thiocyanate	19/9/2008
Sulfato	mg/L	1,700	ND	EPA375.4	12/9/2008
Nitrato como N	mg/L	0,170	0,20	8171 Cadmium Reduction	11/9/2008
Condutividade	µS/cm	-	6,50	Standard Methods 2510A	15/9/2008
Alcalinidade HCO3-	mgCaCO3/L	4,000	ND	Standard Methods 2320B	11/9/2008
Nitrito	mg/L	0,005	0,11	10019 Diazotization Chromotropic	11/9/2008
TDS CALCULADO:	5,33 mg/L				

CAPÍTULO 6

6- CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de pesquisa está localizada no Município de Nova Lima, nas dependências da empresa Georadar Levantamentos Geofísicos S.A., constituindo-se em um estudo hidrogeológico com aplicação de método geofísico. A área de pesquisa está inserida nos domínios do Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima, região do Quadrilátero Ferrífero.

O levantamento topográfico identificou duas regiões distintas dentro da área de pesquisa. Uma área de alto topográfico a SW, caracterizada como região de recarga do aquífero. E uma área de baixo topográfico a NW.

O mapa geológico e perfil da área de pesquisa apresentam quatro unidades litológicas predominantes sendo: uma fina cobertura de colúvio de 1 a 4 metros, uma camada de saprólito do clorita-talco xisto com espessura aproximada de 5 metros, um nível inferior de clorita-talco xisto com intercalações de camadas de itabirito maciço fraturado. O contato entre as camadas é concordante com direção e mergulho de camada variando entre 140/30 e 140/40. A área apresenta ainda veios de quartzo sulfetados nos afloramentos do clorita-talco xisto.

O levantamento geofísico de eletroresistividade empregado neste estudo apresentou bons resultados, identificando em profundidade os diferentes tipos litológicos e nível d'água. Através da análise do perfil de eletroresistividade foi possível identificar quatro domínios litológicos diferentes caracterizados como: **B-** muito arenoso, **A-** arenoso, **C-** pouco arenoso e **D-** rocha sã ou pouco alterada. Através da análise do perfil de cargabilidade foi possível identificar o limite entre a zona insaturada e a zona saturada, que consiste no nível d'água da seção analisada. Os valores de nível d'água estão entre 5 e 7 metros.

A sondagem nos poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA 01, executada com sonda rotopneumática, apresentou bons resultados. A sonda apresentou bom rendimento executando a perfuração de todos poços em 2 dias. O resultado das sondagens executadas confirmou as informações obtidas pelo levantamento geofísico de eletroresistividade, concluindo-se que esta metodologia é um bom indicador para orientação na definição dos equipamentos de sondagem a serem utilizados.

A partir da descrição dos testemunhos de sondagem, da identificação do nível d'água, da análise do mapa geológico e perfil foi possível identificar três unidades aquíferas na área de pesquisa. O aquífero granular superior formado pelo saprólito do itabirito, um aquífero de saprólito do clorita-talco xisto e o aquífero fraturado inferior do itabirito.

O levantamento geofísico de perfilagem executado nesta pesquisa apresentou bons resultados para a aplicação da ferramenta *caliper* que identifica com clareza o diâmetro interno do poço indicando a presença de fraturas ou obstruções no furo. A partir da análise da ferramenta *caliper* foi verificada a integridade dos poços e definida a utilização ou não das demais ferramentas de perfilagem. Para os poços PM 01 e PM 02 foram detectadas variações significativas no diâmetro dos poços, optando-se por não utilizar as demais ferramentas. Para os poços PM 03 e PA 01 não foram identificadas variações significativas e optou-se por utilizar as demais ferramentas de perfilagem.

Nos poços PM 03 e PA 01 a perfilagem por leitura de resistividade, radioatividade natural e ótica apresentaram bons resultados. Através destes levantamentos foi possível identificar os diferentes horizontes litológicos, que se apresentaram concordantes com a descrição dos testemunhos de sondagem. A perfilagem ótica apresentou bons resultados para a identificação do nível d'água para os dois poços. Para o PA 01 foi possível identificar o contato entre a rocha sã fraturada e o saprólito de rocha alterada, porém para o PM 03, devido à alta turbidez da água do poço, não foi possível verificar a presença de falhas nem contatos.

O ensaio hidrogeológico *Bail test* empregado nos poços de monitoramento PM 01, PM 02 e PM 03 para obtenção do valor da condutividade hidráulica, não apresentou resultados satisfatórios. O PM 02 foi desconsiderado e os valores obtidos para o PM 03 estavam fora dos valores de referência. Este fato está relacionado ao teste ser executado pontualmente e não considerar toda extensão do aquífero. Para o PM 01 os resultados obtidos foram satisfatórios.

O ensaio hidrogeológico teste de bombeamento, executado no poço PA-01 e observado nos demais poços, apresentou bons resultados para a identificação da condutividade hidráulica do aquífero. Em todos os poços o valor de condutividade hidráulica está próximo a 10^{-6} m/s e a transmissividade 10^{-4} m²/s, concordante com os valores de referência para o sistema aquífero.

xistoso unidade hidrogeológica do itabirito fraturado. Uma análise comparativa entre o ensaio de bombeamento e *Bail test* identificou que a melhor metodologia para representar as condições hidráulicas dos aquíferos subterrâneos é o teste de bombeamento por ser representativo de toda área.

A partir dos valores da carga hidráulica dos poços PA 01, PM 01, PM 02 e PM 03, obtidos a no levantamento topográfico e medição do nível d'água foi possível identificar a direção do fluxo subterrâneo que, conforme esperado, acompanha a topografia, se deslocando de SW para NE com inclinação de $22,6^{\circ}$, perpendicular às curvas de nível.

A medição dos parâmetros físico-químicos da água durante a coleta do poço PA 01 mostrou ser uma boa prática. A partir dos dados coletados destes parâmetros foi possível identificar o momento ideal de coleta. Os testes de validação da amostra coletada foram positivo o que identifica que as amostras foram coletadas e analisadas de forma correta.

A análise hidroquímica da água coletada no poço PA 01 e o tratamento dos resultados pelo programa *Aquachem* apresentou bons resultados. A água coletada foi comparada aos valores de referência de Mourão (2007) e se apresentaram com concentrações a baixo do esperado, este fato pode ser explicado pela região de coleta do PA 01 estar mais distante de áreas mineralizadas se comparada a área de coleta das amostras de referência. A água foi classificada como cloro magnésiana, pelo diagrama de Stiff, esta concentração de cloro atípica para esta área área possivelmente é de origem antrópica. Para os parâmetros de potabilidade da Portaria 518 do Ministério da Saúde, a água coletada no PA 01 apresentou contaminação pelos íons Se e Sb, o que indica a necessidade de um tratamento prévio para consumo humano.

Todas as técnicas aplicadas neste estudo, a exceção do ensaio *Bail test*, apresentaram bons resultados como ferramentas para caracterização do aquífero da área de estudo no Município de Nova Lima, sendo indicadas para futuras aplicações em estudos executados em outras áreas.

A aplicação de uma metodologia integrada onde várias técnicas de diferentes áreas de conhecimento são abordadas, se mostrou, nesta pesquisa, um grande avanço. A análise sistemática das condições hidrogeológicas da área de estudo, somente foi possível devido à aplicação destas técnicas em conjunto. Porém, para estudos onde não se tem disponibilidade de

tantas ferramentas, deve-se optar pelas metodologias de sondagem, ensaio de bombeamento e análise hidroquímica, que apresentaram os principais resultados na geração do modelo hidrogeológico conceitual da área de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIM, F. F. ; MARSHAK, S. 1998. Transamazonian Orogeny in Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais – Brazil: Evidence for Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**: 29-58.
- ALKMIM, F. F. 1996. Geologia e Arcabouço Estrutural da Porção Norte do Platô da Moeda, Sudeste de Belo Horizonte, MG. Convênio MBR/COPASA, DEGEO, EM, UFOP MG. 23p. (Relatório Interno).
- ALMEIDA, T.; BRAGA, M. A. ; SILVA, J. C. ; SALVADORETTI, P. ; COSTA, F. C. L. C. 2007. Aplicação de Perfilagem Geofísica em furos de sondagem na Mina Córrego do Feijão – Cia Vale do Rio Doce – Minas Gerais. In: 10th International Congresso of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais CD SBGF0176_07*.
- BARBOSA, G. V. 1980. Superfícies de Erosão no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **10**(1): 89-101.
- BRASIL. 2004. Procedimentos e Responsabilidade Relativos aos Controles de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu padrão de Potabilidade, e das Outras Providências. Ministério da Saúde. Portaria 518 de 25 de março de 2004.
- CABRAL, J. J. S. P. 2008. Movimento das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA A. C. F. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. Rio de Janeiro. 3 ed. p. 77-91.
- CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. M. ; TEIXEIRA, W. 1995. Evolução Policíclica do Quadrilátero Ferrífero: Uma Análise Fundamentada no Conhecimento Atual da Geocronologia U – Pb e Geoquímica Isotópica Sm – Nd. *Revista da Escola de Minas*, **48**(4): 264-273.
- CLESCERI, L. S. ; GREENBERG, A. E. ; EATON, A. D. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21ed. Washington. 561p.
- COSTA, R. T. 2007. Análise de Cargabilidade, Resistividade Elétrica e Susceptibilidade Magnética na Mina de Brucutu, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 91p.
- CRUZ, J. I. ; PORTUGAL, R. S. ; PEREIRA, S. Y. ; BIZUT, A. M. 2007. Detecção de Contaminação de Solo e Água Subterrânea por Vinhança através de Eletroresistividade e Polarização Induzida. In: 10th International Congresso of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais CD SBGF0062_07*.
- DEMETRIO, J. G. A. ; FILHO, J. M. ; LINS, N. T. L. 2008. Projeto e Construção de Poços. In: Feitosa, A. C. F. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 3ed. Rio de Janeiro. p. 429-447.
- DEMIR, Z. ; NARASIMHAN, T. N. 1994. Improved Interpretation of Hvorslev Tests.

Journal of Hydraulic Engineering. **120**(4): 477-494.

- FEITOSA, F. A. C. ; FEITOSA, C. C. ; FILHO, J. M. 2008. Análise de Fluxo para poços em meios homogêneos. In: Feitosa, F. A. C. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 3ed. Rio de Janeiro. p. 525-573.
- FERREIRA FILHO, F. A. E LAZARIM, H. A. 1993. Caracterização Litoestrutural e Geomorfológica da Região da Serra do Pico do Itacolomi, Ouro Preto, Minas Gerais. Trabalho de Graduação. Universidade Federal de Ouro Preto. 84p.
- FREITAS FILHO, L. S. F. 2006. Prospeção de Água Subterrânea no Município de Novo Repartimento – PA Aplicando Métodos Elétricos e Eletromagnéticos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. 49p.
- LEITE, M.; CARRASQUILHA, A.; SILVA, J.; LOBO, L.; CURTINHAS, R.; BATISTA, S. 2007. Aplicação de Perfilagem Geofísica em Projetos de Perfuração de Poços de Petróleo. In: 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais CD SBGF0202_07*.
- LACERDA, M. V. C.; NOGUEIRA, M. L. ; ARANHA, P. R. 2007. Análise de Fluxo Subsuperficial por Eletroresistividade. In: 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais CD SBGF0047_07*.
- LIMA, K. T. P. 2006. Utilização de Métodos Sísmicos, Perfilagem e Testemunho de Poços para a Caracterização de Turbidito e da Formação Urucutuca na Bacia de Almada (BA). Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo. 153p.
- LIMA, M. T. 1987. Considerações Preliminares sobre Carste em Quartzitos da Serra do Itacolomi e Espeleotemas Associados. *Revista da Escola de Minas*. **40**(4): 31-32.
- MAGALHÃES, JR. A. P. E SAADI. 1994. Influências Morfoestruturais e Tectônicas na Dinâmica Fluvial do Rio das Velhas na Região de Belo Horizonte. In: Simpósio Nacional de Geografia Física Aplicada. São Paulo, 1994. *Anais* p. 55-60.
- MESTRINHO, S. S. P. 2008. Geoquímica das Águas Subterrâneas. In: Feitosa, A. C. F. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 3ed. Rio de Janeiro. p. 359-379.
- MIGLIORINI, B. B.; LIMA, Z. M. ; ZEILHOFER, L. V. A. C. 2006. Qualidade das Águas Subterrâneas em Áreas de Cemitérios – Região de Cuiabá, MT. *Revista Águas Subterrâneas*. **20**(1). p. 15-28.
- MOURÃO, M. A. A. 2007. Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. 283p.
- NOCE, C. M. 1995. Geocronologia dos Eventos Magmáticos, sedimentares e Metamórficos

- na Região do Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 128p.
- OGIHARA, S. H. 2000. Avaliação de Investigação Ambiental e de Tecnologia de Intervenção Aplicadas em uma Área Industrial com Elevadas Concentrações de Hidrocarbonetos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 126p.
- OLIVA, A. ; PEDE, M. A. Z. ; TINEN, J. ; SILVA, M. D. ; LAURO, M. J. ; KIANG, C. H. 2007. Aplicação de Métodos Geoelétricos na Caracterização de Áreas Contaminadas. In: 10th International Congresso of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais* CD SBGF0049_07.
- OLIVA, A.; KIANG, C. H. ; CAETANO, M. C. 2005. Determinação da Condutividade Hidráulica da Formação Rio Claro: Análise Comparativa Através de Análise Granulométrica e Ensaio com Permeômetro *GUELPH* e Teste de *Slug*. *Águas Subterrâneas* 9(2): 1-18.
- OLIVEIRA, L. J. 2005. Avaliação do Uso de Perfilagem Geofísica para Obtenção de Informações Secundárias para Utilização em Co-estimativas de Variáveis Geológicas-minerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 164p.
- PIPER, A. M. 1944. A Graphic Procedure in Geochemical Interpretation of Water Analyses. *Transactions American Geophysical Union*. 25: 914-923.
- POMERENE, J. B. 1964. Geology and Ore Deposits of the Belo Horizonte, Ibirité and Macacos Quadrangles, Minas Gerais, Brasil. *U. S. Geol. Survey Prof Paper*. 341: 83p.
- REBOUÇAS, A. C. ; FILHO, J. M. ; ANJOS, N. F. R. ; PEREIRA, V. X. ; FEITOSA, E. C. ; RIJO, L. ; BARROS, J. G. C. ; BENOIT, H. ; GASPARY, J. ; BONNIER, A. ; SIMLER, L. ; GUILHOT, P. ; MARTETAT, M. ; MAGNAN, H. ; GARAU, J. P. 1971. *Elementos de Hidrogeologia Prática*. Recife. SUDENE. 353p.
- REBOUÇAS, A. C. 1994. Hidrogeologia do Quadrilátero. In: VIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. *Anais* ABAS, Recife p.500-509.
- RENGER, F. E. ; NOCE, C. M. ; ROMANO, A. W. ; MACHADO, N. 1994. Evolução Sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de Registro Geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*. 2: 1-11p.
- ROBERTSON GEOLOGGING, 2008. *Robertson Geologging News*. North and Latin American Edition. 1: 4p.
- RUBIO, R. F. 1996. Estudo Hidrogeológico Ambiental. Modelagem Hidrogeológica. COPASA/MBR Projeto Capão Xavier. 52p. (Relatório Interno).

- SANTOS, A. C. 2008. Noções de Hidroquímica. In: Feitosa, A. C. F. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 3ed. Rio de Janeiro. p. 325-357.
- SCHOELLER, H. 1962. *Les Eaux Souterraines*. Paris, Mason. 642p.
- SILVA, A. C. ; DOURADO, A. C. ; MOREIRA, C. A. 2007. Estudo de Contaminação de Águas Subterrâneas em Ji-Paraná – Rondônia pelo Método da Eletroresistividade. In: 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais CD SBGF0101_07*.
- SILVA, J. C. ; YOKOYAMA, L. M. L. ; BORGES, W. R. ; ELIS, V. R. ; HIODO, F. Y. 2007. Mapeamento Tridimensional de Pluma de Contaminação com Resistividade Elétrica. In: 10th International Congresso of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais CD SBGF0055_07*.
- SOARES, M. J. S. 2007. Aplicação de Ferramentas Geofísicas no Diagnóstico Geoambiental. In: 10th International Congresso of the Brazilian Geophysical Society, 2007. *Anais CD SBGF0045_07*.
- SOUZA, L. S. B. 2005. Mapeamento de Aquífero na Cidade de Manaus (AM) Utilizando Perfilagem Geofísica de Poço e Sondagem Elétrica Vertical. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. 73p.
- SOUZA, S. M. T. 1995. Disponibilidades Hídricas Subterrâneas no Estado de Minas Gerais. ed. 1. Belo Horizonte Hidrosistemas. 125p.
- STIFF, H. A. Jr. 1951. The Interpretation of Chemical Water by Means of Patterns. *Journal of Petroleum Technology*. 3(10): 15-17.
- USTRA, A. T. 2008. Utilização dos Métodos de Eletroresistividade e Polarização Induzida com Aquisição de dados 3D para Caracterização Geoambiental de uma Área a Jusante do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru – SP. Universidade de São Paulo. 183p.
- VARAJÃO, C. A. C. 1991. A Questão da Correlação das Superfícies de Erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*. 21(2): 138-145.

ANEXO 1

Planilhas de monitoramento do ensaio de bombeamento para os poços PM 01, PM 02, PM 03 e PA01



TESTE DE BOMBEAMENTO

POÇO DE OBSERVAÇÃO: CEOP PM - 02

NA Inicial: 5,89

Profundidade: 19,88

DATA DE INICIO: 11/09/2008

DATA TERMINO: 12/09/2008

	Tempo t (min)	Prof. Nível d'água (m)	Rebaixamento (m)	Recuperação (m)	Vazão Q (l/h)	Observações Hidrometro (Min.)
Início 14:30 11/9/2008	0.0	5.89		6.54		
	1.0	5.89		6.54		
	2.0	5.89		6.54		
	3.0	5.89		6.54		
	4.0	5.89		6.54		
	5.0	5.89		6.54		
	6.0	5.89		6.54		
	7.0	5.89		6.54		
	8.0	5.89		6.54		
	9.0	5.89		6.54		
	10.0	5.89		6.54		
	15.0	5.89		6.54		
	20.0	5.89		6.54		
	25.0	5.89		6.54		
	30.0	5.89		6.54		
	35.0	5.89		6.54		
	40.0	5.89		6.54		
	50.0	5.90		6.54		
	60.0	5.90		6.54		
	75.0	5.90		6.54		
	90.0	5.90		6.54		
	105.0	5.90		6.54		
	120.0	5.91		6.54		
11/9/2008 17:30	150.0	5.92		6.54		
	180.0	5.93		6.54		
	210.0					
	240.0					
	300.0					
	360.0					
	420.0					
	480.0					
	540.0					
	600.0					
	720.0					
	840.0					
	960.0					
08:30	1080.0	6.38				
10:30	1200.0	6.43				
12:30	1320.0	6.48				
14:30	1440.0	6.54				
12/9/2008 Final						



NA Inicial: 5.86

Profundidade: 13,54

DATA TERMINO: 12/09/2008

120



DATA DE INICIO: 11/09/2008

DATA TERMINO: 12/09/2008

121

ANEXO 2

Relatório de análise química da água coletada no poço PA 01



GEOCHEMICAL TECHNOLOGY SERVIÇOS ANALÍTICOS E AMBIENTAIS S/A

Rua Ludovico Barbosa, 60A - Pau Pombo - 34000-000 - Nova Lima / MG

Tel: (31) 3029-7110 – geochemical@geochemical.com.br

Relatório de Ensaio nº 540/08

Laboratório Geochemical



GEOCHEMICAL TECHNOLOGY SERVIÇOS ANALÍTICOS E AMBIENTAIS S/A

Rua Ludovico Barbosa, 60A - Pau Pombo - 34000-000 - Nova Lima / MG

Tel: (31) 3029-7110 – geochemical@geochemical.com.br

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 540/08

Ciente: GEORADAR LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS S.A	
Projeto: CEOP	
Endereço: Rua: Rod. MG 030 Km 18, nº342 - Pau Pombo	
Cidade: Nova Lima	UF: MG
Contato: Geysa Machado	
Telefone: (31) 3029-7110	

Data de coleta: 11/09/2008
Data de recebimento das amostras: 11/09/2008
Data de emissão do relatório de ensaio: 23/09/2008
Matriz: ÁGUA
Objetivo do ensaio: Analisar a amostra conforme guia de remessa

1. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

1.1. Descrição e Condição dos Itens Ensaçados

A amostra chegou ao Laboratório Geochemical conforme as condições padronizadas e verificadas, de acordo com o Check-List realizado no ato do recebimento. Os itens verificados foram: recipiente da amostra, rótulo (identificação), data da coleta e temperatura de preservação.

1.2. Referência ao Plano de Amostragem

Foi coletada, pelo cliente, 01 (uma) amostra de água em 11 de setembro de 2008, e identificada conforme tabela abaixo:

Login Geochemical	Login Cliente
7518	CEOP-PA01

Para esta amostra, foram realizados os seguintes ensaios, em conformidade com a Guia de Remessa: Inorgânicos (Parâmetros Complementares, Metais Totais e Metais Solúveis),

2. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Seguem os resultados dos ensaios inorgânicos da amostra coletada.

2.1. ENSAIOS INORGÂNICOS

Seguem os resultados de Metais Totais, Metais Dissolvidos e Parâmetros Complementares para a amostra analisada.

2.1.1. METAIS TOTAIS E DISSOLVIDOS

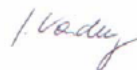
						Ag (D)	Ag (T)	Al (D)	Al (T)	As (D)	As (T)	Sb (D)	Sb (T)	Se (D)	Se (T)	Na (D)	Na (T)
						mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
L.D.						0,007	0,007	0,020	0,020	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,238	0,238
L.Q.						0,024	0,024	0,064	0,064	0,020	0,020	0,015	0,015	0,017	0,017	0,758	0,758
Branco						ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Valor do padrão de Controle						0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Valor de recuperação do padrão						0,2019	0,2019	-	-	0,1893	0,1893	0,2187	0,2187	0,2458	0,2458	-	-
Critério de aceitação 75%a125%						100,95%	100,95%	-	-	94,65%	94,65%	109,35%	109,35%	122,90%	122,90%	-	-
Login	Logim Cliente	Data da Coleta	Data da Análise	Metodo		Ag (D)	Ag (T)	Al (D)	Al (T)	As (D)	As (T)	Sb (D)	Sb (T)	Se (D)	Se (T)	Na (D)	Na (T)
7518	CEOP - PA - 01	11/9/2008	17/9/2008	EPA3005A		ND	ND	0,03	0,16	ND	ND	0,01	0,01	0,01	0,01	0,24	0,38
						Li (D)	Li (T)	K (D)	K (T)	Be (D)	Be (T)	Ca (D)	Ca (T)	Mg (D)	Mg (T)	Sr (D)	Sr (T)
						mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
L.D.						0,013	0,013	0,100	0,100	0,005	0,005	0,016	0,016	0,039	0,039	0,007	0,007
L.Q.						0,042	0,042	0,320	0,320	0,015	0,015	0,062	0,062	0,124	0,124	0,021	0,021
Branco						ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Valor do padrão de Controle						0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Valor de recuperação do padrão						0,2150	0,2150	-	-	0,2216	0,2216	-	-	-	-	0,2315	0,2315
Critério de aceitação 75%a125%						107,50%	107,50%	-	-	110,80%	110,80%	-	-	-	-	115,75%	115,75%
Login	Logim Cliente	Data da Coleta	Data da Análise	Metodo		Li (D)	Li (T)	K (D)	K (T)	Be (D)	Be (T)	Ca (D)	Ca (T)	Mg (D)	Mg (T)	Sr (D)	Sr (T)
7518	CEOP - PA - 01	11/9/2008	17/9/2008	EPA3005A		ND	ND	0,10	0,15	0,01	0,01	0,08	0,13	0,37	0,48	0,01	0,01
						Ba (D)	Ba (T)	Ti (D)	Ti (T)	V (D)	V (T)	Cr (D)	Cr (T)	Mo (D)	Mo (T)	Mn (D)	Mn (T)
						mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
L.D.						0,008	0,008	0,004	0,004	0,006	0,006	0,005	0,005	0,010	0,010	0,007	0,007
L.Q.						0,025	0,025	0,013	0,013	0,018	0,018	0,017	0,017	0,033	0,033	0,018	0,018
Branco						ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Valor do padrão de Controle						0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Valor de recuperação do padrão						0,2496	0,2496	0,2259	0,2259	0,2271	0,2271	0,2384	0,2384	0,2159	0,2159	0,2354	0,2354
Critério de aceitação 75%a125%						124,80%	124,80%	112,95%	112,95%	113,55%	113,55%	119,20%	119,20%	107,95%	107,95%	117,70%	117,70%
Login	Logim Cliente	Data da Coleta	Data da Análise	Metodo		Ba (D)	Ba (T)	Ti (D)	Ti (T)	V (D)	V (T)	Cr (D)	Cr (T)	Mo (D)	Mo (T)	Mn (D)	Mn (T)
7518	CEOP - PA - 01	11/9/2008	17/9/2008	EPA3005A		ND	ND	0,01	0,01	ND	ND	0,01	0,01	ND	ND	0,02	0,02
						Fe (D)	Fe (T)	Co (D)	Co (T)	Ni (D)	Ni (T)	Cu (D)	Cu (T)	Zn (D)	Zn (T)	Cd (D)	Cd (T)
						mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
L.D.						0,021	0,021	0,005	0,005	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,005	0,005
L.Q.						0,066	0,066	0,015	0,015	0,026	0,026	0,024	0,024	0,283	0,283	0,016	0,016
Branco						ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Valor do padrão de Controle						0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Valor de recuperação do padrão						-	-	0,2498	0,2498	-	-	0,2362	0,2362	-	-	-	-
Critério de aceitação 75%a125%						-	-	124,90%	124,90%	-	-	119,10%	119,10%	-	-	-	-
Login	Logim Cliente	Data da Coleta	Data da Análise	Metodo		Fe (D)	Fe (T)	Co (D)	Co (T)	Ni (D)	Ni (T)	Cu (D)	Cu (T)	Zn (D)	Zn (T)	Cd (D)	Cd (T)
7518	CEOP - PA - 01	11/9/2008	17/9/2008	EPA3005A		0,12	0,23	ND	ND	ND	ND	0,01	0,01	0,02	0,02	ND	ND
						B (D)	B (T)	Pb (D)	Pb (T)	P (D)	P (T)	Ce (D)	Ce (T)	Ti (D)	Ti (T)	U (D)	U (T)
						mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
L.D.						0,256	0,256	0,006	0,006	0,021	0,021	0,025	0,025	0,012	0,012	0,064	0,064
L.Q.						0,815	0,815	0,019	0,019	0,067	0,067	0,079	0,079	0,038	0,038	0,204	0,204
Branco						ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Valor do padrão de Controle						0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Valor de recuperação do padrão						0,1794	0,1794	0,2471	0,2471	-	-	0,1932	0,1932	0,2395	0,2395	-	-
Critério de aceitação 75%a125%						89,70%	89,70%	123,55%	123,55%	-	-	96,60%	96,60%	119,75%	119,75%	-	-
Login	Logim Cliente	Data da Coleta	Data da Análise	Metodo		B (D)	B (T)	Pb (D)	Pb (T)	P (D)	P (T)	Ce (D)	Ce (T)	Ti (D)	Ti (T)	U (D)	U (T)
7518	CEOP - PA - 01	11/9/2008	17/9/2008	EPA3005A		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
						Y (D)	Y (T)										
						mg/L	mg/L										
L.D.						0,028	0,028										
L.Q.						0,090	0,090										
Branco						ND	ND										
Valor do padrão de Controle						0,2	0,2										
Valor de recuperação do padrão						0,1995	0,1995										
Critério de aceitação 75%a125%						99,80%	99,80%										
Login	Logim Cliente	Data da Coleta	Data da Análise	Metodo		Y (D)	Y (T)										
7518	CEOP - PA - 01	11/9/2008	17/9/2008	EPA3005A		ND	ND										

2.1.2. PARÂMETROS COMPLEMENTARES

			Cloreto	Sulfato	Nitrato	Condutividade	Alcalinidade	Nitrito
			mg/L	mg/L	mg/L	µs/cm	mgCaCO3/L	mg/L
L.D.			0,734	1,700	0,170	-	4,000	0,005
L.Q.			2,309	5,345	0,535	-	12,000	0,015
Branco			ND	ND	ND	-	ND	ND
Valor do padrão de Controle			5,0	20,0	1,1	1408,0	10,0	0,4
Valor de recuperação do padrão			4,68	18,40	1,10	1422,00	11,66	0,36
Critério de aceitação 75%a125%			93,60%	92,00%	97,35%	100,99%	116,60%	88,75%
Método			8113 Mercuric Thiocyanate	EPA375.4	8171 Cadmium Reduction	Standard Methods 2510A	Standard Methods 2320B	10019 Diazotization Chromotropic
Data da análise			19/9/2008	12/9/2008	11/9/2008	15/9/2008	11/9/2008	11/9/2008
Login Geochemical	Login Cliente	Data da Coleta	Cloreto	Sulfato	Nitrato	Condutividade	Alcalinidade	Alcalinidade
			mg/L	mg/L	mg/L	µs/cm	mgCaCO3/L	mgCaCO3/L
7518	CEOP - PA - 01	11/9/2008	4.33	ND	0.20	6.50	ND	0.11

3. CONSIDERAÇÃO FINAL

Declaro que todos os resultados apresentados referem-se somente a amostra ensaiada.



Jürgen Vondung
Responsável Técnico



Flavio Fantini
Coordenador Laboratório