

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE IMAGEAMENTO ELÉTRICO E CARACTERIZAÇÃO  
GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE ÁREA POTENCIALMENTE CÁRSTICA EM  
CAJAMAR/SP

Flávio Anauate Bergonzoni

Prof.Dr. Walter Malagutti Filho

Rio Claro (SP)  
2018

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

FLÁVIO ANAUATE BERGONZONI

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE IMAGEAMENTO  
ELÉTRICO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-  
GEOTÉCNICA DE ÁREA POTENCIALMENTE CÁRSTICA  
EM CAJAMAR/SP

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,  
da Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Geólogo.

Rio Claro - SP

2018

B499a      Bergonzoni, Flávio Anauate  
              Aplicação da técnica de imageamento elétrico e  
              caracterização geológico-geotécnica de área  
              potencialmente cárstica em Cajamar/SP / Flávio Anauate  
              Bergonzoni. -- , 2018  
              48 p. : il., tabs., fotos + 1 CD-ROM

              Trabalho de conclusão de curso ( - ) - Universidade  
              Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências  
              Farmacêuticas, Araraquara,  
              Orientador: Walter Malagutti Filho

              1. Geofísica. 2. Carste. 3. Geotecnia. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da  
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo  
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

FLÁVIO ANAUATE BERGONZONI

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE IMAGEAMENTO  
ELÉTRICO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-  
GEOTÉCNICA DE ÁREA POTENCIALMENTE CÁRSTICA  
EM CAJAMAR/SP

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,  
da Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Geólogo.

Comissão Examinadora

\_\_\_\_\_ (orientador)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Rio Claro, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

## **AGRADECIMENTOS**

À toda minha família, meus pais Cleide e Everaldo, meu irmão Marcelo e minha irmã Gisela por serem a base de inspirações que me moldou e me fez chegar até aqui. Aos meus avós, tios, tia-avó, madrinha, padrinho e primos pelo apoio.

À minha parceira Marina Ciccolin que vem me inspirando e me instigando a ser uma pessoa cada vez melhor. Agradeço pelo carinho, amor e a amizade em que construímos a nossa fundação.

A todos os amigos e amigas que fiz morando em diversas repúblicas durante esse tempo de graduação agradeço pela companhia, memórias compartilhadas e ensinamentos. Abraços e saudações à República Kraka-à-Toa 1976 e camaradas.

Aos meus colegas de turma os Sexy Boys 2012, pelos VMSVai e parceria do começo ao fim da graduação.

Aos que tornaram possível a realização deste trabalho e gentilmente me liberaram os dados.

A todos que conheci pelo Brasil afóra no ENEGEO, e amigos da Geologia por todas as lembranças em lugares maravilhosos e por me mostrarem que eu estava entre os meus.

A todos professores e mentores que desejaram o meu sucesso.

Ao Monstro de Espaguete Voador e a mim mesmo, em nome da ciência.

Em memória do Tio Lu, Tio Paulo e seu macarrão e pessoas queridas.

*“O general que vence uma batalha é o que gasta muitas horas no templo, em reflexões, antes de a batalha ser encetada” – Sun Tzu, A Arte da Guerra*

## RESUMO

A ocorrência de abatimentos de solo em Cajamar – SP no ano de 1986 foi atribuída à falta de conhecimento acerca do arcabouço geológico do local aonde foram construídas casas no Bairro Lavrinha considerado o centro do município. Em terrenos cársticos sujeitos a expansão urbana como é o caso da região de estudo, sugere-se o uso de métodos de investigação indiretos como a geofísica para a possível detecção de vazios estruturais e prevenção de acidentes e abatimentos de solo. O presente estudo trata-se da utilização do método da eletrorresistividade para a detecção de possíveis cavidades subterrâneas, água subterrânea, falhas, fraturas, contatos geológicos e outras estruturas de interesse em uma área aonde será realizado um empreendimento imobiliário de grande porte. Os resultados do ensaio foram usados para guiar a campanha de investigação direta que foi realizada através de um roteiro de sondagens mista: SPT no trecho de solo e rotativa em rocha. Os resultados dos métodos diretos foram posteriormente comparados e integrados aos resultados dos métodos indiretos possibilitando um estudo completo acerca da aplicação do Imageamento Elétrico para a caracterização geológico-geotécnica de um terreno possivelmente carstico.

**Palavras-Chave:** Geofísica, Eletrorresistividade, Carste, Geologia, Engenharia, cavidades

## **ABSTRACT**

The present paper presents the results of a 2D Electric Imaging method executed in an area where a real estate development will take place. The area is located in Cajamar city, São Paulo and constitutes karstic terrain which is subject to the occurrence of groundwater, dolines, soil collapses, processes that must be taken in consideration before executing any engineering project. Therefore we have a geological setting fit for the use 2D Electric Imaging method which is efficient in detecting groundwater, dissolution features, and other underground structures and elements that are of interest to the construction project. The results of the geophysical analysis were used to guide the direct investigation campaign which was executed following a mixed probing routine: SPT (Standard Penetration Test) in soil and rotating drill on the hard rocks. The results of the direct methods were compared and integrated to the indirect methods providing a complete study regarding the application of the 2D Electric Imaging technique for the geological-geotechnical characterization of a possibly karstic terrain.

Keywords: geophysics, karst, , , geology, engineering

# Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1 Histórico da Área.....	2
1.1.1 Colapso de solo em Cajamar.....	2
1.1.2. Espaço Natura.....	3
1.2 Problemas geotécnicos de áreas cársticas.....	4
1.3 Uso de geofísica em geologia de engenharia e geotecnia.....	6
<b>2. Objetivos</b> .....	8
2.1 Área de Estudo.....	8
<b>3. Materiais e Métodos</b> .....	10
3.1 Ensaio Geofísicos.....	10
3.1.1 Escolha do método.....	10
3.1.2 O método da eletrorresistividade.....	11
3.1.3. Arranjo Dipolo-Dipolo.....	16
3.1.4 Especificações de campo e materiais utilizados.....	17
3.2 Sondagens.....	20
3.2.1 Sondagem a Percussão (SPT).....	20
3.2.2 Sondagem Rotativa.....	21
<b>4. Geologia Regional</b> .....	22
4.1 Introdução.....	22
4.2 Província Mantiqueira.....	22
4.3 Cinturão Ribeira.....	23
4.4 Grupo São Roque.....	24
<b>5. Geologia Local</b> .....	26
5.1. Faixa Jaraguá-Cristais.....	26
5.2 Mapeamento Geológico-Geotécnico de superfície.....	28
<b>6. Resultados</b> .....	33
6.1 Investigação indireta (geofísica).....	33
6.2 Investigação direta (Sondagens).....	37
6.3 Seções Geológico-Geotécnicas.....	40
<b>7. Discussão</b> .....	45
7.1 Verificação das anomalias através das sondagens mistas.....	45
7.2 Condicionantes Geológico-Geotécnicos.....	47
<b>8. Conclusão</b> .....	47

<b>9. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>48</b>
--	-----------

## Índice de Figuras

Figura 1: O “buraco de Cajamar”, uma dolina de colapso.....	3
Figura 2: Modelo de terreno cárstico .....	4
Figura 3: Localização do município de Cajamar no Estado de São Paulo.....	8
Figura 4: Imagem de satélite da localização da área de estudo.....	9
Figura 5: Fluxograma para escolha do método geofísico adequado.....	10
Figura 6: O método da eletrorresistividade dentro do contexto dos métodos geofísicos aplicados .....	11
Figura 7: Representação das linhas de equipotencial em meio homogêneo constituindo um semi-círculo a partir da injeção de uma fonte pontual (A) na superfície do terreno.....	12
Figura 8: Esquema básico de aquisição do método da eletrorresistividade, com os pares de emissão de corrente (A e B) e de medida de potencial (M e N)..	13
Figura 9: Arranjo Dipolo-Dipolo para 5 níveis de investigação.....	17
Figura 10: Localização das 6 seções de imageamento elétrico.....	18
Figura 11: Abertura das picadas seguindo as estacas da topografia.....	19
Figura 12: Foto do equipamento utilizado: Eletrorresistivímetro SAS-1000, eletrodos de aço inoxidável, bobina de cabos condutores, bateria de 12V, marretas.....	20
Figura 13: Esquema do amostrador padrão usado nos ensaios SPT.....	21
Figura 14: A província Mantiqueira e suas subdivisões.....	23
Figura 15: O Cinturão Ribeira e suas principais unidades. Adaptado de Hasui.....	24
Figura 16: Coluna estratigráfica para a Faixa Jaraguá-Cristais.....	26
Figura 17: Mapa Geológico da Região. Editado de CPRM (2006). O polígono vermelho define a área de estudo e estão indicadas a empresa Natura e a cidade de Cajamar ambos locais onde ocorreram abatimentos de solo.....	27
Figura 18: Mapa com as estruturas regionais.....	28
Figura 19: Pontos do mapeamento geológico-geotécnico de superfície.....	29
Figura 20: Saprolito de xisto micáceo com foliação de direção N40E e mergulho 35NW.....	30
Figura 21: Mica-xisto alterado foliado.....	30
Figura 22: Amostra do ponto HAR-13 apresentando clivagem de crenulação.....	31
Figura 23: Colúvio de matriz silto-argilosa com fragmentos de rocha e pedregulho (mm), marrom avermelhado. Ponto HAR-01.....	31
Figura 24: Colúvio com fragmentos centimétricos de quartzo. Ponto HAR-02.....	32
Figura 25: Nascente de água com material de aluvião no ponto HAR-06.....	32
Figura 26: Modelo de inversão para a Linha 1.....	34
Figura 27: Modelo de inversão para a Linha 2.....	34
Figura 28: Modelo de inversão para a Linha 3.....	35
Figura 29: Modelo de inversão para a Linha 4.....	35
Figura 30: Modelo de inversão para a Linha 5.....	36
Figura 31: Modelo de inversão para a Linha 6.....	36
Figura 32: Planta das sondagens executadas.....	37
Figura 33: Planta das Seções Geológico-Geotécnicas .....	40
Figura 34: Seções A'-A e B-B'.....	41
Figura 35: Seções C-C' e D-D'.....	42
Figura 36: Seções E-E' e F-F'.....	43
Figura 37: Seção G-G'.....	44

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Dados das sondagens a percussão (códigos SP e HZ) e mistas (SM) realizada.....	39
--	----

# 1. Introdução

A execução de obras e projetos de engenharia, de pequeno a grande porte, precede estudos geológico-geotécnicos necessários para que a sua construção e implantação ocorram de forma segura e a garantir a integridade estrutural dos empreendimentos. Portanto não é suficiente um reconhecimento geológico de superfície, sendo também necessários estudos acerca da natureza geológica em subsuperfície.

De acordo com Chiossi (2007) as investigações geológicas em subsuperfície são realizadas através de dois métodos principais: indiretos ou geofísicos e diretos ou mecânicos. Os métodos indiretos se baseiam na interpretação de parâmetros físicos obtidos na superfície do terreno, de modo que não é possível identificar rochas e formações litológicas com base apenas nas propriedades físicas, sendo necessária a integração dos dados geofísicos obtidos com as informações geológicas (CHIOSSI, 2007).

Considerando-se a natureza dos dados fica evidente que qualquer projeto voltado para a engenharia que faça uso de geofísica deve ser acompanhado de revisão bibliográfica, uso de mapas geológicos existentes e estudos de geologia regional. Já os métodos diretos fazem uso de perfurações ou sondagens do subsolo, consistindo no método mais clássico de investigação em subsuperfície. É necessário ressaltar que a utilização de métodos geofísicos não implica no abandono dos métodos convencionais de investigação e dados diretos oriundos de sondagens ou amostragens serão sempre importantes para auxiliar na interpretação de dados geofísicos, com a finalidade de se estabelecer um modelo geológico para a área investigada (SOUZA et al., 2013).

O principal objetivo dessas investigações é esclarecer as condições geológicas ou seja, quais os tipos de rochas existentes e quais os seus elementos estruturais (linhas de contato, fraturas, falhas e dobras).

Tendo em vista a existência de diversos métodos geofísicos destaca-se o método da eletrorresistividade que através de suas duas principais técnicas de investigação em superfície, a sondagem elétrica e caminhamento, é seguramente o que encontra maior abrangência nas aplicações voltadas à geologia em diversas áreas como hidrogeologia, mapeamento geológico, mineração, engenharia civil e estudos ambientais em geral (GANDOLFO, 2007).

É importante notar que a configuração do substrato geológico e a presença ou não de certos tipos de rocha na região são fatores importantes a serem considerados na elaboração do projeto de investigação da área e irão acarretar em metodologias diferentes de investigação. No caso deste estudo por se tratar de uma região cárstica com a presença de rochas carbonáticas e um conhecido histórico de colapso e subsidência de solos, a escolha para a metodologia de investigação foi direcionada a fim de se prevenir problemas geológico-geotécnicos decorrentes da ocupação de uma área com esse tipo de arcabouço geológico.

## 1.1 Histórico da Área

### 1.1.1 Colapso de solo em Cajamar

O evento de abatimento de solo em Cajamar no ano de 1986 tornou-se um caso conhecido não só pela velocidade que ocorreu o abatimento mas pelo fato de que ocorreu no Bairro Lavrinhas considerado o Centro da cidade (Figura 1). A dolina de colapso atingiu 50 metros de diâmetro e 13 metros de profundidade condenando oito casas e causando trincas em outras dezenas de imóveis sendo que o dano se estendeu até o Bairro Vila Branca (Diário Cajamarense, 2018). Acredita-se que o problema ocorreu devido a um conjunto de fatores: extração de água subterrânea e vibrações causadas por planos de fogo em uma pedreira próxima. De acordo com Albrecht (1998) o processo por desmonte de explosivo, tráfego urbano e regional e operações de máquinas industriais criam ondas nos interiores de maciços rochosos. Considerando-se o impacto geológico-geotécnico essas vibrações podem causar colapsos e subsidências no terreno e danos a construções. Além disso o rebaixamento do lençol freático altera a dinâmica de suporte dos materiais e é causa comum do aparecimento de dolinas de colapso e subsidência.



Figura 1: O “buraco de Cajamar”, uma dolina de colapso. Retirado de: O Diário Cajamarense (2018).

### 1.1.2. Espaço Natura

Outro caso de subsidência de solos relacionado a evolução de processos cársticos ocorreu na fábrica da Natura localizada no km 30,5 da Rodovia Anhanguera distante três quilômetros da área de estudo no ano de 2004. O complexo foi construído num espaço de 678.000 m<sup>2</sup> e inclui 12 edifícios com quatro fábricas, almoxarifado vertical, laboratórios de pesquisa, áreas administrativas entre outras.

O almoxarifado vertical da instalação é um projeto moderno com 30,5 metros de altura e capacidade para 24 mil paletes de produtos e embalagens funciona de forma automatizada: a movimentação de produtos e embalagens é controlada por softwares de leitura ótica para a localização exata dos paletes. Carros automáticos são guiados pelos softwares até as prateleiras que são identificadas por códigos de barra lidos por um sistema de alta precisão. Foi justamente essa precisão que alertou os técnicos do local que as estruturas estavam sofrendo recalque.

Foram conduzidos diversos estudos que concluíram que os problemas de assentamento de solo e recalque estavam associados à evolução de fenômenos cársticos. Existiam em subsuperfície cavernas calcárias preenchidas com solos de baixa resistência. Sondagens a

percussão e rotativas interceptaram os calcários abaixo de solos residuais de micaxisto. As rochas carbonáticas se encontravam dobradas com eixos alinhados na direção E-W. As dobras possuem comprimento de onda da ordem de 700m.

Em uma primeira tentativa de solução do problema foi injetado concreto de baixa mobilidade o que acelerou o recalque das estruturas. A solução final foi a injeção de uma massa de cimento em alta pressão misturada com solo gerando um "barro cimentado" capaz de prover resistência e preencher os espaços vazios (NATURA, 2004).

## 1.2 Problemas geotécnicos de áreas cársticas

Áreas cársticas ao longo do tempo foram progressivamente sujeitas a ocupação intensa, devendo-se principalmente aos potenciais agrícolas de fundos de vales e aos mananciais hídricos. Concomitantemente à implantação de centros urbanos e industriais sobre terrenos cársticos surgem os problemas ligados ao uso e ocupação destas áreas, sendo os principais os colapsos e subsidências. (ALBRECHT, 1998). As rochas sedimentares carbonáticas, calcários e dolomitos, são essencialmente compostas por calcita, aragonita ou dolomita. Tais sedimentos foram gerados principalmente por processos biológicos e bioquímicos. (TUCKER & BRITO, 2017). A figura 2 apresenta um modelo para um terreno cárstico.

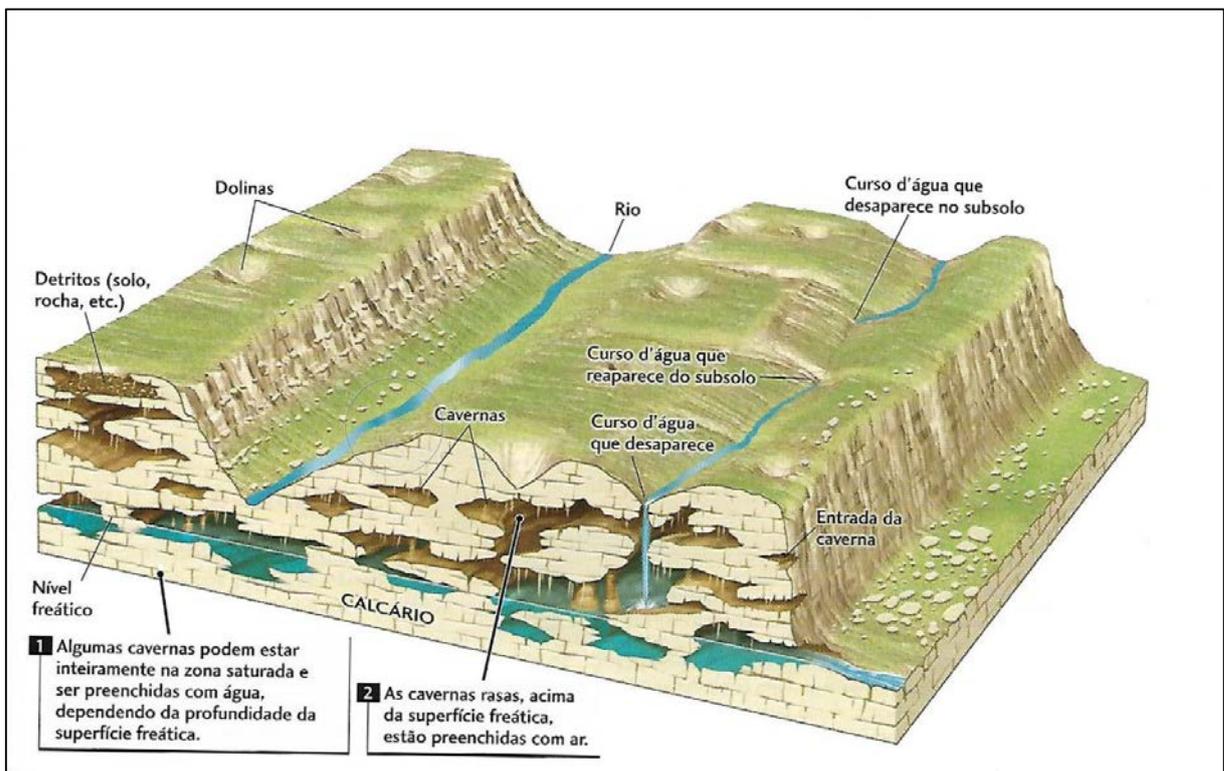


Figura 2: Modelo de terreno cárstico. Retirado de PRESS et al., 2006

Os problemas são diretamente ligados à mineralogia de rochas carbonáticas que compõem terrenos cársticos: os minerais calcita, aragonita e dolomita são passíveis de dissolução química originando cavidades subterrâneas, feições de dissolução e formas de relevo que são características. Os processos que levam à formação dessas formas de relevo são definidos como processos de carstificação (ALBRECHT, 1998). A carstificação pode ser definida como um conjunto de reações químicas que se dá em local de rochas solúveis, como consequência da ação combinada de fluídos e gases como: CO<sub>2</sub>, ácidos húmicos, água, entre outros.

É importante notar considerando-se os fatores climáticos que em regiões tropicais aonde as águas tem temperaturas maiores o processo de dissolução e evolução de cavidades é acelerado (FURRIER et al., 2011). Segundo Albrecht (1998) o clima através da temperatura e precipitação controla a quantidade de água disponível para as reações químicas de dissolução, a produção e concentração de CO<sub>2</sub>, cobertura vegetal e formação de ácidos húmicos e o relevo, fatores que influem nos processos de dissolução em terrenos cársticos.

No meio natural a maioria dos processos de solubilização envolvem ácidos fracos. No caso dos carbonatos e dolomitos existe a dissolução através do ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Podemos observar na seguinte equação química a reação de formação do ácido carbônico:



ou



Sendo assim pode-se dizer que a solubilidade das rochas carbonáticas na natureza é controlada pelo equilíbrio entre H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e H<sub>2</sub>O que dependem da quantidade e teor de CO<sub>2</sub> dissolvido na solução que passa pelo meio rochoso (ALBRECHT, 1998).

A dolina é considerada por definição como uma depressão fechada com contornos circulares, de diâmetro superior à sua profundidade. De acordo com Albrecht (1998) temos seis tipos de dolinas: dolinas de dissolução, dolinas de colapso, dolinas de subsidência, dolinas de

carste subjacente, dolinas de arrasto e dolinas aluviais. O caso de subsidência de solo em Cajamar foi classificado como uma dolina de colapso vinculada a evolução de processos cársticos (SANTORO et al., 1988), enquanto que o caso na fábrica da Natura foi caracterizado por uma dolina de subsidência lenta, preenchida por sedimentos inconsolidados. As dolinas de colapso são originadas a partir do desabamento de teto de cavernas num processo rápido. Neste tipo de dolina podem se originar cenotes, ou lagos cársticos, caracterizados pela exposição de água subterrânea no fundo da estrutura (ALBRECHT, 1998). No caso de Cajamar é possível observar a existência dos cenotes (Figura 1).

### 1.3 Uso de geofísica em geologia de engenharia e geotecnia

A geofísica aplicada vem desempenhando um importante papel nos últimos anos em projetos de engenharia, prospecção de bens minerais e estudos ambientais. Entre alguns exemplos de projetos que se utilizam de geofísica podem ser citados: locação de poços para captação de água subterrânea, mapeamento de plumas de contaminação e do contato entre água-doce e água salgada, detecção de cavidades subterrâneas, detecção de blocos de rocha, identificação de zonas de fratura em maciços rochosos, determinação da profundidade do topo rochoso, mapeamento de utilidades como dutos, galerias e adutoras, identificação de vazamentos em barragens, definição de volume de material para dragagem em regiões portuárias ou do volume do material assoreado em reservatórios ou em hidrovias (SOUZA et al., 2007).

A combinação de diversas metodologias dentro da geofísica pode ser considerada para gerar resultados ainda mais precisos. A combinação por exemplo do uso de radar de penetração do solo (GPR), eletrorresistividade e gravimetria se mostraram eficientes na detecção de cavidades em arenitos numa lavra de areia em Descalvado, SP (DOURADO et al., 2011). Em um outro caso podemos observar a aplicação de métodos elétricos em aterros sanitários aonde foram usados eletrorresistividade e polarização induzida com a finalidade de, através do cruzamento dos resultados dos ensaios, determinar a geometria das cavas de resíduos, zonas de percolação de chorume e diferentes litotipos. (MOURA & MALAGUTTI FILHO, 2003)

Dentre as diversas vantagens da utilização de geofísica em projetos de geotecnia e meio ambiente podemos citar: a natureza não-invasiva dos métodos, considerando-se o crescente cuidado com o meio-ambiente nos dias atuais; a rapidez de execução dos ensaios em campo; a amplitude da cobertura dos levantamentos em contraste com os métodos diretos que são

usualmente pontuais. Como desvantagens podemos citar os altos preços dos equipamentos; necessidade de mão de obra especializada; a presença de ruídos, ruas pavimentadas, tráfego intenso de veículos podem impor dificuldades na aquisição dos dados.

Levando-se em consideração o método da eletrorresistividade além das diversas aplicações em geotecnia observam-se ótimos resultados em investigações ambientais devido ao contraste entre as propriedades elétricas causados pela dispersão de contaminantes (SOUZA et al., 2007). Também observa-se aplicação para estudos de estabilidades de barragens e de maciços rochosos (WARD, 1990). Por configurar um método de simples execução e baixo custo, a eletrorresistividade gera resultados satisfatórios e pode ser utilizada com uma vasta aplicação em geociências (GANDOLFO, 2007).

## 2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é fornecer através de um modelo geológico-geotécnico as informações necessárias para a implantação de um grande empreendimento imobiliário. O local será usado para implantação de indústria e galpões industriais, para tanto serão executados trabalhos de terraplenagem, cortes e aterros.

Como objetivo específico o reconhecimento da ocorrência de cavidades subterrâneas e feições de dissolução cárstica, a partir de ensaios geofísicos e sondagens.

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na cidade de Cajamar (SP) (Figura 3), no Bairro Gaturinho, sob o endereço Rua José Marques Ribeiro, 414 (Figura 4). O acesso à área se dá saindo de Rio Claro primeiramente pela Rodovia Washington Luiz SP-310 na direção de Santa Gertrudes /Cordeirópolis. Depois pega-se a saída 153A para a Rodovia Anhanguera SP-330. Segue-se até Vila Nova / Cajamar e entrando a saída 35. Continua-se na Avenida Prefeito Juvenal Ferreira do Santos até a Rua José Marques Ribeiro.



Figura 3: Localização do município de Cajamar no Estado de São Paulo. Fonte: editado de <https://pt.wikipedia.org/wiki/Cajamar>



Figura 4: Imagem de satélite da localização da área de estudo, definida pelo polígono vermelho. Fonte: editado de Google Earth.

A área está inserida no contexto geomorfológico do Planalto Atlântico. O relevo é constituído de formas de topos convexos, elevada densidade de drenagens e vales profundos, recebendo a denominação clássica de "mares de morros" (ALMEIDA, 1964). Este relevo é sustentado por litologias diversas, geralmente compostas por rochas metamórficas associadas a rochas intrusivas.

Em termos hidrográficos, a região possui vários cursos d'água significativos, com destaque para o Rio Juqueri e córregos como o Itaim e Jaguari. Em termos de vegetação temos a predominância de gramíneas com remanescentes de Mata Atlântica, sendo a porção NE da área mais densamente florestada.

### 3. Materiais e Métodos

O desenvolvimento do trabalho se deu inicialmente com pesquisa e levantamento bibliográfico seguido de reconhecimento inicial de campo, ensaios de eletrorresistividade e uma campanha de sondagens mista (SPT e Rotativa).

#### 3.1 Ensaio Geofísicos

##### 3.1.1 Escolha do método

Como citado anteriormente existem diversos métodos geofísicos e a escolha do método e técnica mais apropriada é de suma importância para a obtenção dos parâmetros e informações desejados. Sendo assim antes da escolha da técnica devem ser considerados diversos fatores como: objetivos, geologia e hidrogeologia local e critérios de análise para os ensaios. A figura 5 apresenta um fluxograma eficiente para a escolha do método recomendado. Analisando-se o fluxograma com as variáveis inseridas, chega-se à conclusão de que no contexto dos métodos geoeletricos e ensaios de eletrorresistividade a escolha adequada para este trabalho seria a técnica do imageamento elétrico utilizando-se arranjo Dipolo-Dipolo (D-D).

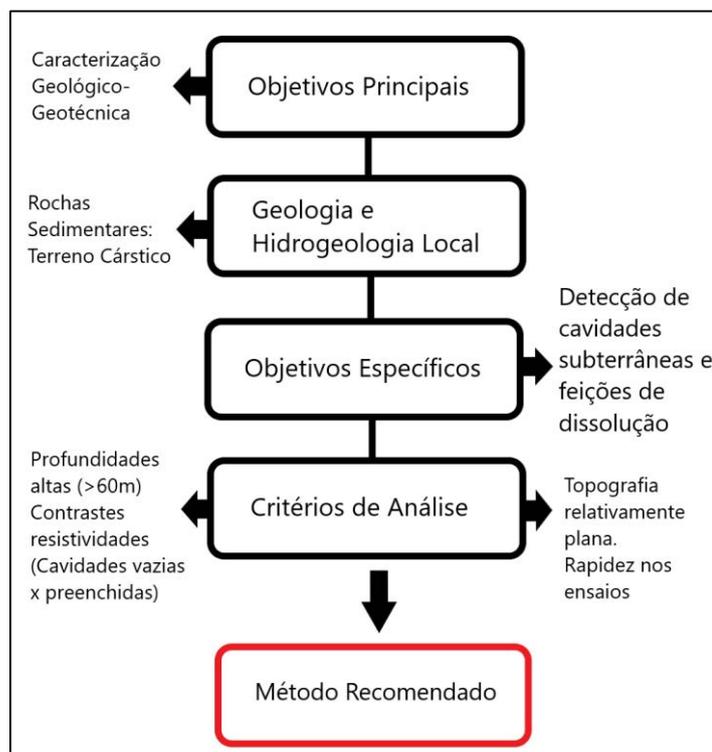


Figura 5: Fluxograma para escolha do método geofísico adequado. Fonte: adaptado de BRAGA (2016).

### 3.1.2 O método da eletrorresistividade

Os métodos geoeletricos constituem um grande grupo no qual se inserem os métodos elétricos e os eletromagnéticos (WARD, 1990). Os métodos da eletrorresistividade, polarização induzida (IP) e do potencial espontâneo fazem parte do grupo denominado "métodos elétricos de prospecção" (GANDOLFO, 2007). Os parâmetros físicos investigados neste caso são a resistividade e a condutividade elétrica. A figura 6 posiciona o método da eletrorresistividade no contexto dos métodos geofísicos de prospecção. Existem três modos básicos de operação ou técnicas de aquisição de dados para os métodos de eletrorresistividade: sondagem, perfilagem e sondagem-perfilagem. A perfilagem se refere aos métodos pontuais que investigam em profundidade como as Sondagens Elétricas Verticais (SEV). Já na perfilagem o arranjo elétrico se movimenta à medida que se realiza o ensaio, gerando um perfil em duas dimensões. Uma investigação completa significa a combinação desses modos para delinear tanto variações laterais quanto verticais (WARD, 1990).

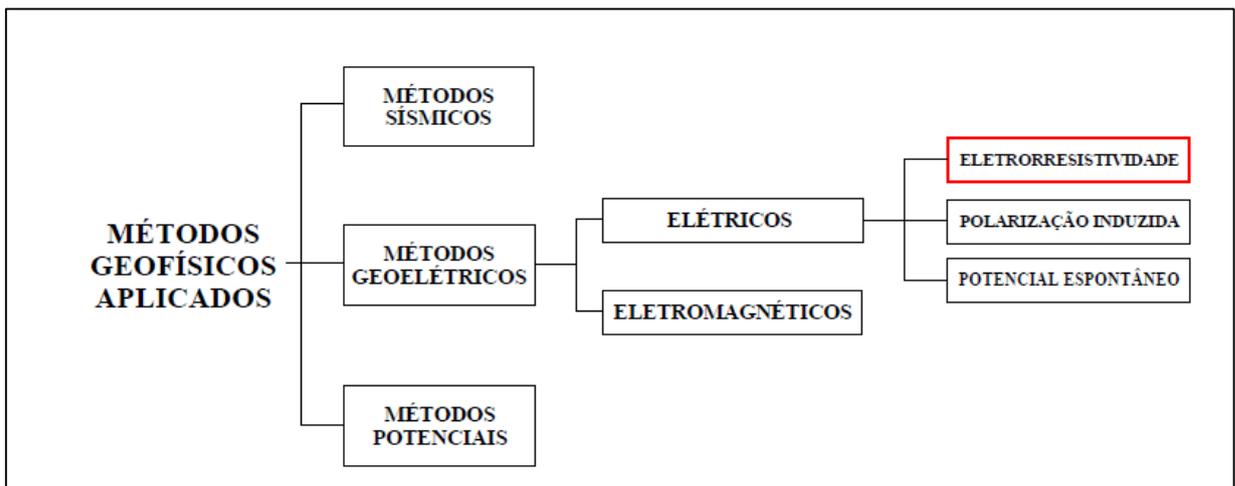


Figura 6: O método da eletrorresistividade dentro do contexto dos métodos geofísicos aplicados. Fonte: Retirado de GANDOLFO (2007).

De acordo com Gandolfo (2007) uma das principais propriedades dos materiais geológicos é a resistividade elétrica expressa no Sistema Internacional de Unidades (SI) em unidades de ohm.m ( $\Omega \cdot m$ ). Um corpo cilíndrico de material homogêneo de comprimento  $L$  e seção transversal  $S$  terá a resistividade  $\rho$  definida pela equação:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L}$$

Onde R corresponde a resistência elétrica do corpo. Dentre os fatores que condicionam a resistividade de rochas e solos podemos citar alguns de maior importância: porosidade, composição mineralógica, grau de saturação, resistividade do fluido nos poros, tamanho e forma das partículas sólidas. Segundo Ward (1990) no geral os processos geológicos tendem a reduzir a resistividade elétrica de uma rocha, porém há exceções. Dentre os processos que reduzem a resistividade do meio rochoso podemos citar alterações argílicas, feições de dissolução, fraturas e falhas, intrusões salinas e intemperismo. Como processos que aumentam a resistividade podemos citar a silicificação e precipitação de carbonatos. No caso de rochas afetadas por metamorfismo podemos ter variações que aumentam ou diminuem a resistividade. (WARD, 1990).

Considerando-se uma fonte pontual (A) injetando corrente (I) na superfície do terreno, sendo (B) o eletrodo que fecha o circuito de corrente localizado a uma grande distância do ponto (A) e ( $\rho$ ) a resistividade elétrica. Considerando-se o conceito de potencial elétrico (V) deduzido a partir da lei de Ohm e após manipulação matemática temos que:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r}$$

Como a fonte pontual está localizada na superfície do terreno e o ar constitui um isolante com resistividade que pode ser considerada infinita, observamos que a dispersão de corrente se desenvolverá em um semi-círculo a partir da superfície do terreno (Figura 7).

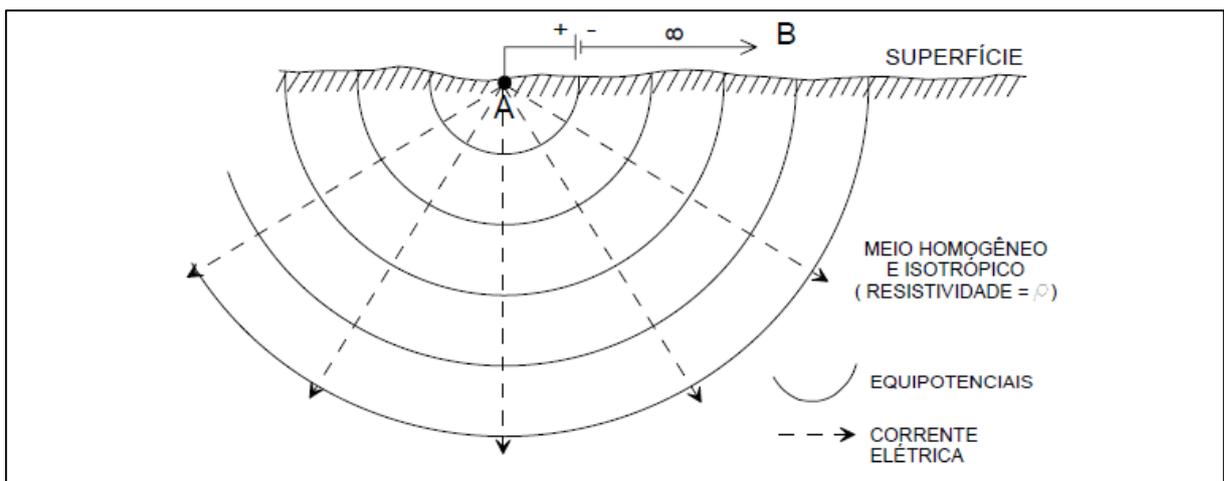


Figura 7: Representação das linhas de equipotencial em meio homogêneo constituindo um semi-círculo a partir da injeção de uma fonte pontual (A) na superfície do terreno. Fonte: Retirado de GANDOLFO (2007).

Sendo assim temos um potencial elétrico  $V$  duas vezes maior que o potencial observado:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Esta equação fornece uma relação fundamental para o método da eletroresistividade com medidas realizadas na superfície do terreno (GANDOLFO, 2007). Por se tratar de uma grandeza escalar o Potencial Elétrico pode ser somado ou subtraído. Tendo em mente a existência de diversas fontes de corrente, o potencial total em um ponto pode ser calculado através da soma das contribuições de potencial de cada fonte. Ou seja, para "n" fontes de correntes o potencial observado em um ponto M será:

$$V_M = \frac{\rho}{2\pi} \left[ \frac{I_1}{r_1} + \frac{I_2}{r_2} + \dots + \frac{I_n}{r_n} \right]$$

Onde  $I_n$  é a corrente proveniente da fonte de corrente "n" e  $r_n$  a distância desta fonte até o ponto aonde observa-se o potencial. Como temos um eletrodo conduzindo corrente e outro para que o circuito se feche e ocorra a passagem de corrente elétrica no subsolo, temos dois pares de eletrodos: os de emissão de corrente e os de medida do potencial (Figura 8).

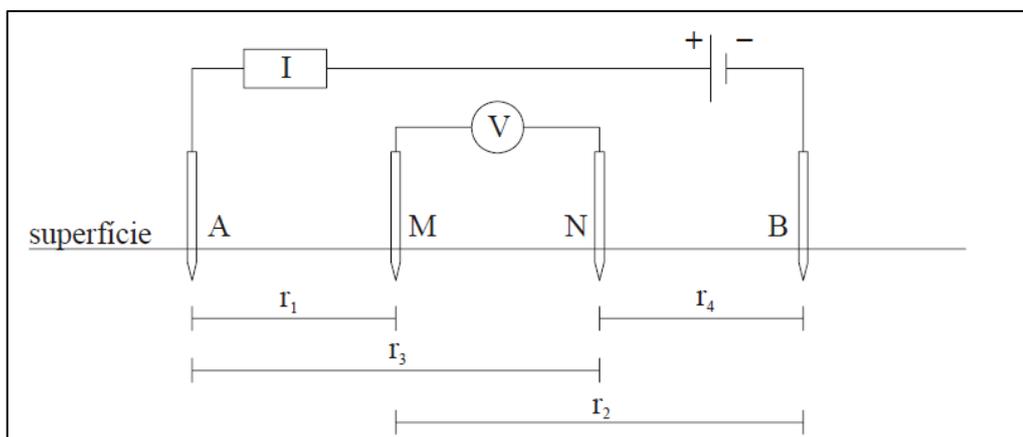


Figura 8: Esquema básico de aquisição do método da eletroresistividade, com os pares de emissão de corrente (A e B) e de medida de potencial (M e N). Fonte: Retirado de GANDOLFO (2007).

O potencial elétrico no ponto M devido a corrente I circulando entre os eletrodos A e B sendo  $r_1$  a distância entre M e A, e  $r_2$  a distância entre M e B, será dado por:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right]$$

Enquanto que analogamente o potencial no ponto N será:

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right]$$

Como em campo medimos a diferença entre os potenciais a medida da diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre os pontos M e N será:

$$V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]$$

Substituindo-se as distâncias entre os respectivos eletrodos temos que a diferença de potencial será dada por:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]$$

Quando isolamos a resistividade ( $\rho$ ) temos que:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1}$$

A partir desta equação podemos definir um fator geométrico K dado por:

$$K = 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1}$$

Assim teremos:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

A equação acima é uma síntese do método da eletrorresistividade: Através da injeção de uma corrente (I) na superfície por um par de eletrodos (A e B) temos uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) que resulta da passagem da corrente através de outro par de eletrodos (M e N). A razão entre a voltagem medida e a corrente introduzida é a resistência elétrica ( $\rho$ ) que como visto anteriormente é expressa em ohms.m.

Considerando-se o fato de que a Terra não constitui um sistema homogêneo nem isotrópico, o valor de resistividade irá variar de um ponto para o outro, tanto lateralmente quanto em profundidade. Como consequência o valor medido em superfície também irá variar. Portanto cada medida pode ser considerada como a “resistividade aparente” já que a aplicação do método é idealizada para um meio homogêneo e não podemos considerar as resistividades medidas como reais (WARD, 1990). Sendo assim podemos expressar a última equação de uma forma melhor:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Onde  $\rho_a$  é a resistividade aparente. A resistividade aparente é uma medida resultante e influenciada pelas diversas resistividades presentes numa área investigada, e constitui uma base para a interpretação de dados de eletrorresistividade (GANDOLFO, 2007). Este conceito é importante pois a resistividade aparente é um parâmetro que pode variar ao longo de uma seção, sendo indicativo da presença de anomalias elétricas resistivas ou condutivas.

A constante K é expressa em unidades de comprimento portanto depende apenas da geometria da disposição dos quatro eletrodos (A, B, M e N). Estes quatro eletrodos podem ser dispostos de diversas formas sobre a superfície do terreno sendo que as diferentes disposições são chamadas de "arranjos". Cada arranjo apresenta vantagens e desvantagens sendo que os mais utilizados recebem nomenclaturas próprias como: Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo, Pólo-Dipolo, Pólo-pólo, gradiente. (GANDOLFO, 2007).

### 3.1.3. Arranjo Dipolo-Dipolo

A escolha do arranjo depende de uma série de fatores como profundidade de investigação almejada, razão sinal/ruído e o tipo de alvo a ser mapeado. O arranjo D-D é descrito por Gandolfo (2007) como o arranjo mais difundido dentre os existentes com amplas utilizações nas áreas de mineração, prospecção de água subterrânea, estudos ambientais e geologia de engenharia. Uma das principais vantagens do uso deste arranjo é o fato de se tratar de um arranjo simétrico, o que torna o posicionamento das anomalias mais correto além de facilitar e agilizar a operação em campo. O ensaio realizado em campo através do método Dipolo-Dipolo é executado através de uma série de medidas aonde se mantém fixo tanto o espaçamento dos dipolos de emissão (A e B) quanto os de recepção (M e N) e à medida que eles são separados de acordo com um fator "n.a" temos diferentes níveis de investigação em profundidade (Figura 9).

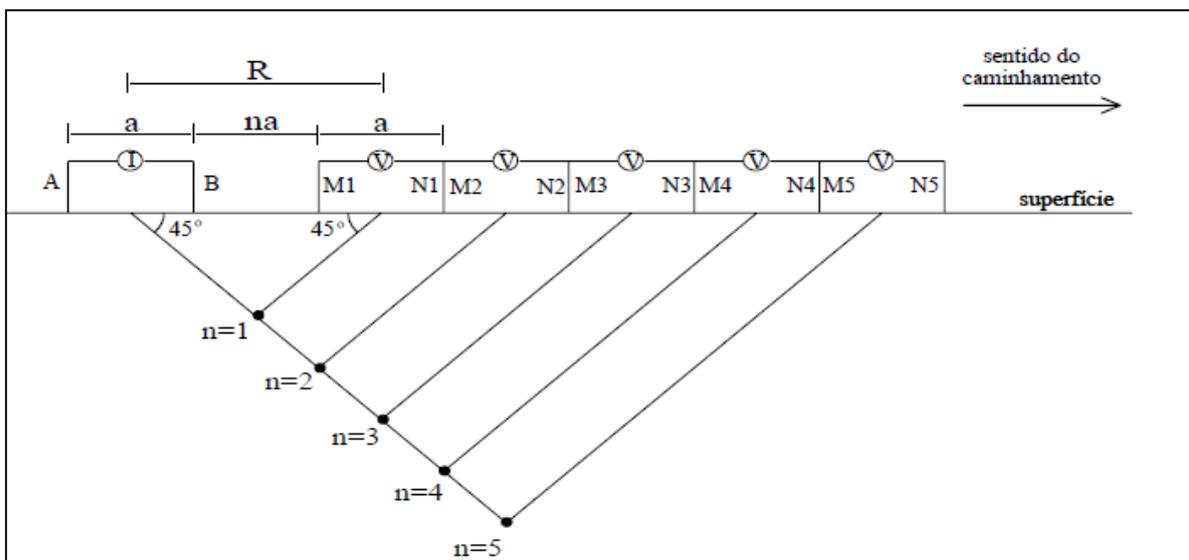


Figura 9: Arranjo Dipolo-Dipolo para 5 níveis de investigação. Fonte: Retirado de GANDOLFO (2007).

A partir da figura 9 observamos que como o valor medido de resistividade elétrica aparente se localiza na intersecção de retas que partem a 45° do centro dos dipolos.

De acordo com essa representação no arranjo Dipolo-Dipolo a profundidade teórica de investigação será:

$$\frac{R}{2} = \frac{a \cdot (n+1)}{2}$$

Aonde “R” representa a profundidade teórica de investigação, “a” os níveis de investigação e “n” a medida da separação entre os eletrodos.

### 3.1.4 Especificações de campo e materiais utilizados

Os dados foram adquiridos ao longo de seis linhas de caminhamento (Figura 10) totalizando um total de 3.300 metros com espaçamento entre os eletrodos de 20 metros (a) e cinco níveis de investigação (n). Sendo assim espera-se uma profundidade investigada de R=60m. As seis linhas foram posicionadas ao longo do terreno investigado a fim de se identificar possíveis cavidades, água subterrânea, contatos litológicos, falhas e outras discontinuidades de maneira que sejam obtidas informações para direcionar de forma otimizada a campanha de ensaios diretos.

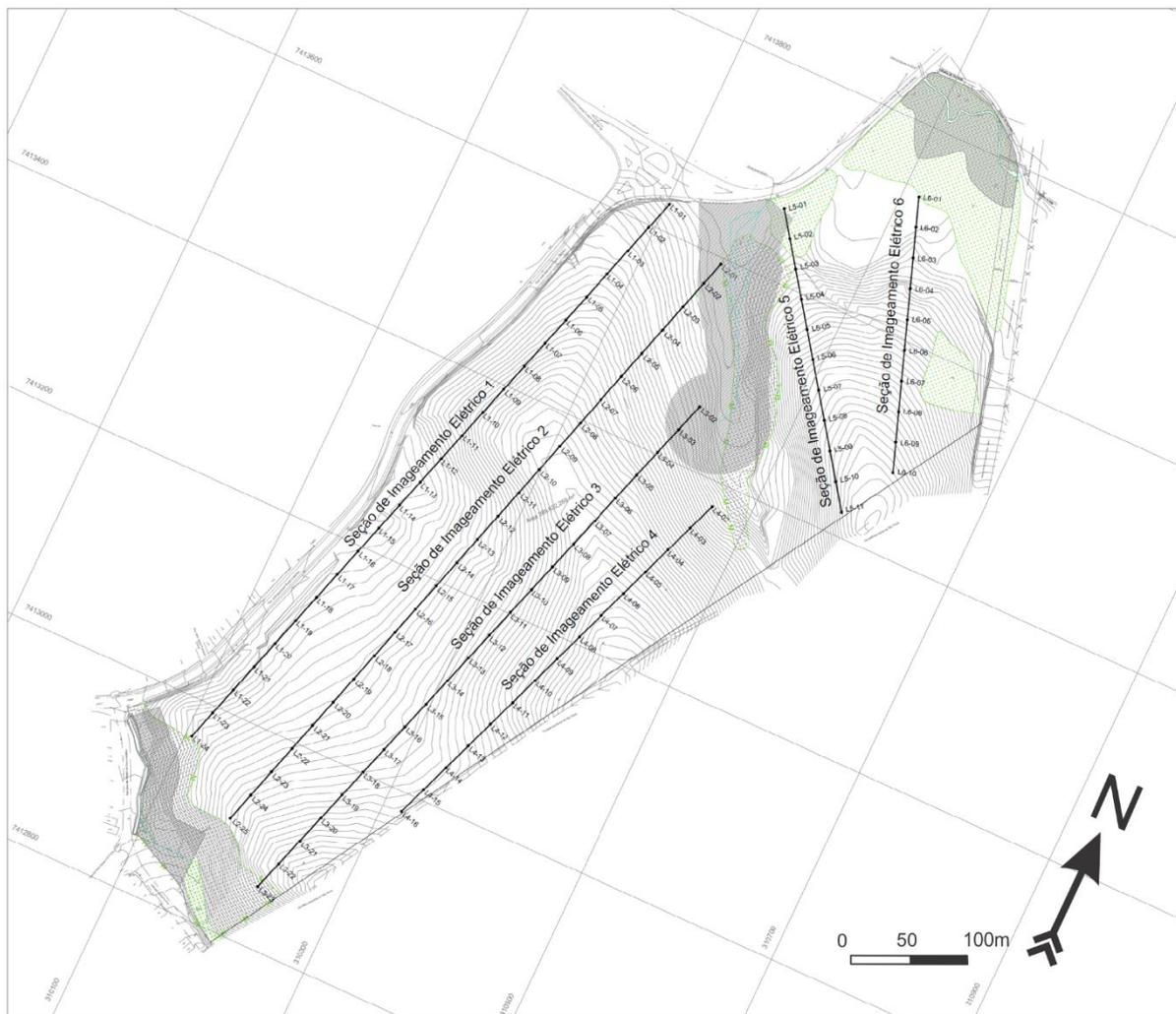


Figura 10: Localização das 6 seções de imageamento elétrico.

A execução de trabalhos de topografia e estaqueamento foi realizada anteriormente aos ensaios geofísicos por empresa terceirizada a fim de se marcar precisamente os locais de inserção de eletrodos (Figura 11). Desta forma existe um controle de qualidade acerca do posicionamento geográfico dos locais de medida não sendo necessário o uso do GPS e trena nos ensaios geofísicos, consequentemente agilizando a realização do trabalho.

No caso de áreas intensamente vegetadas para a realização dos ensaios de caminhamento elétrico é necessário que se criem condições para a passagem dos fios e movimentação de equipamento. Para tal muitas vezes é necessária a abertura de picadas no terreno como foi o caso deste trabalho (Figura 11). A abertura das picadas foi direcionada pelas estacas posicionadas pelos trabalhos de topografia. Nas estacas é possível observar a linha de caminhamento e o ponto de medida.



Figura 11: Abertura das picadas seguindo as estacas da topografia. Foto do autor.

O equipamento utilizado foi eletrorresistivímetro digital modelo SAS-1000 fabricado pela ABEM – AB da Suécia versão 2014 além de eletrodos de aço inoxidável com 40cm de comprimento e 20mm de diâmetro, bateria de 12V comum e conjunto de cabos condutores de diferentes cores que conduzem as correntes elétricas induzidas nos eletrodos de corrente e gerada nos eletrodos de potencial (figura 12).

Os dados obtidos de resistividade foram processados através do software Res2Inv que faz a inversão dos dados para gerar perfis de imageamento elétrico em duas dimensões. A inversão é feita a partir da geração de pseudo-seções de resistividade aparente. A medida aparente é expressa em ohm.m da mesma maneira que a resistividade real e como em situações reais temos alta heterogeneidade do meio natural e variações tanto laterais quanto de profundidade, os valores medidos irão variar para cada posição e arranjo / disposição de eletrodos utilizado (GANDOLFO, 2007). Em casos de ambientes mais homogêneos como camadas estratificadas as pseudo-seções possibilitam boas análises qualitativas. O software de inversão faz uma série de interações a partir da pseudo-seção aparente medida de forma a buscar um modelo matemático de parâmetros físicos que mais se aproxima ao modelo gerado a partir dos dados obtidos em campo. Sendo assim após a inversão temos uma pseudo-seção de

resistividade aparente calculada e um modelo geométrico conhecido a partir do qual é elaborada a seção de resistividade final. Estima-se que os resultados dos ensaios estejam bons quando as pseudo-seções de resistividade aparente medida se assemelham às pseudo-seções de resistividade aparente calculada.



Figura 12: Foto do equipamento utilizado: Eletrorresistivímetro SAS-1000, eletrodos de aço inoxidável, bobina de cabos condutores, bateria de 12V, marretas. Foto do autor.

## 3.2 Sondagens

### 3.2.1 Sondagem a Percussão (SPT)

Em solos, sedimentos e rochas intemperizadas o tipo de sondagem mais usual é a percussão, utilizada em larga escala na engenharia civil. A amostragem é feita cravando-se um amostrador padrão, por meio de golpes de um peso de 65kg caindo em queda livre de 75 cm (Figura 13). Anota-se o número de golpes necessários para a penetração de cada 15 cm até a penetração total de 45cm do amostrador. A partir da leitura do número de golpes para cravação do amostrador temos o índice de resistência a penetração. Quando se anota a penetração apenas nos últimos 30cm (após a penetração dos 15cm iniciais) temos a medida de S.P.T (Standard Penetration Test). Com base nos valores de resistência a penetração, pode-se estimar as pressões admissíveis no terreno para a instalação de fundações (CHIOSSI, 2007).

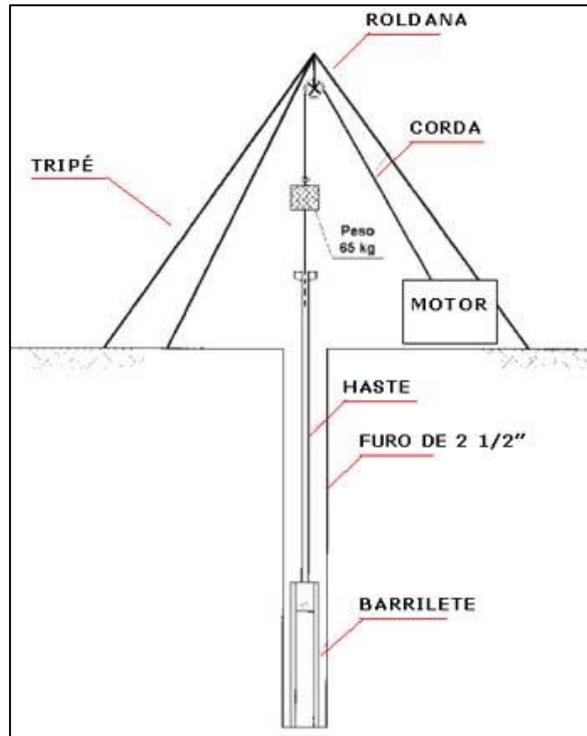


Figura 13: Esquema do amostrador padrão usado nos ensaios SPT. Fonte: Chioffi (2007).

### 3.2.2 Sondagem Rotativa

As sondagens rotativas permitem a extração de amostras de rocha de grandes profundidades. As sondagens rotativas constituem um método importante e eficaz para a exploração em subsuperfície. Além da determinação dos tipos de rocha e seus contatos também é possível determinar os elementos estruturais presentes (xistosidade, falhas, fraturas, dobras) e o estado de fraturamento e alteração da rocha (CHIOSSI, 2007).

## **4. Geologia Regional**

### 4.1 Introdução

A área de estudo está situada no contexto geotectônico da Província Mantiqueira, ou Sistema Orogênico Mantiqueira. A província constitui uma faixa que se estende ao longo da costa brasileira desde o Rio Grande do Sul ao Sul da Bahia (HASUI, 2012). As rochas estão dentro do Grupo São Roque, no Cinturão Ribeira em uma faixa definida por Carneiro (1983) como a Faixa Jaraguá Cristais, que compreende a área entre o pico do Jaraguá e a Serra dos Cristais.

### 4.2 Província Mantiqueira

Segundo Hasui (2012) a Província Mantiqueira é um sistema orogêncio que integra o Escudo Atlântico com cerca de 3.000km de extensão e pode ser dividida em três cinturões orogênicos: Cinturão Orogênico Aracuaí, Cinturão Ribeira e Cinturão Tijucas. (Figura 14). A Província é limitada a Oeste pelo Cráton São Francisco e Bacia do Paraná e a Leste faz divisa com a Província Margem Continental Leste.

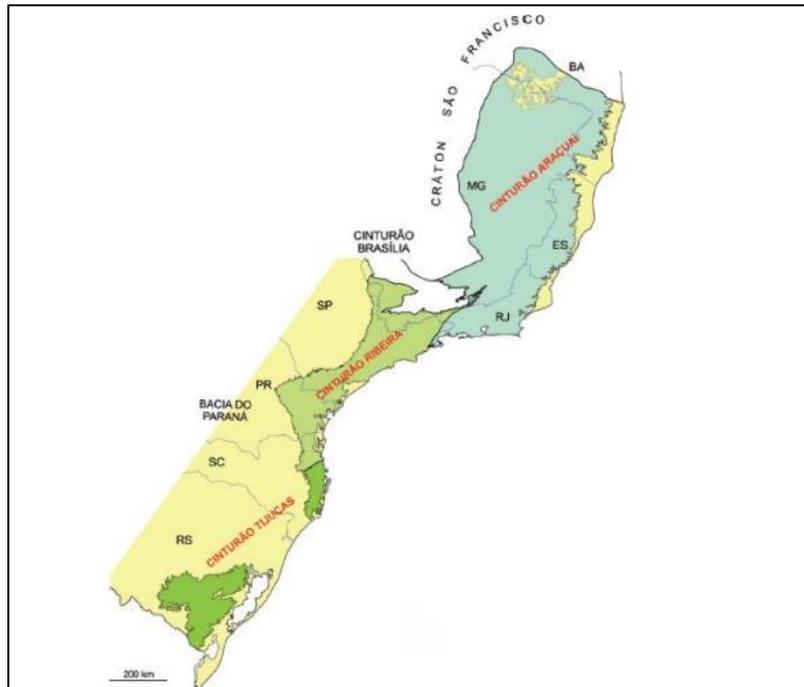


Figura 14: A província Mantiqueira e suas subdivisões. Adaptado de HASUI (2012, p 331-332).

#### 4.3 Cinturão Ribeira

O Cinturão Ribeira corresponde ao segmento Central da Província Mantiqueira e está limitado a Norte pelo Cinturão Brasília e a Sul pelo Cinturão Tijuca (Figura 15). A Oeste temos o contato com a Bacia do Paraná e a Leste a Província da Margem Continental Leste. (HASUI, 2012). Existem no Cinturão Ribeira sete domínios: São Roque, Varginha, Costeiro, Apiaí, Curitiba, Luiz Alves e Paranaguá. Existe nesse compartimento um feixe de zonas de cisalhamento de direção geral NE, que segmentou as rochas em unidades litológicas alongadas segundo uma direção NE-SW (HASUI, 2012).

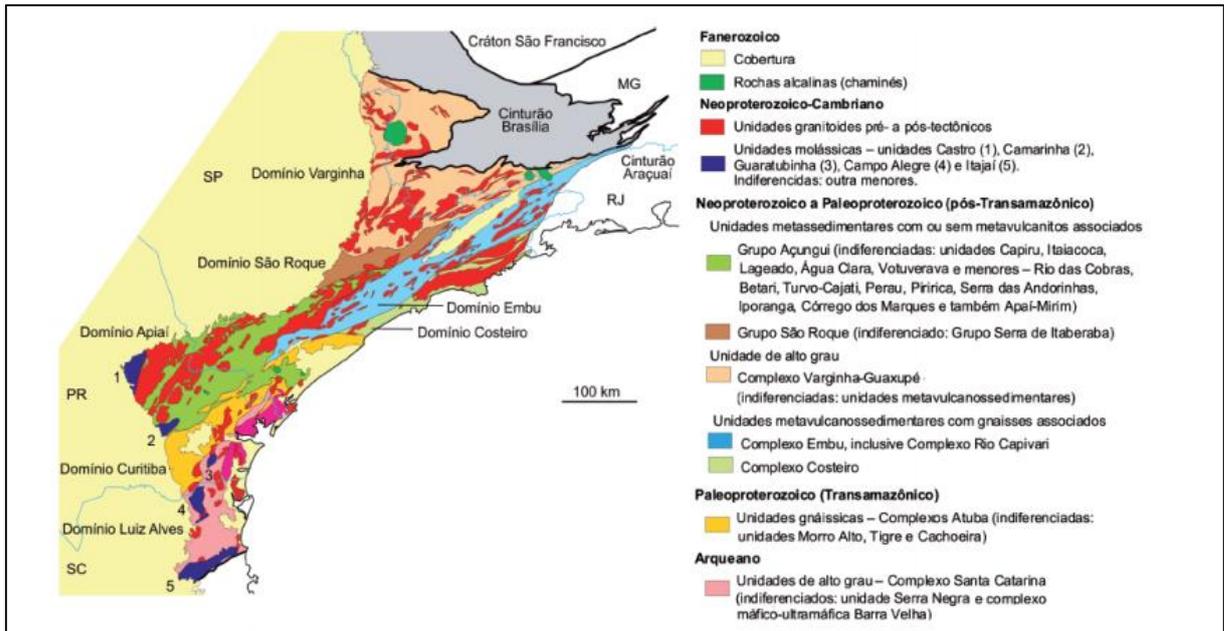


Figura 15: O Cinturão Ribeira e suas principais unidades. Adaptado de Hasui (2012, p. 345)

#### 4.4 Grupo São Roque

O Grupo São Roque é definido por JULIANI et al. (1986) como o conjunto de rochas de idade Neoproterozóica constituído predominantemente por filitos róseos, alaranjados, castanhos ou avermelhados. Também ocorrem metaconglomerados, metarcóseos, metagrauvacas, quartzitos, cálcio-xistos, calcários metamórficos e metabasitos. O Grupo São Roque pode ser dividido entre as formações Pirapora do Bom Jesus, Piragibu, Estrada dos Romeiros e Boturuna e sofreu metamorfismo na fácies xisto verde de baixa pressão tipo Abukuma ou New Hampshire, sendo que temos grau metamórfico mais elevado próximo a intrusões de corpos graníticos (JULIANI & BELJAVSKIS, 1995). O ambiente de deposição do Grupo São Roque seria um mar raso em bacia de retro-arco aonde temos desde fácies deltáicas proximais até turbiditos de águas mais profundas com atividade vulcânica subaquosa (BERGMANN, 1988).

**Formação Pirapora do Bom Jesus (NP3srpc):** Unidade vulcano-sedimentar composta por metavulcânicas básicas com lentes de rochas calciossilicáticas no topo. Também ocorrem cálcio-filitos e metarenitos (JULIANI & BELJAVSKIS, 1995). A unidade carbonática é composta por calcifilitos e mármore dolomíticos com estromatólitos. Os calcifilitos são compostos por carbonato, quartzo, actinolita enquanto que os metadolomitos são rochas de

granulação fina constituídos essencialmente por dolomita, quartzo e tremolita (BERGMANN, 1988).

**Formação Piragibu (NP3srpi):** Constituída por metarritmitos feldspáticos intercalados com filitos, ardósia, metarenito, metarcóseo, metabasitos e rochas vulcanoclásticas além de lentes de metaconglomerados e metabrechas na base (JULIANI e BELJAVSKIS, 1995).

**Formação Estrada dos Romeiros (NP3srer):** Ocorre em contato transicional com a Formação Pirapora do Bom Jesus. Composta na base por um membro arenoso com metarenitos, ritmitos gradados e intercalações subordinadas de metapelitos. O membro superior é constituído por metarritmitos silico-argiloso com níveis de metarenitos quartzosos (BERGMANN, 1988).

**Formação Boturuna (NP3srbt):** Em contato brusco a transicional com a Formação Estrada dos Romeiros, é composta por dois membros vulcânicos intercalados a dois membros arenosos. A base da unidade é composta por corpos tabulares estratificados de lavas almofadadas e ortoanfíbolitos, com níveis métricos de matatufos laminados. Acima temos o primeiro membro arenoso com metarenitos arcoseanos bandados com lentes métricas de metapelitos. O segundo membro vulcânico tem ocorrência restrita e constitui derrames básicos amigdalóides e vesiculares com intercalações decimétricas de rochas metavulcânicas ácidas a intermediárias. No topo da formação temos o último membro arenoso, um pacote de metarenitos puros bandados com alternância e bancos de granulação média a muito grossa (BERGMANN, 1988).

## 5. Geologia Local

### 5.1. Faixa Jaraguá-Cristais

A área de estudo se localiza no contexto da Faixa Jaraguá-Cristais que recobre uma seção transversal significativa das unidades litológicas do Grupo São Roque e compõe uma faixa de cerca de 376 km<sup>2</sup> situada entre o Pico do Jaraguá localizado no Município de São Paulo e a Serra dos Cristais localizada no Município de Jundiá (CARNEIRO, 1986). É reconhecida uma sequência estratigráfica que compreende da base para o topo: Metapsamitos impuros com intercalações de metaconglomerados polimíticos, metavulcânicas, filitos e quartzitos. O membro acima é composto por metapelitos representados por filitos e xistos muitas vezes intercalados com metarenitos. Sobreposto a este temos metamargas representadas por rochas cálcio-silicáticas e anfibolitos bandados, com níveis subordinados de calcários e dolomitos. No topo temos metapsamitos rítmicos compostos por metarenitos, metarcóseos e filitos intercalados com níveis estreitos de metarenitos (Figura 16).

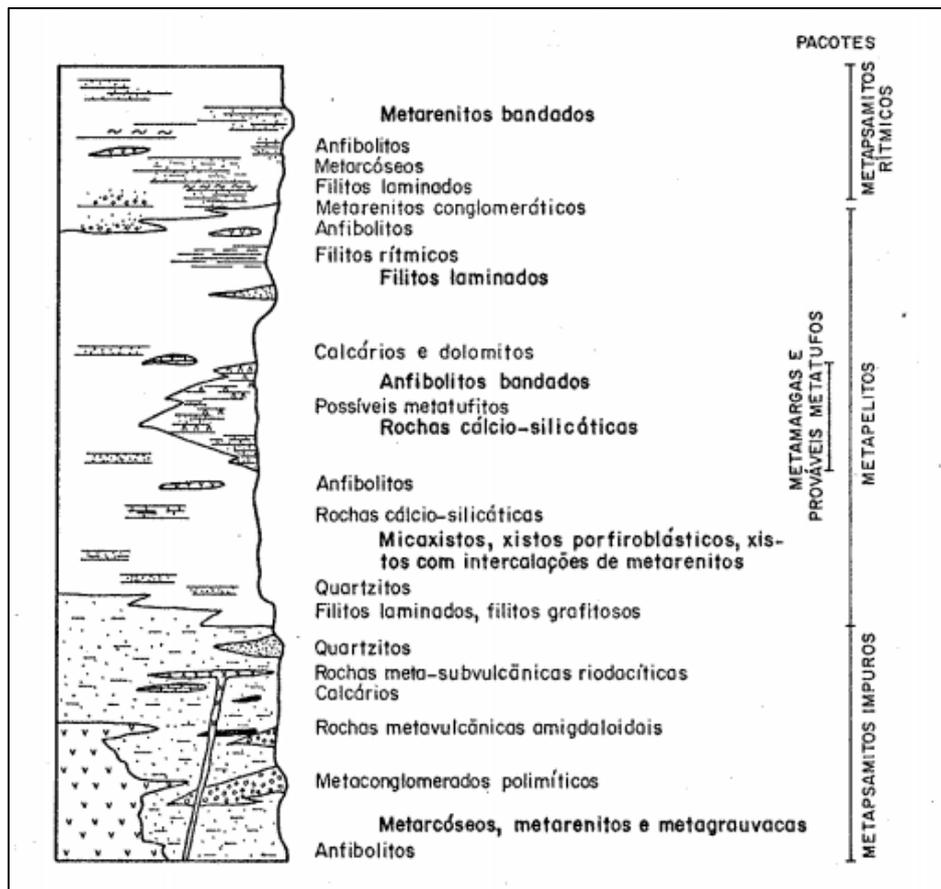


Figura 16: Coluna estratigráfica para a Faixa Jaraguá-Cristais. Retirado de CARNEIRO (1986).

De acordo com o mapa da CPRM (2006), baseado no trabalho de JULIANI E BELJAVSKIS (1995), na região ocorrem quatro unidades distintas (Figura 17). Na área de estudo, especificamente, ocorrem a Formação Estrada dos Romeiros e o Grupo Serra do Itaberaba. Próximo a área de estudo, são encontradas a Formação Pirapora do Bom Jesus e o Granito Tico-Tico.

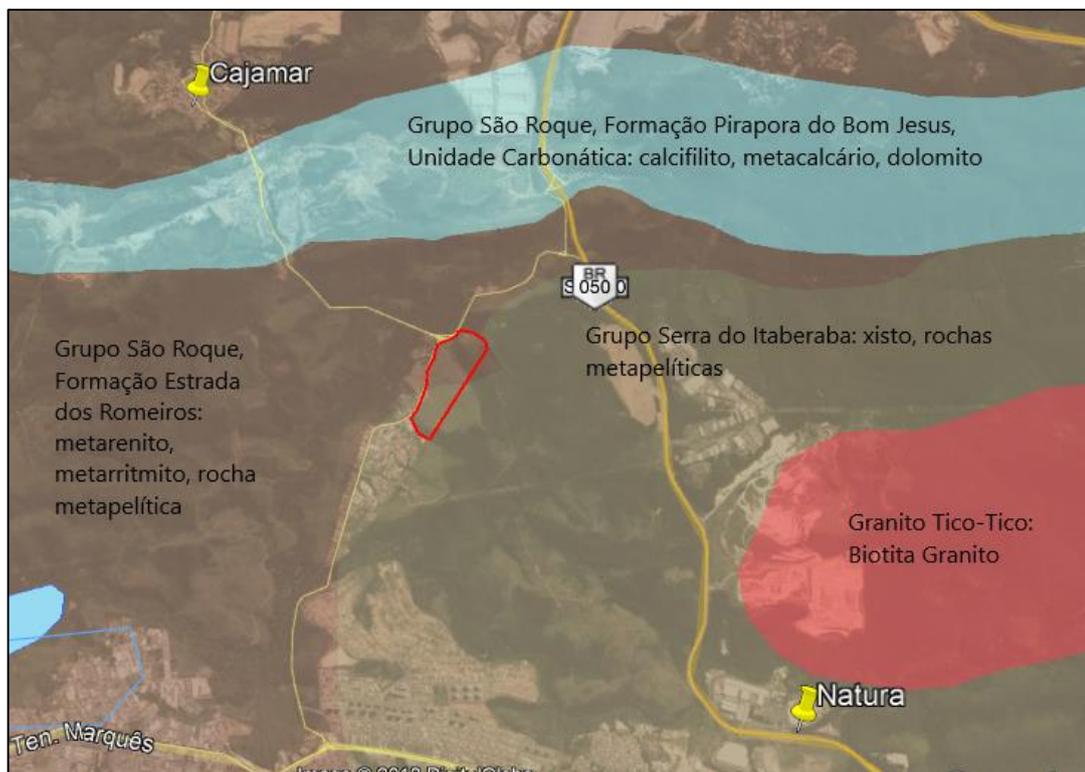


Figura 17: Mapa Geológico da Região. Editado de CPRM (2006). O polígono vermelho define a área de estudo e estão indicadas a empresa Natura e a cidade de Cajamar ambos locais onde ocorreram abatimentos de solo (figura ilustrativa, sem escala).

As estruturas observadas na região são a estratificação reliquiar, dobras de diferentes gerações, foliações plano-axiais, falhas e juntas. Segundo Carneiro (1986) temos a ocorrência de 4 fases de dobramento. Nos metapelitos são observadas clivagem ardosiana ou xistosidade geralmente ocupando os planos de estratificação reliquiar relacionadas às dobras de primeira geração (SANTORO et al., 1988). A foliação plano-axial com clivagem de crenulação presente nos metapelitos pode ser considerada como um marcador regional de deformação e está associada a segunda geração de dobras. A clivagem de crenulação foi reconhecida no mapeamento geológico de superfície (Figura 22) e corresponde com as descrições de Carneiro (1986), Santoro et al., (1988) e Menegasse (1991).

Considerando-se as estruturas um contexto regional na área (Figura 18) são reconhecidas dobras de direção N-S com comprimentos de onda da ordem de 500 a 1.000m.

Não há a existência de grandes falhas na região, tendo apenas destaque a Falha do Gato-Preto de caráter transcorrente dextral (SANTORO, et al., 1988).

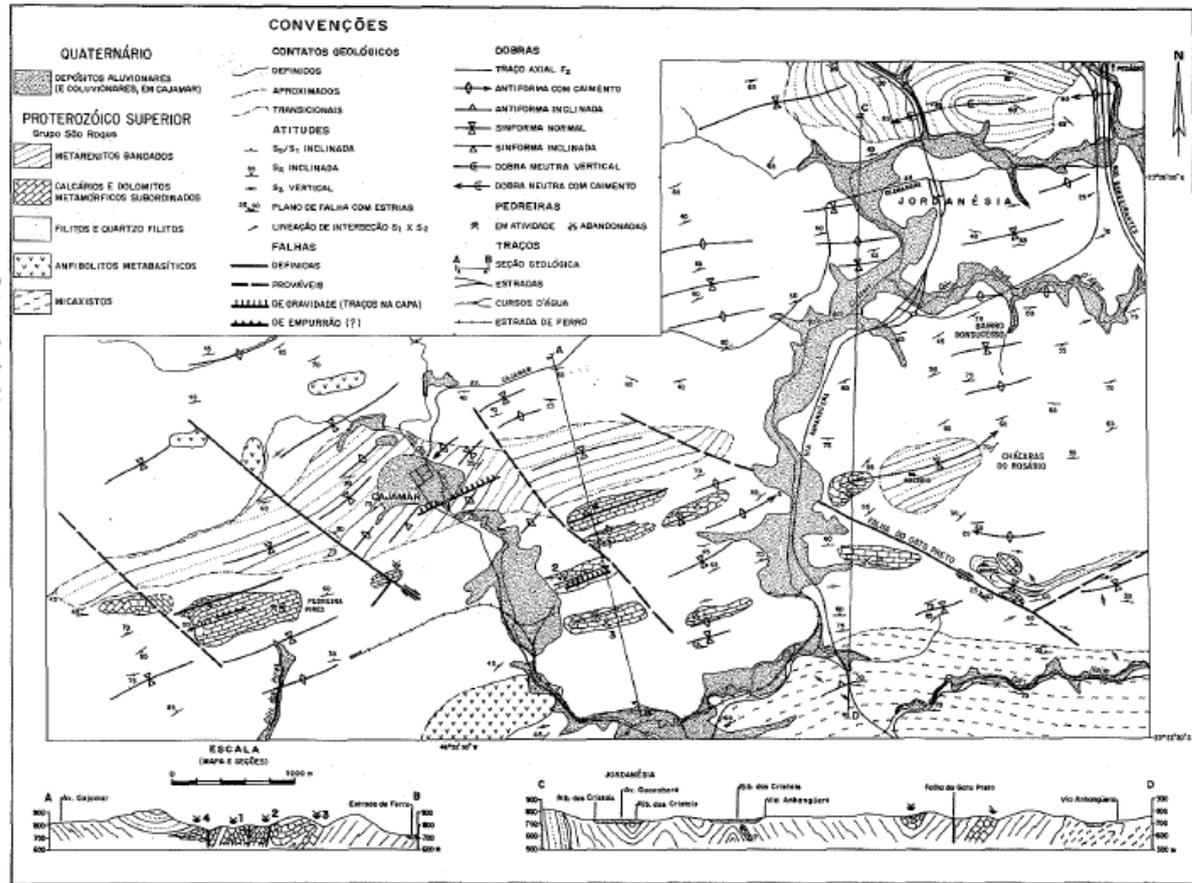


Figura 18: Mapa com as estruturas regionais. Retirado de SANTORO et al., 1988

## 5.2 Mapeamento Geológico-Geotécnico de superfície

O mapeamento geológico-geotécnico de superfície permitiu identificar as seguintes unidades: solos residuais de xisto, colúvio e aluvião. Foram visitados 13 pontos ao longo da área (Figura 19). Os afloramentos de rochas observadas no campo de reconhecimento inicial se encontram alterados a muito alterados constituindo saprolitos e solos residuais jovens de xisto micáceo. No Ponto HAR-03 observamos um saprolito de xisto micáceo, foliado de cor vermelha, marrom e branca. É possível observar foliação de direção N40E com caimento de 35NW (Figura 20). No ponto HAR-13, é possível observar os mica-xistos foliados alterados com o mesmo padrão de foliação (Figura 21). É possível observar na amostra de mão coletada uma clivagem de crenulação (Figura 22).

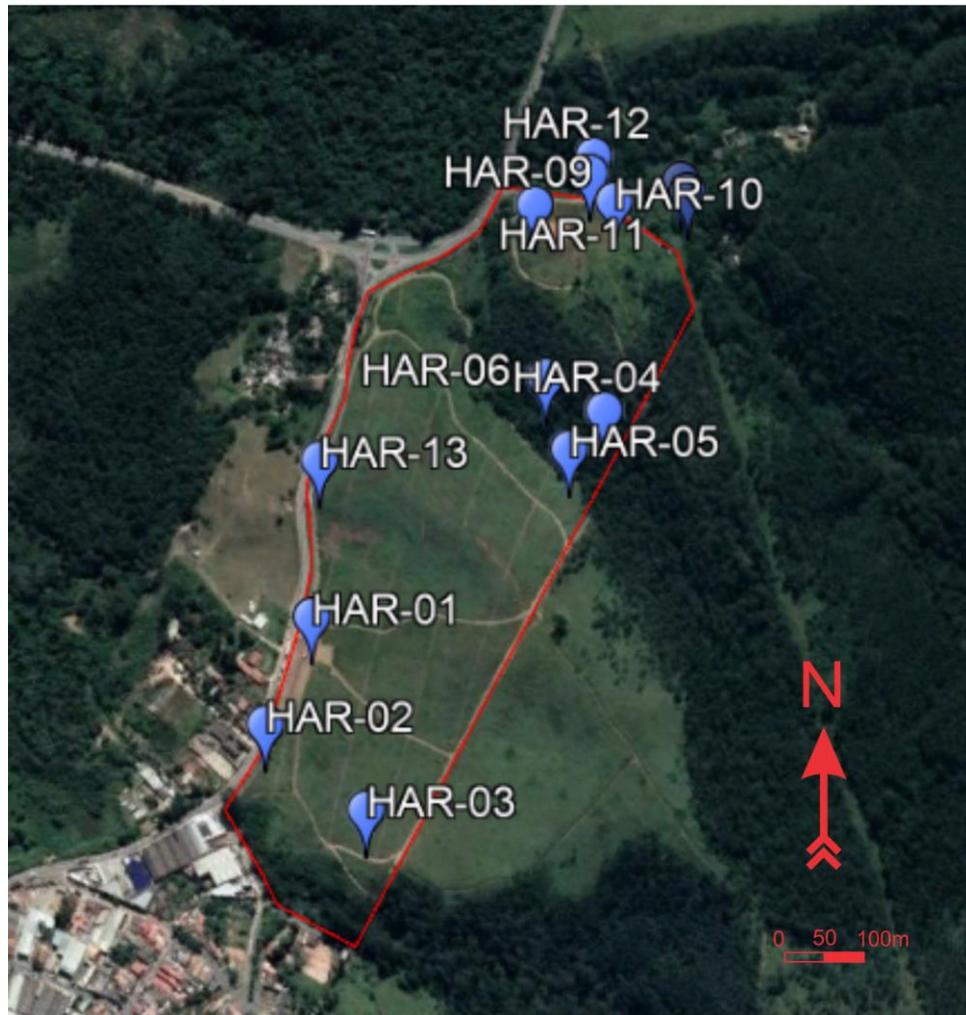


Figura 19: Pontos do mapeamento geológico-geotécnico de superfície. Adaptado de Google Earth.



Figura 20: Saprolito de xisto micáceo com foliação de direção N40E e mergulho 35NW do ponto HAR-03. Foto do autor



Figura 21: Mica-xisto alterado foliado do ponto HAR-13. Foto do autor

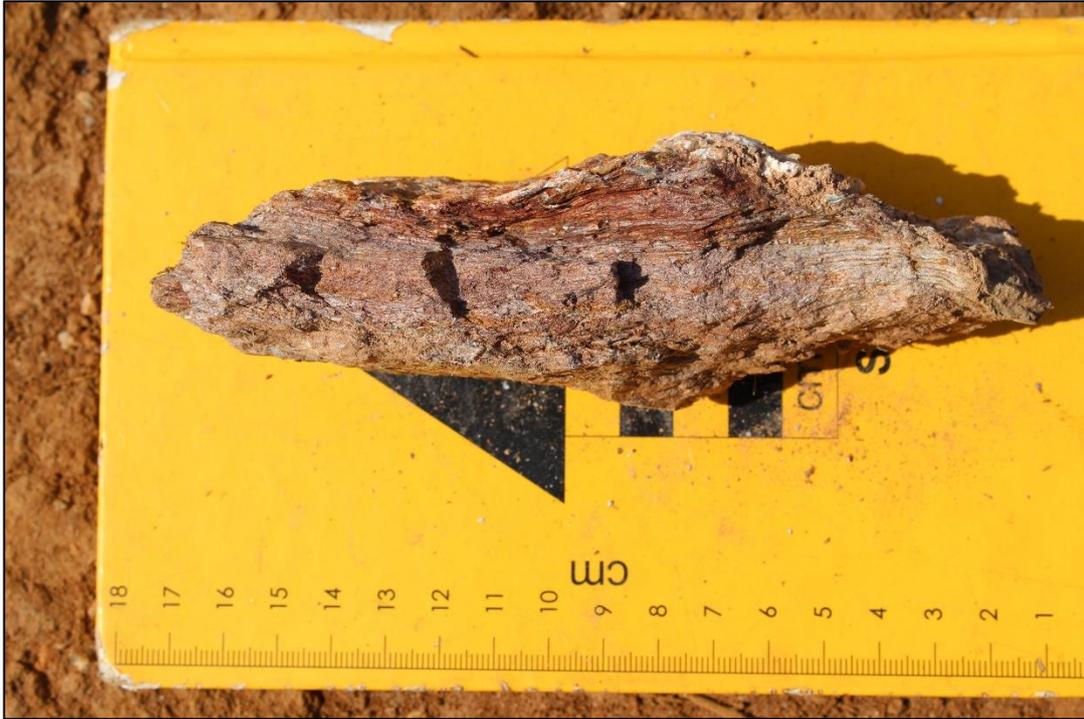


Figura 22: Amostra do ponto HAR-13 apresentando clivagem de crenulação. Foto do Autor

Os colúvios apresentam de matriz silto-argilosa com fragmentos milimétricos a centimétricos de rocha e pedregulho, de cor marrom avermelhada (Figuras 23 e 24).



Figura 23: Colúvio de matriz silto-argilosa com fragmentos de rocha e pedregulho (mm), marrom avermelhado. Ponto HAR-01. Foto do autor.



Figura 24: Colúvio com fragmentos centimétricos de quartzo. Ponto HAR-02. Foto do autor.

Próximo ao centro da área, no ponto HAR-06 ocorre uma nascente de água (Figura 25). O material encontrado aqui é aquele típico de aluvião composto por silte argiloso de cor cinza-amarelado e preto.



Figura 25: Nascente de água com material de aluvião no ponto HAR-06. Foto do autor.

## 6. Resultados

### 6.1 Investigação indireta (geofísica)

A partir dos levantamentos de eletrorresistividade foram elaboradas 6 seções de imageamento elétrico. As seções são apresentadas em termos de distância versus profundidade em uma escala cromática aonde as cores quentes representam valores de resistividades elétricas altas enquanto as cores frias estão associadas a resistividades baixas.

A partir dos resultados obtidos com os levantamentos geofísicos, foram definidos quatro locais de anomalias.

A primeira anomalia localizada na Seção de Imageamento Elétrico 1 (Figura 27) entre as estacas L1-08 e L1-20 e cota de 680m corresponde a uma anomalia de baixa resistividade a qual pode ser correlacionada a presença de água subterrânea, zonas de alteração, ou um litotipo diferente. Esta anomalia possui expressividade lateral podendo ser observada também na Seção de Imageamento Elétrico 2 (Figura 26) entre as estacas L2-10 e L2-19 na cota de 680m.

A segunda anomalia se localiza na Seção de Imageamento Elétrico 1 (Figura 27) entre as estacas L1-10 e L1-12 e cota de 660m corresponde a uma anomalia de alta resistividade a qual pode ser relacionada a cavidades subterrâneas, diferentes tipos litológicos ou bloco de rocha. Esta anomalia tem continuidade além do nível de investigação preterido pelos ensaios.

A terceira e quarta anomalias estão localizadas na Seção de Imageamento Elétrico 6 (Figura 32). A primeira entre as estacas L6-07 e L6-10 e cota de 690m e a segunda entre as estacas L6-02 e L6-05 e cotas de 630m. Ambas correspondem a anomalias de altas resistividades a qual podem ser relacionadas a cavidades subterrâneas, diferentes tipos litológicos ou blocos de rocha. Ambas as anomalias tem continuidade além do nível de investigação preterido pelos ensaios.

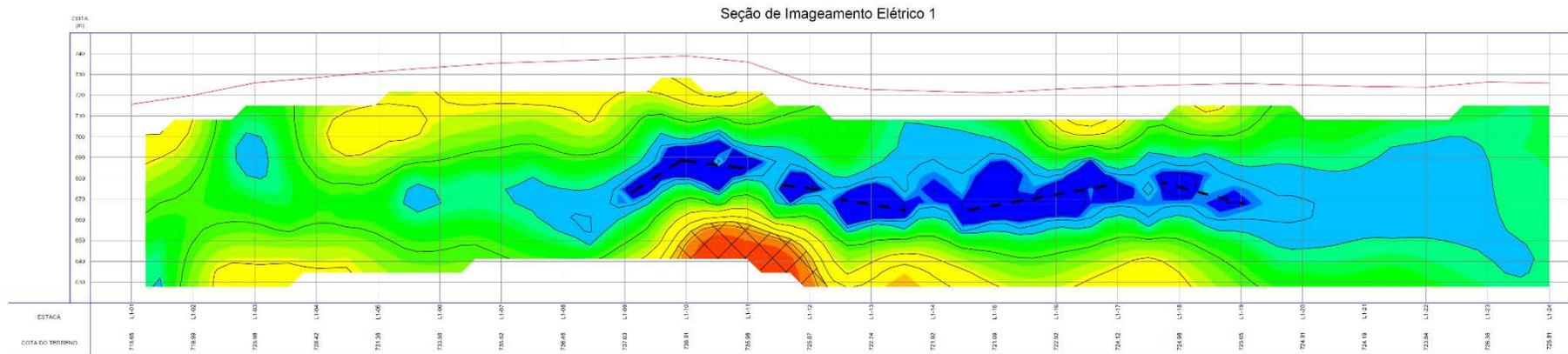


Figura 26: Modelo de inversão para a Linha 1.

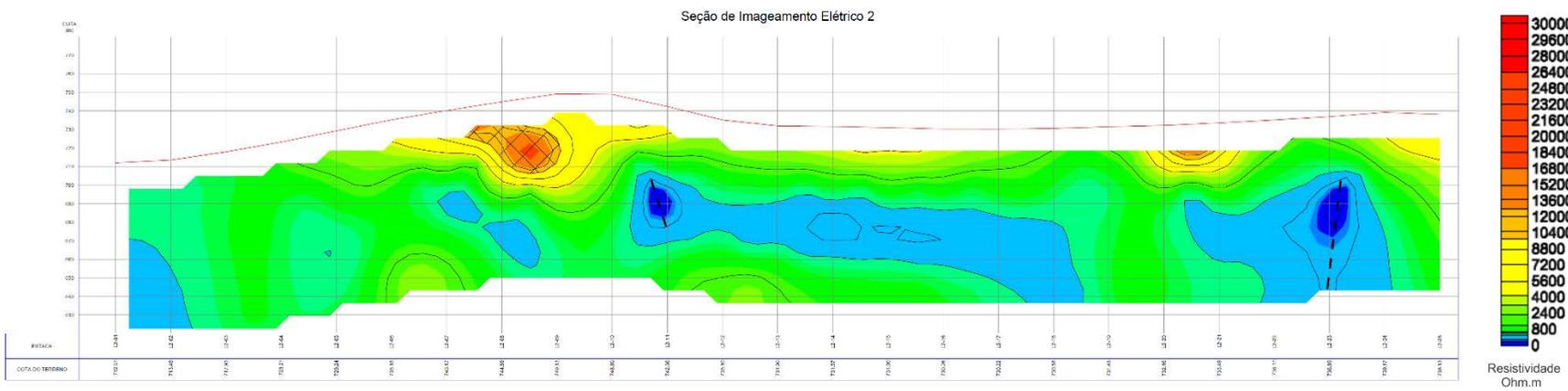


Figura 27: Modelo de inversão para a Linha 2

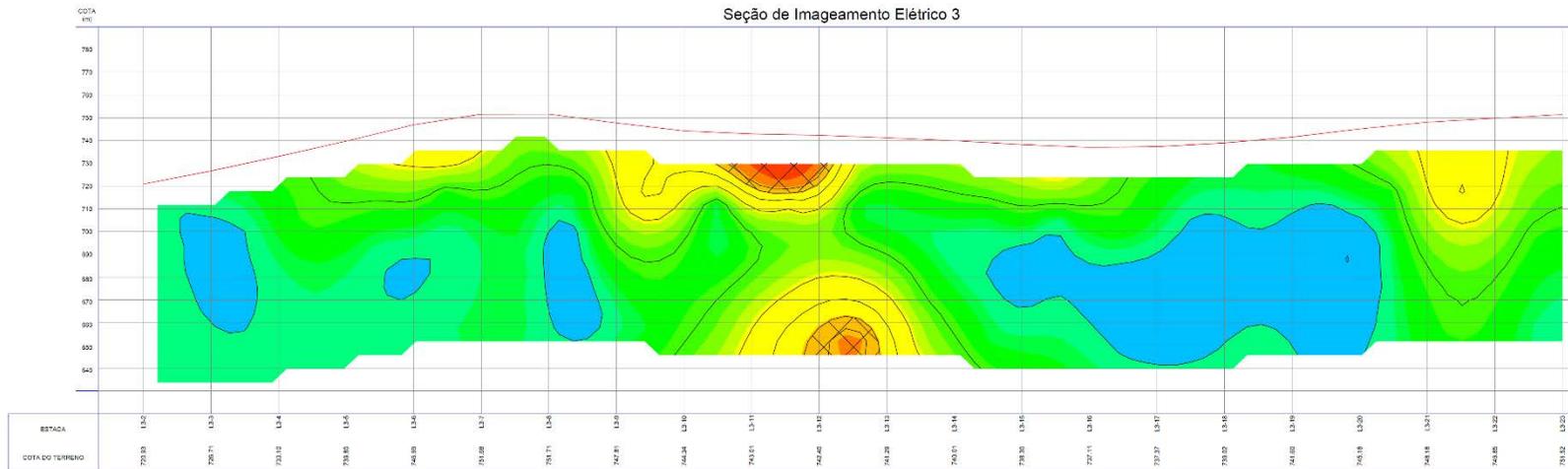


Figura 28: Modelo de inversão para a Linha 3

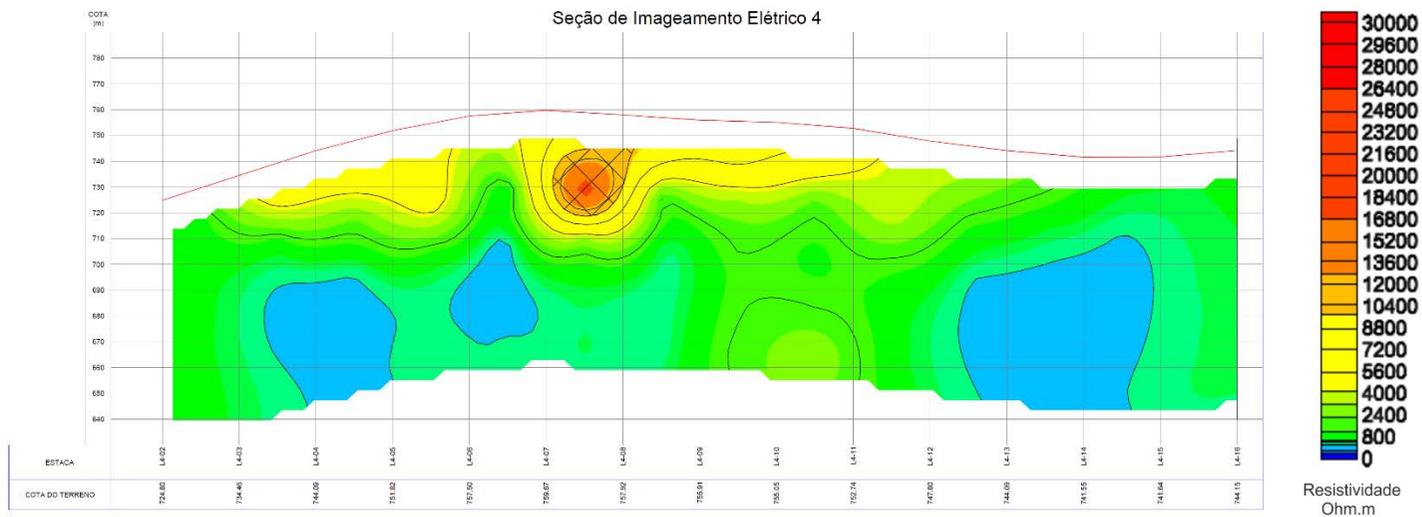


Figura 29: Modelo de inversão para a Linha 4

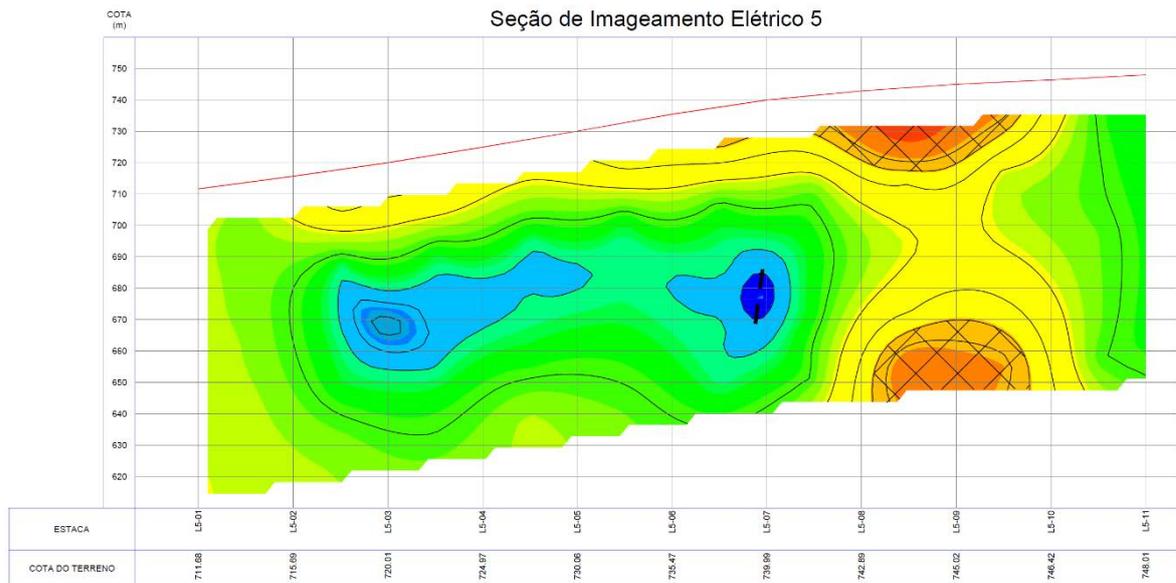


Figura 30: Modelo de inversão para a Linha 5

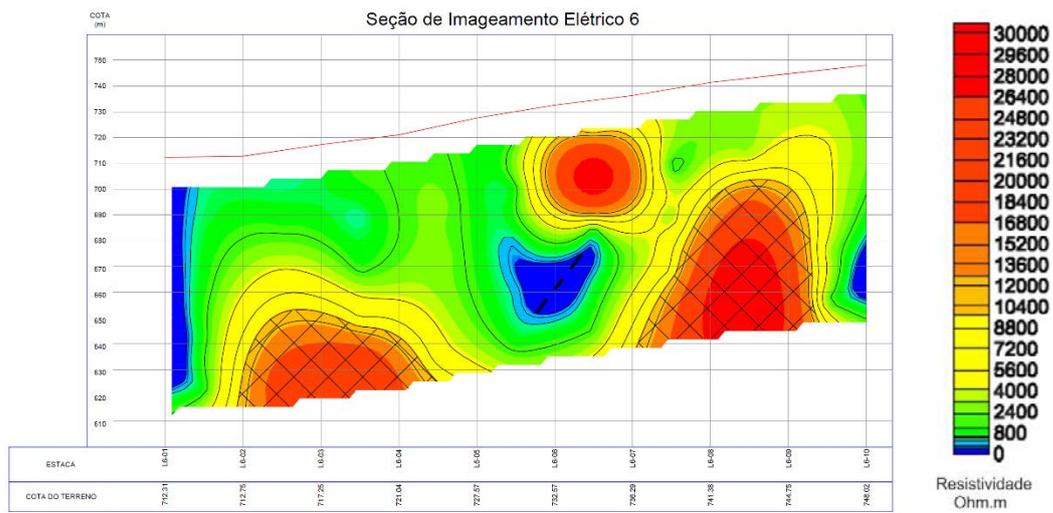


Figura 31: Modelo de inversão para a Linha 6

## 6.2 Investigação direta (Sondagens)

Foram executadas 30 sondagens a percussão e três sondagens mistas (Figura 33). Os dados das sondagens foram compilados na Tabela 1. A execução destas sondagens objetivou não somente caracterizar os materiais presentes em subsuperfície como também compreender as anomalias detectadas através da geofísica.

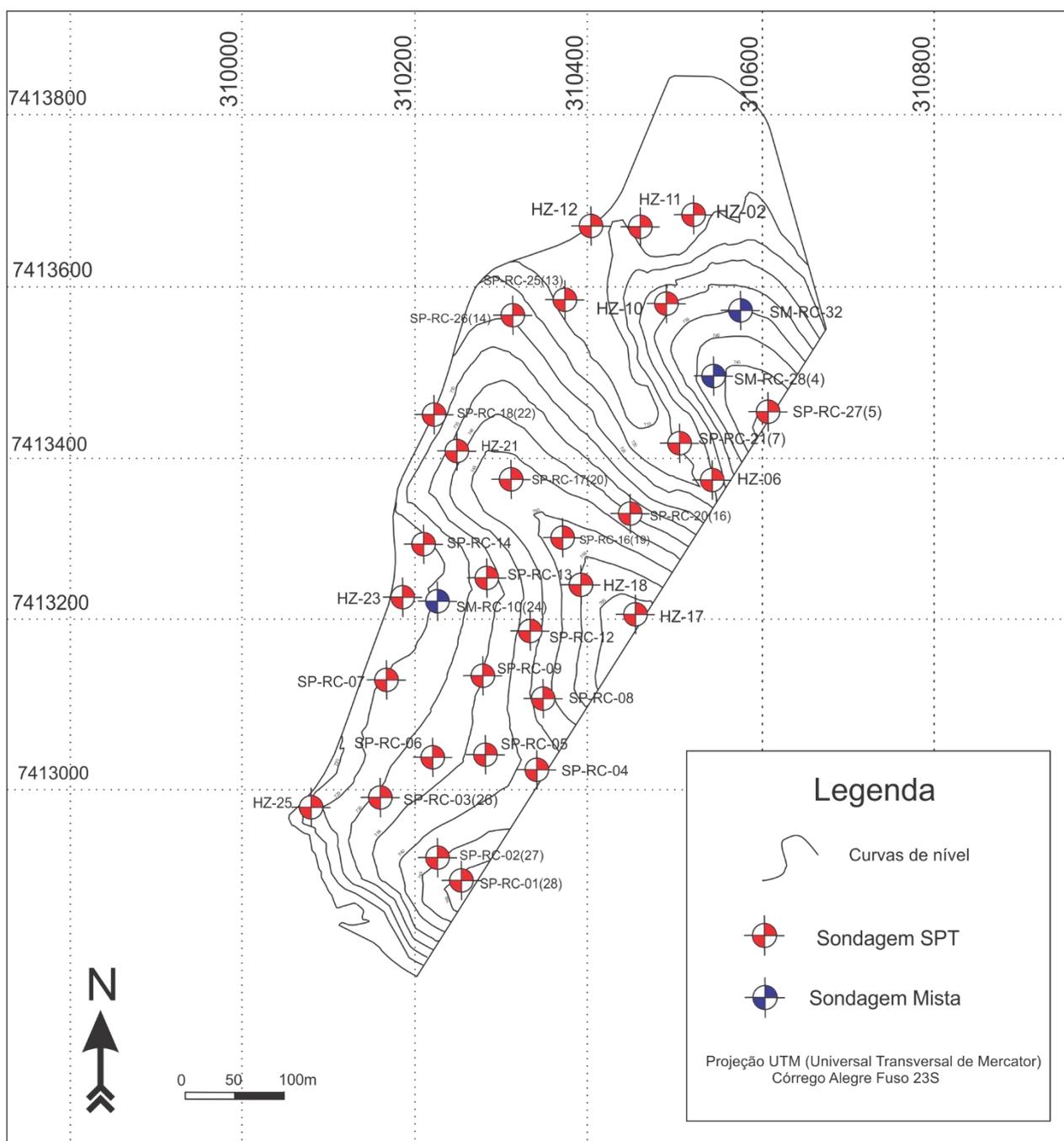


Figura 32: Planta das sondagens executadas.

A partir dos resultados obtidos nestas investigações, foram definidas as seguintes unidades geológico-geotécnicas:

**Unidade Aluvionar (Al):** composta por argila siltosa, mole a muito mole, às vezes plástica, de cor cinza, amarela e marrom. Na porção inferior tende a ficar pouco arenosa a arenosa de granulometria fina a grossa, mole a muito mole e raramente compacta, de cor marrom-amarelada.

**Unidade Coluvionar (Co):** composto por argila siltosa algumas vezes com porções arenosas, com raízes, pedregulhos finos, mole a muito mole, de cor marrom-avermelhado. A fração das porções arenosas varia de fina a média.

**Solo Residual Maduro de Xisto (SRm Xis):** composto por silte pouco arenoso com areia fina, pouco micáceo, mole a médio, de cor geralmente marrom-avermelhado, alaranjado, amarelado, por vezes roxo.

**Solo Residual Jovem de Xisto (SRj Xis):** composto por silte pouco arenoso com areia fina, micáceo, com foliação, pouco a muito compacto, de cor marrom avermelhado, marrom acinzentado, arroxeadado, às vezes amarelado ou alaranjado.

**Solo Saprolítico de Xisto (SSp Xis):** composto por silte pouco arenoso (areia fina), micáceo, com foliação, muito compacto, de cor marrom avermelhado, acinzentado e às vezes amarelado.

**Solo Residual Jovem de Metarenito (SRj Mar):** Composto por areia fina siltosa, pouco micácea, com fragmentos centimétricos a milimétricos de quartzo, às vezes com foliação incipiente, por vezes com horizontes de óxido de manganês, medianamente compacta a muito compacta de cor marrom avermelhada, marrom amarelada e algumas vezes cinza ou esverdeada

**Solo Residual Maduro de Metarenito (SRm Mar):** Composto por areia fina siltosa, eventualmente com fragmentos centimétricos a milimétricos de quartzo, pouco argilosa, medianamente compacta de cor marrom-avermelhada, amarela e cinza.

**Solo Saprolítico de Metarenito (SSp Mar):** Composto por areia fina siltosa, pouco micácea, com foliação incipiente, muito compacta, marrom avermelhada e amarelada.

Sondagem	Coordenada (N)	Coordenada (E)	Cota de Boca	Profundidade Máxima (m)	NA (m)
SP-RC-01 (28)	7.412.888,711	310.264,423	751,318	18,17	seco
SP-RC-02 (27)	7.412.921,444	310.222,799	745,264	33,85	24,0
SP-RC-03 (26)	7.412.997,608	310.151,038	730,34	32,26	8,2
SP-RC-04	7.413.022,187	310.341,802	742,565	32,26	10,5
SP-RC-05	7.413.043,426	310.283,689	737,292	23,30	8,1
SP-RC-06	7.413.032,890	310.210,098	732,789	32,25	9,3
SP-RC-07	7.413.100,648	310.148,127	726,031	35,30	7,6
SP-RC-08	7.413.109,076	310.345,920	747,69	21,30	12,9
SP-RC-09	7.413.135,920	310.276,083	734,706	25,30	10,3
SM-RC-10 (24)	7.413.209,795	310.210,971	724,93	21,70	5,8
SP-RC-12	7.413.183,892	310.328,389	743,15	25,30	14,1
SP-RC-13	7.413.263,874	310.275,858	732,835	20,30	8,7
SP-RC-14	7.413.295,646	310.206,340	723,914	20,30	5,4
SP-RC-16 (19)	7.413.313,649	310.346,934	751,281	27,50	21,5
SP-RC-17 (20)	7.413.363,704	310.291,124	749,104	21,30	19,9
SP-RC-18 (22)	7.413.428,043	310.206,759	727,836	26,21	14,2
SP-RC-20 (16)	7.413.332,748	310.445,818	740,306	25,30	10,8
SP-RC-21 (7)	7.413.411,354	310.476,311	716,398	22,05	4,1
SP-RC-25 (13)	7.413.591,027	310.348,943	713,297	12,70	3,8
SP-RC-26 (14)	7.413.543,808	310.303,362	726,261	12,45	seco
SP-RC-27 (5)	7.413.455,860	310.598,334	750,911	20,30	seco
SM-RC-28 (4)	7.413.484,100	310.532,811	744,078	25,00	seco
SM-RC-32	7.413.574,690	310.572,680	735,484	20,00	seco
HZ-02	7.413.690,316	310.508,060	712,933	23,25	2,9
HZ-06	7.413.360,799	310.544,140	724,86	24,30	6,3
HZ-10	7.413.569,795	310.471,796	730,031	23,15	17,5
HZ-11	7.413.669,288	310.452,468	713,041	22,30	4,1
HZ-12	7.413.674,678	310.399,313	711,328	17,50	1,5
HZ-17	7.413.203,095	310.448,981	764,85	21,37	seco
HZ-18	7.413.259,210	310.389,495	755,863	32,45	21,3
HZ-21	7.413.404,626	310.241,705	738,776	18,45	seco
HZ-23	7.413.218,393	310.167,366	720,845	23,45	2,7
HZ-25	7.412.980,568	310.075,706	721,645	23,13	7,6

Tabela 1: Dados das sondagens a percussão (códigos SP e HZ) e mistas (SM) realizada

### 6.3 Seções Geológico-Geotécnicas

A partir dos resultados da investigação direta foram elaboradas 7 seções geológico-geotécnicas (Figura 34). As seções foram definidas a partir das medidas de SPT obtidas durante a campanha de sondagens e serão usadas para cálculos de estruturas e fundações das estruturas do empreendimento.

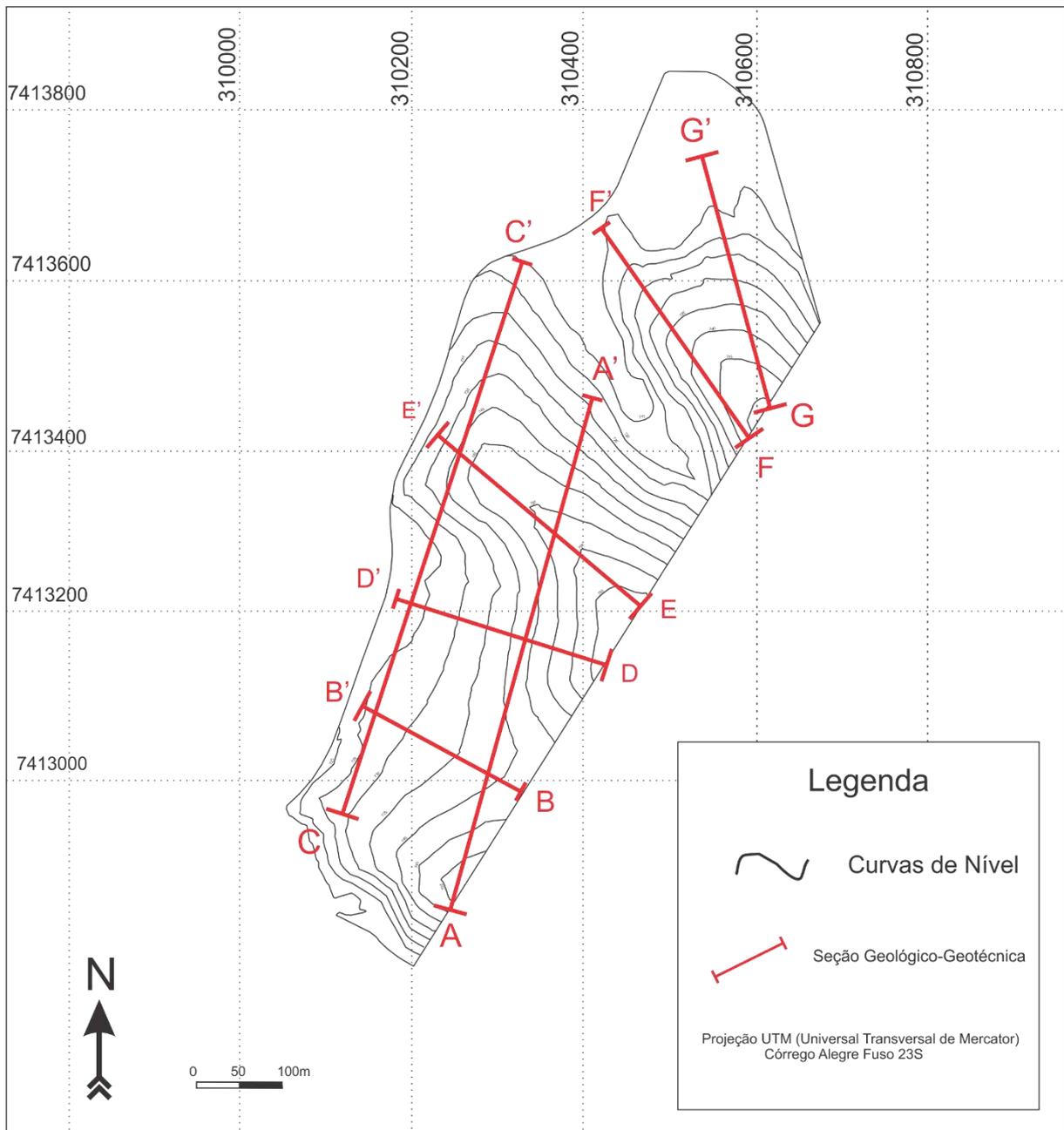
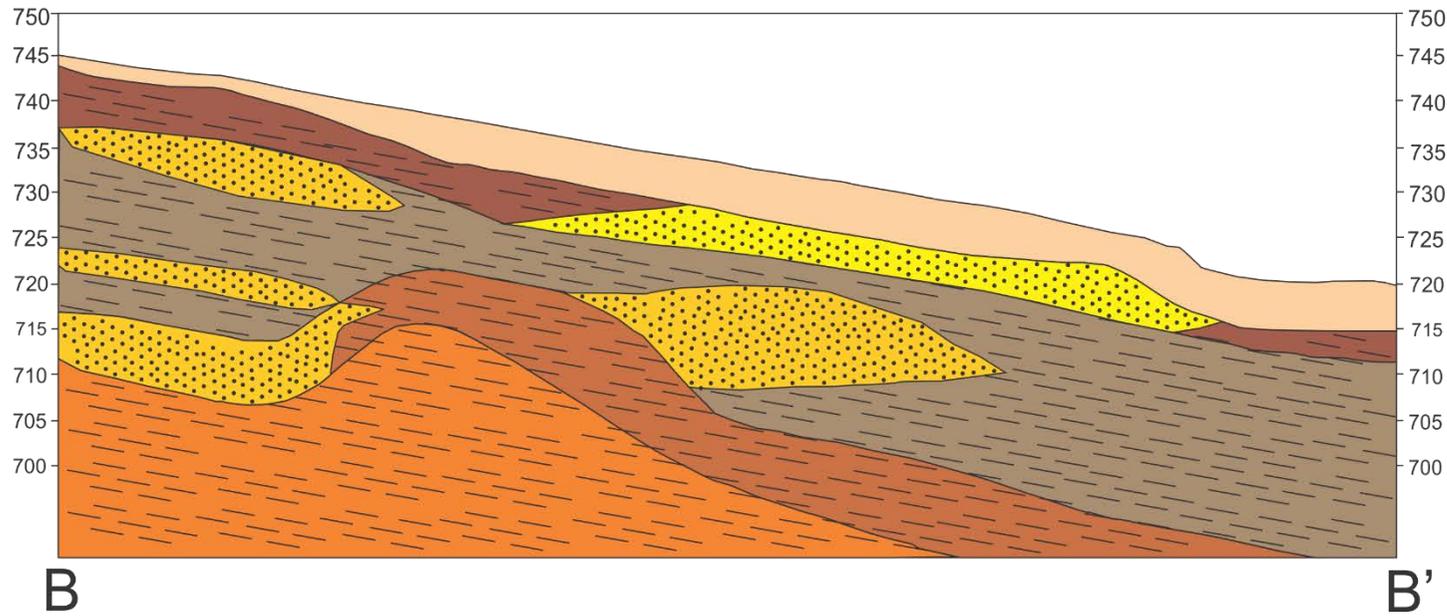
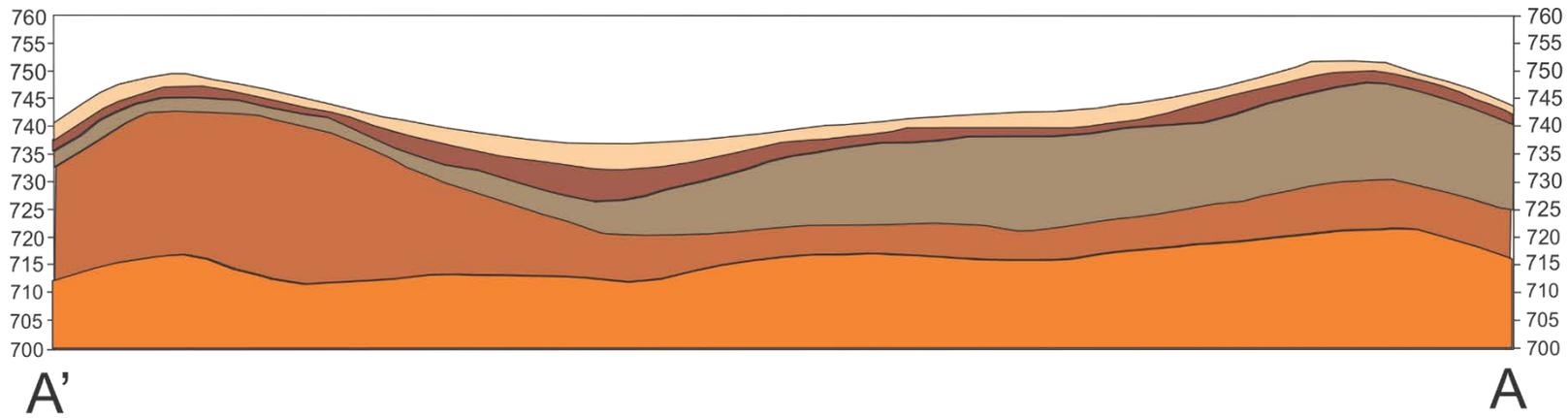


Figura 33: Planta das Seções Geológico-Geotécnicas

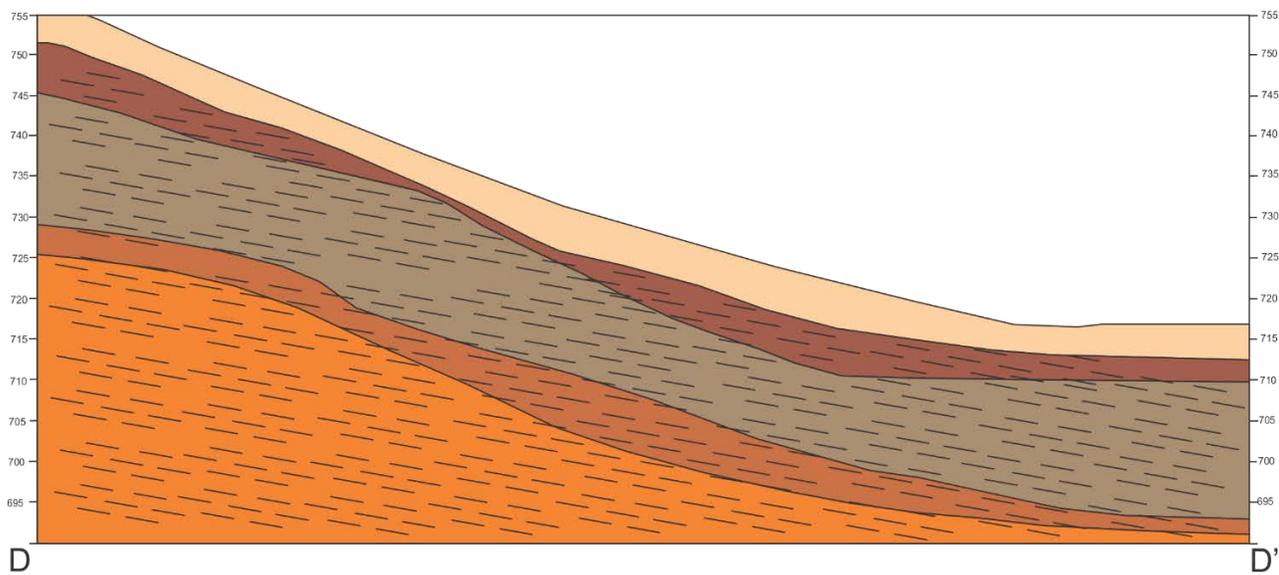
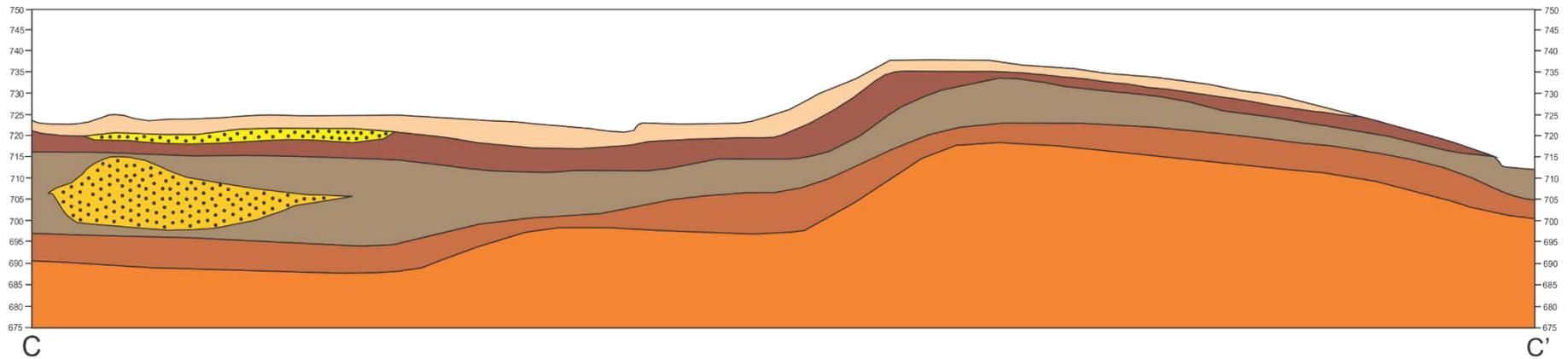


**Legenda**

- Xistosidade
- Solo Superficial / Colúvio
- Solo Residual Maduro de Xisto
- Solo Residual Jovem de Xisto
- Solo Saprolítico de Xisto
- Xisto
- Solo Residual Maduro de Metarenito
- Solo Residual Jovem de Metarenito

Escala: Horizontal 1:500 / Vertical 1:250

Figura 34: Seções A'-A e B-B'



## Legenda

-  Xistosidade
-  Solo Superficial / Colúvio
-  Solo Residual Maduro de Xisto
-  Solo Residual Jovem de Xisto
-  Solo Saprólítico de Xisto
-  Xisto
-  Solo Residual Maduro de Metarenito
-  Solo Residual Jovem de Metarenito

Escala: Horizontal 1:500 / Vertical 1:250

Figura 35: Seções C-C' e D-D'

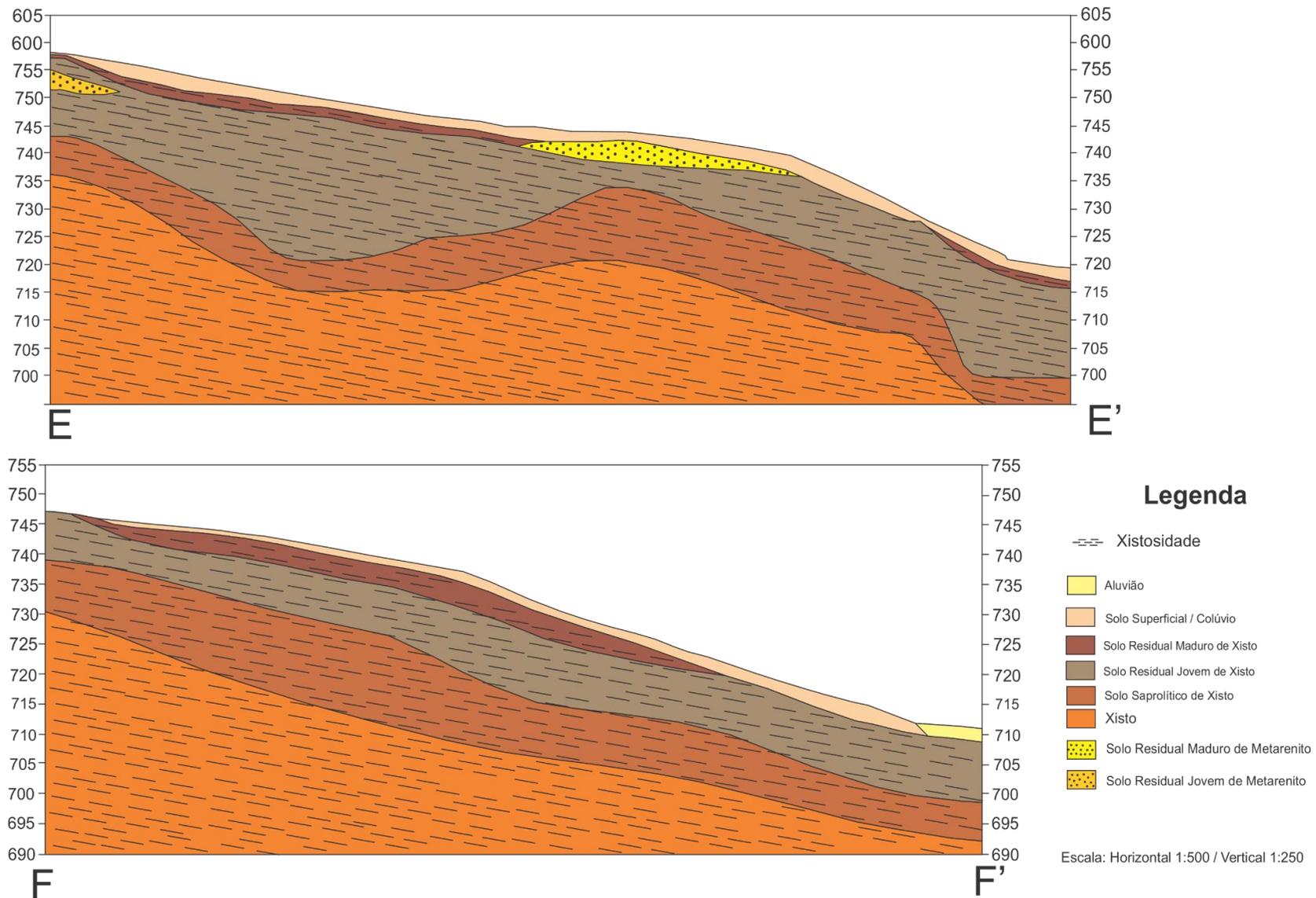
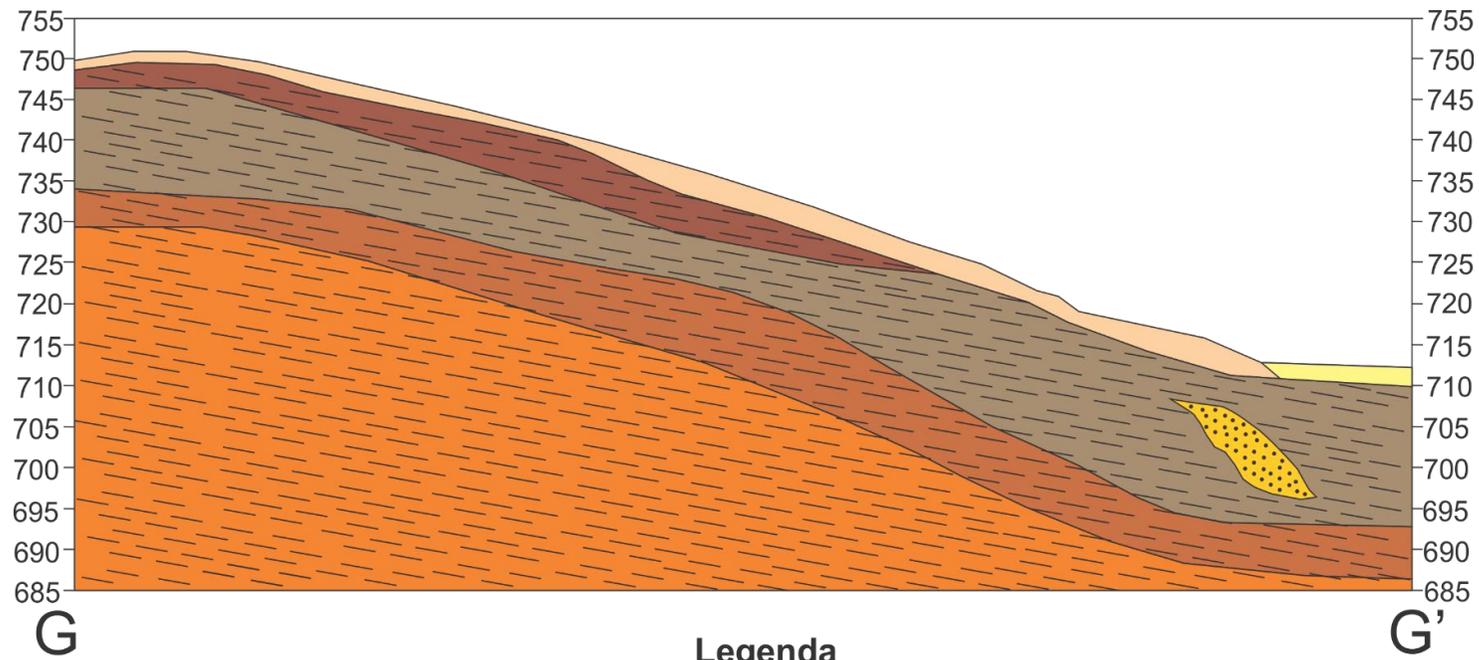


Figura 36: Seções E-E' e F-F'



**Legenda**

-  Xistosidade
-  Aluvião
-  Solo Superficial / Colúvio
-  Solo Residual Maduro de Xisto
-  Solo Residual Jovem de Xisto
-  Solo Saprolítico de Xisto
-  Xisto
-  Solo Residual Maduro de Metarenito
-  Solo Residual Jovem de Metarenito

Escala: Horizontal 1:500 / Vertical 1:250

Figura 37: Seção G-G'

## 7. Discussão

### 7.1 Verificação das anomalias através das sondagens mistas

A fim de se realizar a aferição direta das anomalias detectadas durante a execução da técnica de imageamento elétrico e verificar a existência ou não de cavidades subterrâneas, feições de dissolução e litotipos favoráveis à ocorrência de problemas de abatimentos de solo foram executadas três sondagens mistas, SM-RC-10 (24), SM-RC-28 (4) e SM-RC-32.

**SM-RC-10(24):** Esta sondagem foi alocada na área da anomalia de baixas resistividades detectada pelas Seções de Imageamento Elétrico 1 e 2 entre as estacas L1-12 e L1-20 nas cotas de 670/680 m. A sondagem foi executada em solo pelo método de percussão até a profundidade de 26 m e prosseguiu, após atingir o critério de impenetrabilidade ao ensaio SPT, pelo método rotativo até a profundidade de 45,30 m. A sondagem foi paralisada após atingir a anomalia de baixa resistividade. No trecho executado pelo método rotativo, foi amostrado um litotipo descrito como “filito pouco micáceo, com areia fina e foliação inclinada, cinza”. Este litotipo foi interpretado como xisto em função da observação das amostras e contexto geológico regional e local. O xisto amostrado apresenta grau de alteração R2/R3 (rocha alterada dura/rocha alterada mole), com elevado grau de fraturamento (F4/F5). O nível d’água foi detectado aos 5,27 m de profundidade, portanto o trecho perfurado em rocha encontra-se saturado. Neste local a anomalia condutiva foi interpretada como resultado da combinação de diversos fatores como: grau de alteração da rocha, elevado grau de fraturamento combinado a porções mais argilosas do xisto em zona saturada.

**SM-RC-28(4):** Foi alocada na área da anomalia de alta resistividade, observada na Seção de Imageamento Elétrico 5, na cota de topo de 720 m entre as estacas L5-08 e L5-010. A sondagem foi executada em solo pelo método de percussão até os 16,42 m de profundidade e, após atingir o critério de impenetrabilidade ao ensaio SPT, prosseguiu pelo método rotativo até 25 m. Embora a sondagem tenha atingido o critério de impenetrabilidade ao SPT, o trecho perfurado pelo método rotativo continuou amostrando solo e não rocha. O material amostrado neste trecho corresponde a um silte argiloso vermelho, com areia fina a grossa e pedregulhos quartzosos finos. Nesta sondagem, o nível d’água não foi detectado. Neste caso a anomalia resistiva foi atribuída a combinação de porções mais quartzosas no xisto em local não saturado.

**SM-RC-32:** Foi alocada na área da anomalia de alta resistividade observada na Seção de Imageamento Elétrico 6, a qual constitui a continuidade lateral da anomalia identificada na Seção de Imageamento Elétrico 5, entre as cotas 710/720 m e entre as estacas L6-02 e L6-05. A sondagem foi executada em solo pelo método de percussão até 15 m de profundidade e após atingir o critério de impenetrabilidade ao ensaio SPT, prosseguiu pelo método rotativo até a profundidade de 20 m. No trecho perfurado pelo método rotativo identificou-se o mesmo material encontrado na sondagem SM-RC-28(4): silte argiloso vermelho, com areia fina a grossa e pedregulhos quartzosos finos. O nível d'água nesta sondagem também não foi detectado. Neste local a anomalia resistiva também foi interpretada como a combinação da presença de porções mais quartzosas e arenosas no xisto em condição seca.

As anomalias resistivas presentes em altas profundidades como a que se encontra na Seção de Imageamento Elétrico 1 entre as estacas L1-13 e L1-15 a partir da cota de 660m, assim como aquelas localizadas na Seção de Imageamento Elétrico 6, não foram investigadas com sondagens rotativas em função do elevado custo de perfuração.

Dessa forma, as sondagens mistas executadas mostraram que nas profundidades e nos locais perfurados não ocorrem rochas carbonáticas, litotipos nos quais poderiam ocorrer cavidades provocadas por dissolução. Levando-se em conta a configuração geológica da área de estudo e as resistividades elétricas dos diferentes litotipos no substrato, que se configura como uma camada de xisto com lentes de metarenito, são feitas as seguintes considerações:

- Em locais com lentes de metarenito de composição mais quartzosa a resistividade elétrica será maior que nas porções mais argilosas do xisto.
- A presença de horizontes mais fraturados aumenta a resistividade elétrica das rochas, enquanto que a presença do nível d'água reduz a resistividade das rochas.
- Deve ser considerada a combinação de fatores: em locais em que as rochas se encontram intensamente fraturadas a presença do nível d'água faz com que resistividades elétricas diminuam, pois há o preenchimento das fraturas pela água.

## 7.2 Condicionantes Geológico-Geotécnicos

Os principais condicionantes geológico-geotécnicos das unidades identificadas estão associadas à atitude da foliação dos xistos. As atitudes medidas em campo mostraram que a foliação se encontra subparalela à superfície do terreno portanto potencialmente desfavorável à estabilidade dos eventuais cortes que serão executados. Este aspecto deve ser considerado nos projetos de retaludamento e durante a execução das obras.

## 8. Conclusão

Os eventos de abatimento de solo e a ocorrência dolinas na cidade de Cajamar - SP são evidências diretas que a expansão urbana e ocupação de terrenos cársticos deve ser conduzida de forma cuidadosa, acompanhada de estudos e metodologias adequadas. A possível ocorrência de cavidades subterrâneas é um fator indispensável a ser considerado em estudos para a implantação de fundações e grandes empreendimentos. No mais considerando-se que a presença de rochas carbonáticas é condicionante da existência de diversas atividades econômicas importantes como a extração de calcário e exploração de água subterrânea, deve se procurar um equilíbrio na execução destas práticas, a fim de se evitar o comprometimento da estabilidade do arcabouço geológico da região. Este equilíbrio é atingido através da consulta de profissionais adequados e a execução de projetos de investigação específicos para cada caso.

Tendo em vista que projetos de engenharia são executados com orçamentos definidos e na maioria dos casos procura-se economizar com sondagens rotativas na investigação da área, os métodos geofísicos com a eletrorresistividade e a técnica de imageamento elétrico se tornam uma alternativa eficiente na investigação de terrenos possivelmente cársticos. Por se tratar de uma técnica de rápida execução e custo baixo que gera uma densidade alta de informações em um perfil em duas dimensões em comparação às sondagens que são investigações pontuais, o imageamento elétrico se mostrou extremamente eficiente na execução deste projeto. A sua aplicação permitiu definir locais específicos para a realização dos ensaios diretos consequentemente reduzindo os custos de investigação em subsuperfície e os riscos para a implantação do empreendimento imobiliário.

## 9. Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, FERNANDO. F. M. 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Boletim do Instituto de Geografia e Geologia, São Paulo, 41.
- ALBRECHT, KURT JOÃO. Avaliação geológica-geotécnica de terrenos sujeitos a problemas cársticos. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BERGMANN, MAGDA. Caracterização estratigráfica e estrutural da sequência vulcano-sedimentar do grupo São Roque-na região de Pirapora do Bom Jesus-Estado de São Paulo. 1988. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- DE OLIVEIRA BRAGA, ANTONIO CELSO. Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia. Oficina de Textos, 2016.
- CHIOSSI, NIVALDO. Geologia de engenharia. Oficina de Textos, 2015.
- CARNEIRO, C. D. Análise estrutural do Grupo Roque na faixa entre o pico do Jaraguá e a Serra dos Cristais. 1983. Tese de Doutorado. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- "A origem do buraco de Cajamar". DIÁRIO CAJAMARENSE, 15 de fevereiro de 2018. Disponível em: <<https://www.diariocajamarense.com/2018/02/15/origem-do-buraco-de-cajamar-conheca-historia.html>>. Acesso em 07/09/2018
- DE SOUZA, LUIZ ANTONIO PEREIRA. Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. 2013.
- DOURADO, João C. et al. Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR. Revista Brasileira de Geofísica, p. 19-32, 2001.
- Espaço Natura: a engenharia do sucesso/ coordenação Natura Cosméticos S.A..- São Paulo: Natura, 2004
- FURRIER, MAX; DE OLIVEIRA VITAL, SAULO ROBERTO. A Formação de Dolinas em Áreas Urbanas: o Caso do Bairro de Cruz das Armas em João Pessoa-PB (The Formation of Dolines in Urban Areas: The Case of Cruz das Armas in João Pessoa-PB). Revista Brasileira de Geografia Física, v. 4, n. 1, p. 161-173, 2011.
- GANDOLFO, O. C. B. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- HASUI, Y., CARNEIRO, C. D. R., DE ALMEIDA, F. F. M., & BARTORELLI, A. (Eds.). (2012). Geologia do Brasil (p. 900). Beca.
- JULIANI, CAETANO; BELJAVSKIS, Paulo. Revisão da litoestratigrafia da faixa São Roque/Serra do Itaberaba-SP. Revista do Instituto Geológico, v. 16, n. 1-2, p. 33-58, 1995.
- MENEGASSE, L. N. Estudo hidrogeológico das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da grande São Paulo: critérios para a locação de poços profundos. 1991. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MOURA, Helyelson Paredes; MALAGUTTI FILHO, Walter. Métodos de Eletrorresistividade e de Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro, SP. Geociências, v. 22, n. Esp, 2003.

PRESS, FRANK et al. Para entender a Terra. et al., lii. Ed. Bookman, Porto Alegre, RS, 2006.

SANTORO, E. et al. Estrutura geológica da região de Cajamar-Jordanésia, SP. Revista Brasileira de Geociências, v. 18, n. 3, p. 353-361, 1988

TUCKER, MAURICE E. & BRITO, DIMAS D. Petrologia Sedimentar Carobnática. Iniciação com base no registro geológico do Brasil. UNESPetro, Obra 3. 2017.

WARD, STANLEY H. (Ed.). Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I: Review and Tutorial. 1990.