UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS EM PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: ESTUDO DE CASO

Rodrigo Braga Santini

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pacheco
Co-orientador: Alexandre de Almeida Prado Ferrari
(Ambiterra Soluções Ambientais Ltda)

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2003/47)

SÃO PAULO
2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS EM PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: ESTUDO DE CASO

Rodrigo Braga Santini

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pacheco

Co-orientador: Alexandre de Almeida Prado Ferrari
(Ambiterra Soluções Ambientais Ltda.)

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF 2003/47)

SÃO PAULO

2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DEGEOCIÊNCIAS

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS EM PROJETOS DE IMPLANTAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS: ESTUDO DE CASO

RODRIGO BRAGA SANTINI

Monografia de Trabalho de Formatura

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alberto Pacheco _____
Profa. Dra. Maria Cristina Motta de Toledo _____
Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas _____

São Paulo

2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS EM PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: ESTUDO DE CASO

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF 2003/47)

Aluno: Rodrigo Braga Santini

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pacheco

Co-orientador: Alexandre Ferrari

SÃO PAULO

2003

Aspecto geral de um "lixão" e de um aterro sanitário

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais que sempre confiaram em mim e me apoiaram em todos os momentos.

Ao pessoal da Ambiterra que deu condições para que este trabalho fosse realizado, particularmente ao Eng. Alexandre Ferrari e à Geóloga Ivandra Matos.

Ao professor Alberto Pacheco.

A todos os meus colegas que estão nessa comigo desde o início. Por todas as brejas tomadas, todos os afloramentos martelados, todas as viagens, todos os trabalhos perdidos na anti-aluno, todas as risadas... Em especial para o Sfincter (Carlos Guedes) e Placenta (Rafael Caetano), o eterno grupo. Ao Delano, pelas horas de estudo e pelos trabalhos na Geoatlética. Ao pessoal do basquete por me fazer esquecer do TF de vez em quando. Enfim, à todos que fizeram parte da minha história nestes cinco anos, todos vocês tiveram um papel importante na minha vida.

À Jaque, pelo carinho, compreensão, alegria... Seu sorriso é sempre o carregador das minhas baterias.

Aos meus brodinhos Rafa e Rena.

Ao vô Renato por sempre ter sido um exemplo pra mim (menos no quesito alimentação!).

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

ÍNDICE DE ANEXOS

1 Resumo

À medida que uma região cresce economicamente há um aumento de consumo, o que acarreta em incremento proporcional na taxa de produção diária de resíduos sólidos. A limitação de espaços disponíveis nas grandes metrópoles e a capacidade limitada dos sítios em operação tornam imediata a necessidade de implantação de novos aterros de resíduos sólidos. Além disso, a questão ambiental, destacando-se a comprovada deterioração das águas subterrâneas, reflete em uma maior preocupação com os aspectos geológicos e hidrogeológicos em um projeto de aterro de resíduos. Porém, no Brasil há poucas normas referentes à disposição de resíduos sólidos urbanos. Particularmente, quando o assunto é projetos de aterros e sua conseqüente avaliação geológica e hidrogeológica, a carência de normas é ainda maior.

Os principais objetivos destes trabalhos são avaliar os métodos utilizados para caracterização geológica e hidrogeológica em projetos de aterros de resíduos sólidos através de um estudo de caso, contribuindo com o desenvolvimento de futuros projetos, considerando questões técnicas, ambientais e econômicas e contribuir com informações para a elaboração de um plano adequado de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, que satisfaça as exigências dos principais órgãos controladores nacionais e internacionais. Foi desenvolvido a partir do estudo de caso cujo principal objetivo é exemplificar, discutir e avaliar os critérios estabelecidos na caracterização geológica e hidrogeológica da área de estudo, contribuindo para a execução de trabalhos futuros.

A partir das atividades realizadas foi possível idealizar as etapas necessárias para que a caracterização geológica e hidrogeológica da área de interesse sejam o mais próximo a realidade possível, dando subsídios para execução das etapas futuras dentro de um projeto de aterro de resíduos sólidos e assegurando uma proteção adequada às águas subterrâneas.

2 Abstract

The economical growth of a city is always accompanied of consumption increase, what results in proportional increment in the rate of daily production of solid wastes. The limitation of available areas in the great metropolises and the limited capacity of the sites in operation make immediate the need of implantation of new waste landfills. Besides, the environmental aspects, especially the well-know deterioration of the underground waters, reflects a major concern with the geologic and hydrogeologic aspects in a project of wastes landfill. However, Brazil has few norms about the disposition of urban solid wastes. Particularly, when the subject is the projects of landfills and its consequent geological and hydrogeologic aspects evaluation, the lack of norms is still larger.

The objectives of this works are to evaluate the methods used for geologic and hydrogeologic characterisation in projects of waste landfills through a case study, contributing with the development of futures projects, considering technical, environmental and economical questions and to contribute with information for the elaboration of a monitoring system of the quality of the underground waters. It was developed through a case study whose objective is to exemplify, to discuss and to evaluate the established criteria in the geologic and hydrogeologic characterisation of the study area, contributing to the execution of future works.

Starting from the accomplished activities it was idealised the necessary stages so that the geologic and hydrogeologic characterisation of the area of interest are the closest of the reality, giving subsidies for execution of the future stages of a project of waste landfill and assuring an appropriate protection to the underground waters.

3 Introdução

Um dos maiores desafios na administração de grandes metrópoles é a destinação final dos resíduos sólidos produzidos por sua população. População que não pára de crescer, e que produz cada vez mais resíduos. À medida que uma região cresce economicamente, há um aumento de consumo, o que acarreta em incremento proporcional na taxa de produção diária de resíduos sólidos. Um ótimo exemplo é a Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, onde uma população beirando os 18 milhões gera diariamente cerca de 16.000 toneladas de resíduos urbanos (CETESB, 1998) e, apesar de seus 8.051 km^2, restam poucas opções de áreas para dispô-los.

Outro fator complicante é a questão ambiental, destacando-se a deterioração das águas subterrâneas e superficiais, a limitação de espaços disponíveis nas grandes metrópoles, a capacidade limitada dos sítios em operação, a perda de recursos naturais valiosos e a oposição da opinião pública na escolhas dos sítios (Nascimento, 2001).

Durante décadas não havia a menor preocupação quanto ao local ou à forma de disposição desses resíduos e acreditava-se que o líquido que percolava o lixo era completamente atenuado pelo solo ou mesmo pela água subterrânea, não acarretando maiores danos a ambos. No entanto, após a década de 50, diversos estudos vieram a comprovar os malefícios causados por tal líquido (chorume) às águas subterrâneas. Conseqüentemente, passou-se a ter um maior controle, tanto por parte dos órgãos governamentais (no caso do Estado de São Paulo, a CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), como pela própria população. Só a partir daí foram desenvolvidos trabalhos voltados à caracterização e diferenciação dos diversos tipos de resíduos e à determinação da melhor forma de disposição de cada tipo específico.

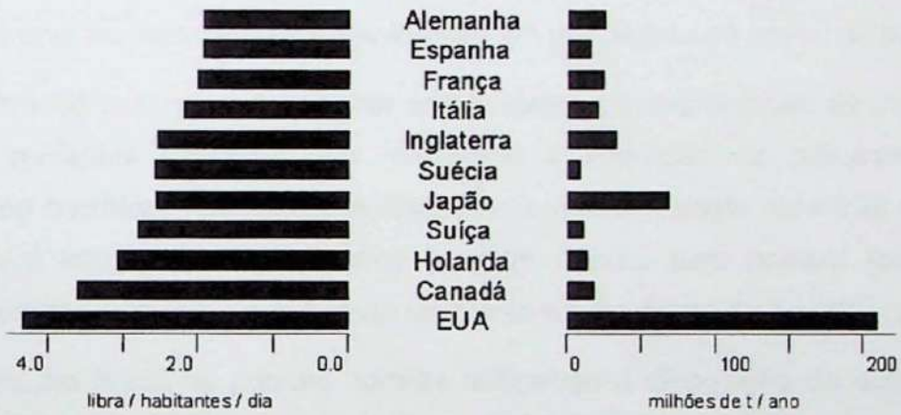
Para se ter idéia dos problemas já causados pelo descontrole da disposição de resíduos, nos Estados Unidos, no fim da década de 80, aproximadamente 20% das ações movidas pela agência ambiental americana (EPA – *Environmental Protection Agency*) se referia a sítios contaminados por resíduos.

As atividades industriais e municipais das grandes cidades produzem diariamente grandes quantidades de resíduos sólidos que são confinados em aterros ou simplesmente lançados na superfície do terreno. Estimativas feitas por Yen & Scalon (1975) indicam que uma cidade com 1 milhão de habitantes pode gerar um volume anual capaz de cobrir uma área de 80 hectares com profundidade média de 5 metros. Embora

parte desse volume possa ser reduzida por meio de reciclagem de materiais e por incineração, o método básico de armazenagem desses resíduos continua sendo o aterro de resíduos sólidos.

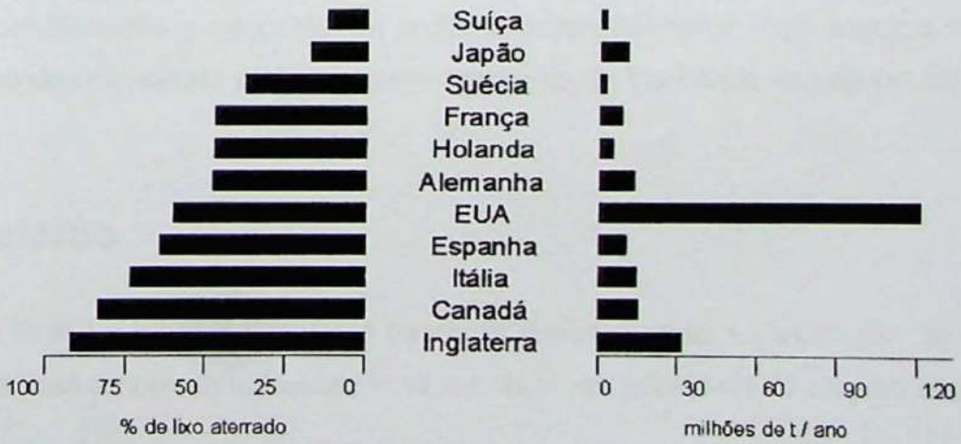
No mundo inteiro a principal forma de disposição de resíduos sólidos urbanos é em aterros sanitários, método relativamente econômico, de tecnologia amplamente conhecida e eficiente quanto à proteção dos recursos naturais, uma vez obedecidos os critérios de seleção de sítios, implantação, operação, monitoramento e encerramento das atividades. Segundo Nascimento (2001), no Brasil, devido à quantidade de áreas disponíveis, a tendência em curto e médio prazos é o uso de aterros sanitários para disposição dos resíduos sólidos urbanos. As figuras 1 e 2 mostram como é a situação em alguns países quanto à geração de resíduos e sua disposição em aterros controlados.

Figura 1. Geração de resíduos urbanos em alguns países desenvolvidos



Fonte: USEPA (1995)

Figura 2. Disposição de resíduos urbanos em aterros



Fonte: USEPA (1995)

No Estado de São Paulo, segundo a CETESB (1998), dos 643 municípios, praticamente a metade, 324 (50,4%), ainda dispõe seus resíduos urbanos em lixões, 136 (21,1%), em aterros controlados e apenas 183 (28,5%), em aterros sanitários. No Brasil, são relativamente recentes a discussão e a conscientização da necessidade de um melhor planejamento e gerenciamento de resíduos, particularmente quanto aos critérios técnicos e ambientais dos projetos de aterros e principalmente aos aspectos geológicos e hidrogeológicos que orientam os projetos.

Principalmente nas regiões úmidas, o lixo enterrado em aterros está sujeito a produzir, sob o efeito da percolação de parte da água da chuva, um líquido contaminante que se denomina chorume. O TDS (Total de Sólidos Dissolvidos) do chorume, além de ser bastante alto, pode ainda conter muitos contaminantes inorgânicos e orgânicos, pondo em risco a qualidade das águas subterrâneas e superficiais.

Percebe-se no exposto a necessidade de um grande cuidado com as águas subterrâneas, devendo esse cuidado, necessariamente, refletir-se em uma maior preocupação com os aspectos hidrogeológicos em um projeto de aterro de resíduos.

Atualmente a técnica dominante nos projetos de implantação de aterros é a da adoção de múltiplas barreiras que restrinjam a liberação de poluentes no meio, associando as barreiras naturalmente disponíveis (hidrogeologia favorável e isolamento com relação a aqüíferos aproveitáveis) àquelas criadas pelo homem (construção de camadas impermeabilizantes e sistemas de coleta e tratamento de líquidos percolados).

Porém, no Brasil há poucas normas referentes à disposição de resíduos sólidos urbanos. Particularmente, quando o assunto é projetos de aterros e sua conseqüente caracterização geológica e hidrogeológica, a carência de normas é ainda maior.

Assim, frente a estes fatos, há necessidade de se estabelecerem critérios para uma correta avaliação geológica e hidrogeológica das áreas onde serão construídos os aterros, possibilitando a execução de projetos ambientalmente mais seguros e facilitando a execução de um correto plano de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

4 Objetivos

No Brasil a situação ainda é bastante crítica quanto à disposição de resíduos e seus problemas ambientais. Desta forma, os objetivos principais do projeto são:

1. Avaliar os métodos utilizados para caracterização geológica e hidrogeológica em projetos de aterros de resíduos sólidos através de um

estudo de caso, contribuindo com o desenvolvimento de futuros projetos, considerando questões técnicas, ambientais e econômicas;

2. Contribuir com informações para a elaboração de um plano adequado de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, que satisfaça as exigências dos principais órgãos controladores nacionais e internacionais.

Com o objetivo de homogeneizar a nomenclatura utilizada neste trabalho, foram discutidos, também, os principais conceitos relativos a resíduos e seus principais componentes, além de suas formas de disposição.

Espera-se com este trabalho contribuir para a elaboração adequada de projetos de aterros sanitários, a partir do conhecimento detalhado da geologia e hidrogeologia do local onde este será implantado, auxiliando na compreensão de cada etapa de um processo de investigação superficial e subsuperficial, e permitindo a execução de um correto plano de monitoramento das águas subterrâneas. Pretendeu-se avaliar a metodologia utilizada em trabalhos e projetos de aterros sanitários, salientando pontos favoráveis e desfavoráveis. O produto final compreende a elaboração de um fluxograma orientador, onde foram definidos os critérios de investigação em função do tipo de resíduo, de aspectos do relevo (morfologia e dinâmica superficial) do sítio onde será implementado o aterro etc.. Espera-se também dar subsídios para uma proposta de monitoramento das águas subterrâneas de aterros, baseada nos mesmos critérios.

5 Aterros de resíduos sólidos

Por princípio, aterro de resíduos sólidos, seja ele urbano ou industrial, é um método controlado de disposição de rejeitos, em que seu principal objetivo é evitar a poluição ou degradação do meio ambiente. Trata-se de uma obra de engenharia onde os resíduos são acomodados no solo no menor espaço prático possível e compactados na forma de camadas, que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, evitando o contato com possíveis vetores de doenças, mal cheiro, impedindo que materiais leves sejam levados pelo vento e minimizando impactos visuais, além de minimizar a infiltração de água e facilitar a movimentação de equipamentos na área.

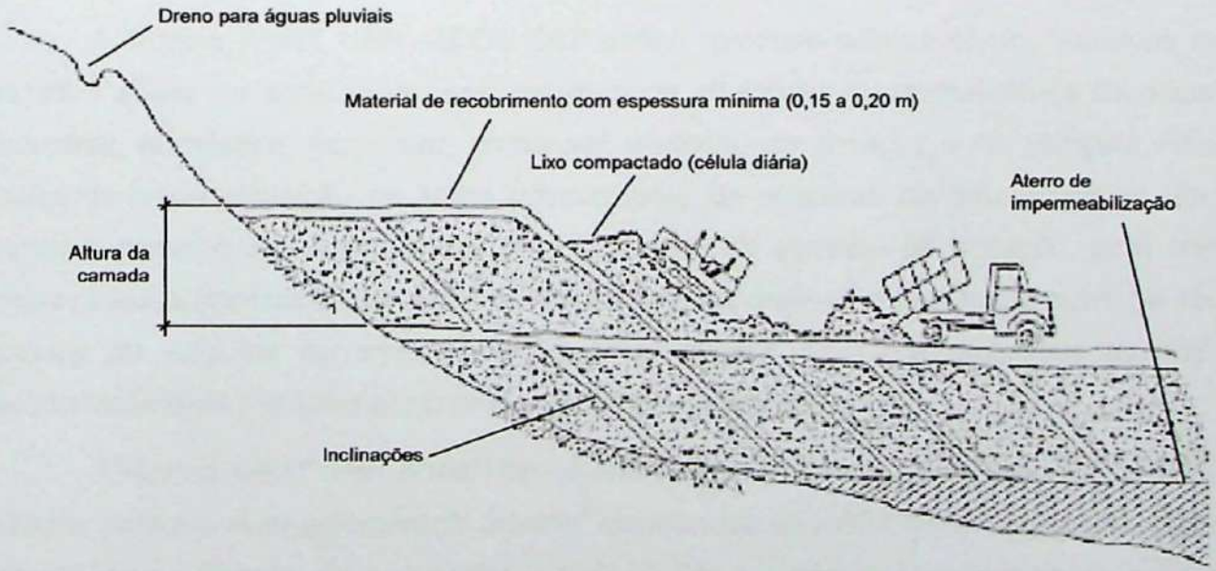
Os resíduos são dispostos em áreas denominadas células, que devem possuir dimensões adequadas, diminuindo problemas na operação do aterro. Caso a altura da célula de lixo seja elevada, prejudicará a subida do trator, dificultando a compactação do lixo e causando diminuição na capacidade do aterro, e, caso possua comprimento muito grande, resultará em uma elevada taxa de infiltração, gerando maior quantidade de

chorume. É importante que no fechamento da célula, após adequada compactação da massa de resíduos, seja deixada uma declividade na superfície em torno de 1%, para permitir o escoamento das águas de chuva.

Para que seja uma obra segura em todos os aspectos é necessário que cuidados sejam tomados durante seu projeto, implantação, operação e fechamento. Deve-se cuidar com a construção de drenos para captação de águas das nascentes e de percolados e com a construção de camadas impermeabilizantes que evitem o contato entre as águas subterrâneas e o chorume. Além disso, durante sua operação, é necessário monitorar a massa de lixo, diminuindo riscos de deslizamentos dos taludes formados pelos resíduos.

A decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos produz continuamente gases em grande quantidade, mesmo após o encerramento das atividades. Trata-se de gases inflamáveis, principalmente metano, dióxido de carbono, nitrogênio e oxigênio, cujo constante monitoramento e drenagem também faz-se necessário.

Figura 3. Perfil de um aterro sanitário em funcionamento



5.1 Definição

A norma ABNT 8418 de março de 1984 define aterro de resíduos sólidos como: *"técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos ou industriais, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este*

que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos a menor área possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário".

A CETESB trata aterro sanitário como "*um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente o lixo domiciliar, que fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite uma confinação segura, em termos de controle da poluição ambiental e proteção ao meio ambiente*".

5.2 Resíduos

O conceito de resíduo - também conhecido por lixo, rejeito, refugo - pode variar muito, conforme a época e o lugar e dependendo de fatores jurídicos, econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos; o que hoje é considerado lixo ou resíduo pode se transformar em algo útil, não descartável. Usualmente consideramos lixo aquilo que não nos interessa, aquilo que não tem mais utilidade. O IPT/CEMPRE (2000) vai mais além e denomina lixo os restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, apresentando-se normalmente sob o estado sólido, semi-sólido ou semilíquido (com conteúdo líquido insuficiente para que possa fluir livremente).

A Norma ABNT NBR 10004/1987 define resíduos sólidos como: "*resíduos nos estados sólido ou semi-sólido, que resultam de atividades da comunidades de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à tecnologia disponível".*

A Norma ABNT NBR 8849/1985 define resíduos sólidos urbanos como: "*resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares, sépticos, de aeroportos e portos".* São também conhecidos como resíduos domiciliares.

5.2.1 Classificação

A Norma ABNT NBR 10004/1987 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, adequando seu manuseio e destinação. É a classificação nacional usualmente utilizada.

Esta classificação é fundamentada em padrões internacionais de concentrações de elementos reconhecidamente perigosos. A norma classifica os resíduos em três classes:

- Classe I – Perigosos. Englobam os resíduos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.
- Classe II – Não-inertes. Englobam os que não se enquadram na Classe I – perigosos ou na Classe III – inertes. Estes resíduos podem ter propriedades tais como combustibilidade, biodegrabilidade ou solubilidade em água.
- Classe III – Inertes. Resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, submetidos ao teste de solubilização, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões definidos. Como exemplos destes materiais citam-se rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas não facilmente decompostos.

5.2.2 Composição

5.2.2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos urbanos são compostos por resíduos domiciliares, comerciais e públicos, sendo classificados como Classe II – não inertes. Essa classificação considera, principalmente, a presença de materiais biodegradáveis em sua composição.

A composição e a quantidade de resíduos gerados por pessoa nos centros urbanos é muito variada em função das condições socioeconômicas, padrões culturais, tipo de uso e ocupação de solo e nível de desenvolvimento tecnológico, tendo se alterado muito no decorrer das últimas décadas.

De acordo com o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares (CETESB, 1998), são produzidas no Estado de São Paulo cerca de 18 mil toneladas/dia de resíduos urbanos, o que representa uma média diária de 0,58 kg/habitante.dia.

5.2.2.2 Resíduos Industriais

Os resíduos industriais são muito variados e dependem exclusivamente do ramo industrial dos geradores. Originados pelas sobras, rejeitos ou refugos dos processamentos industriais, incluem-se nesta categoria os lodos das estações de tratamento e de controle de poluição e os resíduos líquidos que não podem ser lançados na rede de esgotos ou em corpos d'água. Podem ser classificados como resíduos Classe I, Classe II ou Classe III.

Dentre as indústrias com maior potencial de geração de resíduos destacam-se as indústrias automobilísticas, metalúrgicas, mecânicas, eletro-eletrônicas, farmacêuticas, químicas, petroquímicas e têxteis.

Tabela 1. Resíduos Industriais gerados no Estado de São Paulo (toneladas/ano)

Classe I	Classe II	Classe III	Total
535.615	25.038.168	1.045.896	26.619.679

Fonte: CETESB, 1997

6 Critérios Gerais para Seleção de Áreas

A escolha da área mais apropriada para a implantação de um aterro sanitário ou industrial é um processo que permitirá uma sensível diminuição dos custos de investimentos e também a minoração dos efeitos adversos sobre o meio ambiente. É necessário buscar um equilíbrio entre os aspectos sociais envolvidos, os impactos ao meio ambiente e o custo do empreendimento.

O processo de seleção de áreas compreende uma análise de diversos locais candidatos, dos quais o de melhor potencial será priorizado e submetido a estudos de maior detalhe. O processo é compreendido pelo levantamento de dados gerais, onde são coletadas informações populacionais e de quantificação de cada tipo de resíduo, seguido por uma pré-seleção onde dados do meio físico e dados sócioeconômicos são analisados em escala regional, permitindo a seleção de áreas mais aptas à instalação do empreendimento. Posteriormente faz-se o estudo de viabilização de locais, de caráter local, com o objetivo de conhecer as características das áreas pré-selecionadas. Nesta

fase, executa-se trabalhos de campo com investigações de superfície e de subsuperfície. A partir da integração, análise e interpretação dos dados coletados, é possível saber o local mais indicado para instalação do empreendimento, dentre aqueles analisados (D'Almeida, 2000).

Feita a avaliação preliminar das áreas pré-selecionadas temos uma idéia inicial das condições geológicas e hidrogeológicas da área em questão (condutividade hidráulica, profundidade do nível d'água subterrânea), sendo possível comparar estes valores com valores orientadores encontrados em bibliografia ou regulamentados pelos órgãos ambientais responsáveis.

No que se refere a critérios a serem adotados, além de se levar em conta as legislações e normas, devem ser ressaltados os seguintes aspectos:

- o impacto ambiental deve ser minimizado ao máximo de maneira a não acarretar danos ao meio ambiente e à saúde pública;
- a aceitação pela vizinhança do projeto e sua implantação, quando for o caso, deve ser obtida para garantir que não ocorram problemas durante o seu funcionamento;
- os locais onde existe risco maior de ocorrência de fenômenos naturais, tais como chuvas intensas, inundações, recalques ou erosões, devem ser evitados;
- alto índice de evapotranspiração é recomendável, a evaporação média anual no local deve exceder a precipitação média anual, diminuindo a quantidade de percolado;
- é recomendável a implantação em terreno com declividade inferiores a 30%, para evitar problemas geotécnicos (escorregamentos).

O ideal seria que os aterros sanitários e industriais fossem instalados sobre áreas de ocorrência de barreiras geológicas, ou seja, locais com ocorrência natural de rochas diretamente abaixo do empreendimento e estendendo-se razoavelmente ao redor da área (50 m), onde estas, devido suas propriedades e extensão, retardam a propagação do contaminante (Dörhöfer, 1997). A existência desta barreira reduz sensivelmente os custos futuros de implementação do empreendimento, uma vez que reduzirá a necessidade de medidas de contenção artificiais, de custo elevado.

No Brasil a norma que regulamenta as condições ideais das áreas de implantação de aterros sanitários e industriais classe II é a NBR 13896 – Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação, e estabelece como condições

geológicas desejáveis a existência, no local, de um depósito extenso e homogêneo de materiais com condutividade hidráulica inferior a 10^{-6} cm/s e uma zona não-saturada com espessura superior a 3 m. A critério do órgão de controle ambiental local, estes parâmetros podem ser mais ou menos rigorosos, a CETESB considera, ainda, um tempo mínimo de retenção na camada insaturada, variando de 3 a 150 anos, dependendo do tipo de resíduo (tabela 2).

Tabela 2. Critérios para avaliação de local para disposição de resíduos

Tipo de Aterro	Espessura mínima de camada insaturada entre o NA e o fundo do aterro	Condutividade hidráulica*	Mínimo tempo de retenção
Aterro Sanitário – Classe I	3 m	$1 . 10^{-6}$ cm/s	3 anos
Aterro Sanitário – Classe II	3 m	$1 . 10^{-6}$ cm/s	Depende do Resíduo
Aterro Industrial – Classe I	3 m	$1 . 10^{-6}$ cm/s	3 anos
Aterro Industrial – Classe II	4,5 m	3 m com $1 . 10^{-7}$ cm/s + 1,5 m com $1 . 10^{-4}$ cm/s	150 anos

Fonte: CETESB,1985

(*) As condições ideais de condutividade hidráulica são as tabeladas acima; caso isso não ocorra pode-se aceitar coeficientes menores que $1 . 10^{-4}$ cm/s desde que a camada insaturada garanta o tempo de retenção mínimo exigido.

Muitas vezes não é possível atender a todos estes parâmetros e normalmente os órgãos de controle ambiental exigem mais proteção aos corpos hídricos subterrâneos do que o regulamentado. Caso isso ocorra deverão ser feitas camadas impermeabilizantes na superfície inferior do aterro, de modo a garantir o controle da poluição. Deve-se, porém, ter em vista que a escolha de uma área adequada significará menores gastos na execução do aterro e, sobretudo, significará menores riscos ao meio ambiente e à saúde pública.

Como visto, nesta fase do empreendimento já é necessário ter um prévio conhecimento sobre as características geológicas e hidrogeológicas do local onde será implementado o aterro. Porém, devido a escassez de locais para disposição de resíduos, principalmente em grandes centros urbanos como a RMSP, é comum dar-se mais importância a critérios como distância dos núcleos geradores, infra-estrutura (malha viária, eletricidade, etc.), valor das terras e aspectos de legislação, deixando critérios geológicos e hidrogeológicos relegados a fase de projeto do aterro. Nesta fase, então, realiza-se uma investigação detalhada e, não havendo condições adequadas para implantação do aterro, fica necessário o planejamento e a execução de obras de engenharia que garantam proteção adequada ao meio ambiente (impermeabilização com

argilas compactadas, geomembranas sintéticas, drenos profundos, etc.). É sobre essas investigações, posteriores a fase de escolha da área do aterro, que trata este estudo.

7 Materiais e Métodos

O desenvolvimento deste trabalho foi fundamentado a partir de consultas bibliográficas, conhecimento detalhado dos passos realizados e em realização do projeto executivo e visitas à área em estudo.

Pesquisa bibliográfica: por meio desta pretendeu-se conhecer os principais temas relacionados diretamente e indiretamente com a disposição de resíduos e suas influências e interações com o meio ambiente, particularmente os assuntos relativos à poluição do solo e conseqüente degradação das águas subterrâneas. Destacou-se o levantamento das principais referências nacionais e internacionais que tratam da avaliação hidrogeológica e geológica em projetos de aterros.

Estudo de caso: o principal objetivo do estudo de caso é exemplificar, discutir e avaliar os critérios estabelecidos na caracterização geológica e hidrogeológica da área de estudo, contribuindo para a execução de trabalhos futuros, e, para tal, foi escolhido o projeto do Centro Tecnológico de Resíduos de Caieiras. O acompanhamento do processo, muitas vezes juntamente com técnicos da empresa, foi realizado com o registro das etapas por meio de documentação fotográfica, anotações e observações das atividades realizadas na área de estudo. Como o trabalho teve início em 1999, nem todos os passos puderam ser acompanhados e, neste caso, todos os passos tomados durante sua execução foram avaliados a partir do conhecimento de dados de relatórios e entrevistas com a equipe técnica responsável pela execução dos trabalhos.

A partir da compilação dos dados das referências existentes e da avaliação dos métodos utilizados no caso em estudo, serão propostos sugestões na metodologia utilizada. O produto final compreenderá a elaboração de tabelas teóricas e fluxogramas que nortearão as investigações e avaliações geológicas e hidrogeológicas, uma vez já selecionado o sítio onde será implantado o aterro.

8 Atividades Realizadas

As atividades realizadas englobam consultas a relatórios do projeto e entrevistas com os técnicos responsáveis para melhor entendimento das etapas não acompanhadas.

Também englobam atividades em campo e gabinete, desenvolvidas juntamente com pesquisas bibliográficas que possibilitaram um melhor entendimento dos trabalhos realizados.

A pesquisa bibliográfica compreendeu a discussão dos principais conceitos relativos a resíduos e sua correta disposição. Esta atividade objetivou definir e homogeneizar a nomenclatura relativa ao tema, bem como criar subsídios para melhor interpretação das etapas futuras.

Para melhor entendimento do trabalho foi caracterizado o empreendimento em estudo, permitindo conhecer seus objetivos, localização, unidades constituintes e meio físico, particularmente, aspectos regionais da geologia e da hidrogeologia do local.

8.1 Centro Tecnológico de Resíduos – CTR Caieiras

O Centro Tecnológico de Resíduos de Caieiras considera, como filosofia principal, a proteção à saúde humana e ao meio ambiente; seu projeto contempla as necessidades atuais e futuras do empreendedor, quantidades e composição de resíduos, obrigações financeiras e regulamentares. Foi desenvolvido a partir de conceitos de construção, de maneira a garantir um eficiente e efetivo armazenamento e processamento de resíduos, controlar emissões atmosféricas, coletar percolado e outros efluentes líquidos e tratá-los apropriadamente. Também, otimiza a reutilização de energia e materiais, minimiza custos adicionais e atende critérios ambientais de odor e estéticos, tratando-se de um sistema "estado-da-arte" em gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos domésticos.

Este empreendimento pretende atender o Estado de São Paulo, em particular a Região Metropolitana de São Paulo, recebendo resíduos sólidos domésticos, resíduos industriais perigosos e não-perigosos, borras e alguns tipos de resíduos líquidos.

O projeto do CTR Caieiras é dividido em diversas unidades, cada uma correspondente a um aterro e, consequentemente, a um projeto de aterro, com todas as etapas usuais de um projeto de aterro.

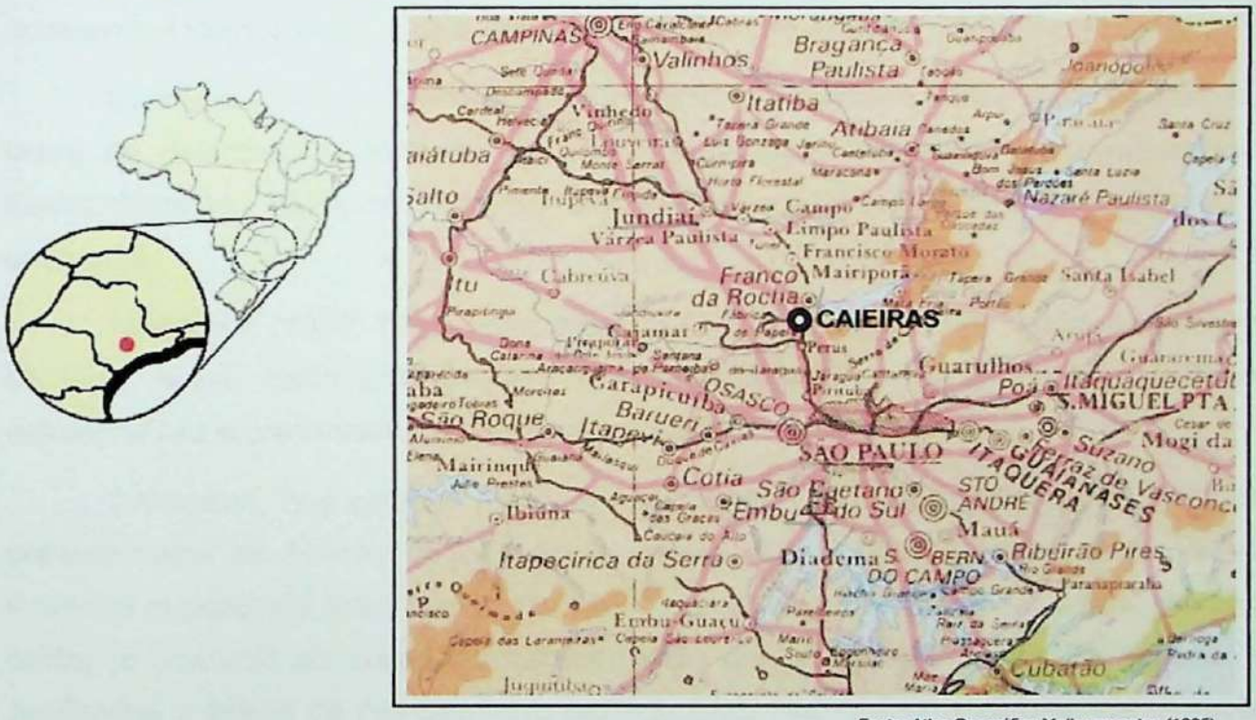
8.1.1 Localização e caracterização da área

O Centro de Tecnológico de Resíduos está localizado na porção nordeste do município de Caieiras, Estado de São Paulo, adjacente à divisa com o município de Franco da Rocha. O empreendimento possui cerca de 3.500.000 m^2 e está situado a aproximadamente 35 km a noroeste da cidade de São Paulo. O município de Caieiras é limítrofe aos municípios de Franco da Rocha a norte, Mairiporã a leste, Perus a sul e

Cajamar a oeste. A sudeste o município é cortado pela serra da Cantareira, que alcança altitudes próximas a 1.100 m. A rodovia dos Bandeirantes, próximo ao km 32, é seu principal acesso.

O clima da região é caracterizado como subtropical úmido, com três a cinco meses secos. O regime térmico apresenta variações suaves no decorrer do ano. Tratando-se de uma área com altitudes elevadas, as temperaturas são relativamente baixas, variando a média anual entre 16° C e 18° C. Os valores médios de janeiro (verão) oscilam entre 19° C e 22° C e em julho (inverno), entre 13,5° C e 15° C.

Figura 4. Localização do empreendimento



Fonte: Atlas Geográfico Melhoramentos (1995)

A umidade do ar se mantém relativamente elevada (na média) durante o ano todo, variando entre um mínimo de 74%, em agosto, e um máximo de 80%, nos meses de janeiro, março, abril e novembro.

Os valores médios dos totais pluviométricos para o período 1988-1997 demonstram variações anuais entre 1200 e 1700 mm, máximo mensal de 420 mm e máximo diário de 121,3 mm, ocorridos em janeiro de 1995. A caracterização do regime pluviométrico foi feita com base nos dados levantados para o Posto Perus – SP (E3 – 030, latitude 23° 34', longitude 46° 45' e altitude 840 m), o posto pluviométrico mais próximo da área do empreendimento.

8.1.2 Geologia regional

O Centro Tecnológico de Resíduos de Caieiras encontra-se inserido no Grupo São Roque, uma associação de metassedimentos de fácies metamórfica xisto verde a anfibolito, recentemente relacionada a uma seqüência vulcanossedimentar datada como do Proterozóico Superior.

Em 1930 foram iniciados os estudos sobre essa importante formação geológica e, desde então, diversos autores contribuíram para o entendimento da estratigrafia e evolução da unidade. Juliani (1993) e Silva (1997) apresentam uma evolução dos conhecimentos geológicos, dentre os quais se destacam os trabalhos de Carneiro (1983), na faixa entre o Pico do Jaraguá e a Serra dos Cristais, incluindo a área do empreendimento, e de Bergmann (1988; 1992), na região de Pirapora do Bom Jesus, que apresentam maior interesse pela proximidade à área de estudo.

Carneiro (1983) reconhece quatro unidades litoestratigráficas afetadas por três fases de deformação, sofrendo posterior milonitização em zonas de cisalhamento. Estruturalmente, configura a região como uma sucessão de dobras antiformes e sinformes.

Bergmann (1988; 1992) caracterizou o Grupo São Roque, na região de Pirapora do Bom Jesus, como uma sequência vulcanossedimentar divida em três unidades estratigráficas representativas de diferentes condições paleoambientais.

Entretanto, nos estudos mais recentes sobre a compartimentação tectônica do pré-cambriano do Estado de São Paulo, Hasui *et al.* (1988) propõem um contexto tectônico regional de deformação dúctil não-coaxial, com regime de cavalgamento para oeste, provocando as zonas de transcorrência de direção EW (como Taxaquara e Jundiuvira) e zonas de cavalgamento oblíquo ENE. Tal regime gera uma estruturação sob a forma de corpos lenticularizados e alongados segundo a direção preferencial ENE.

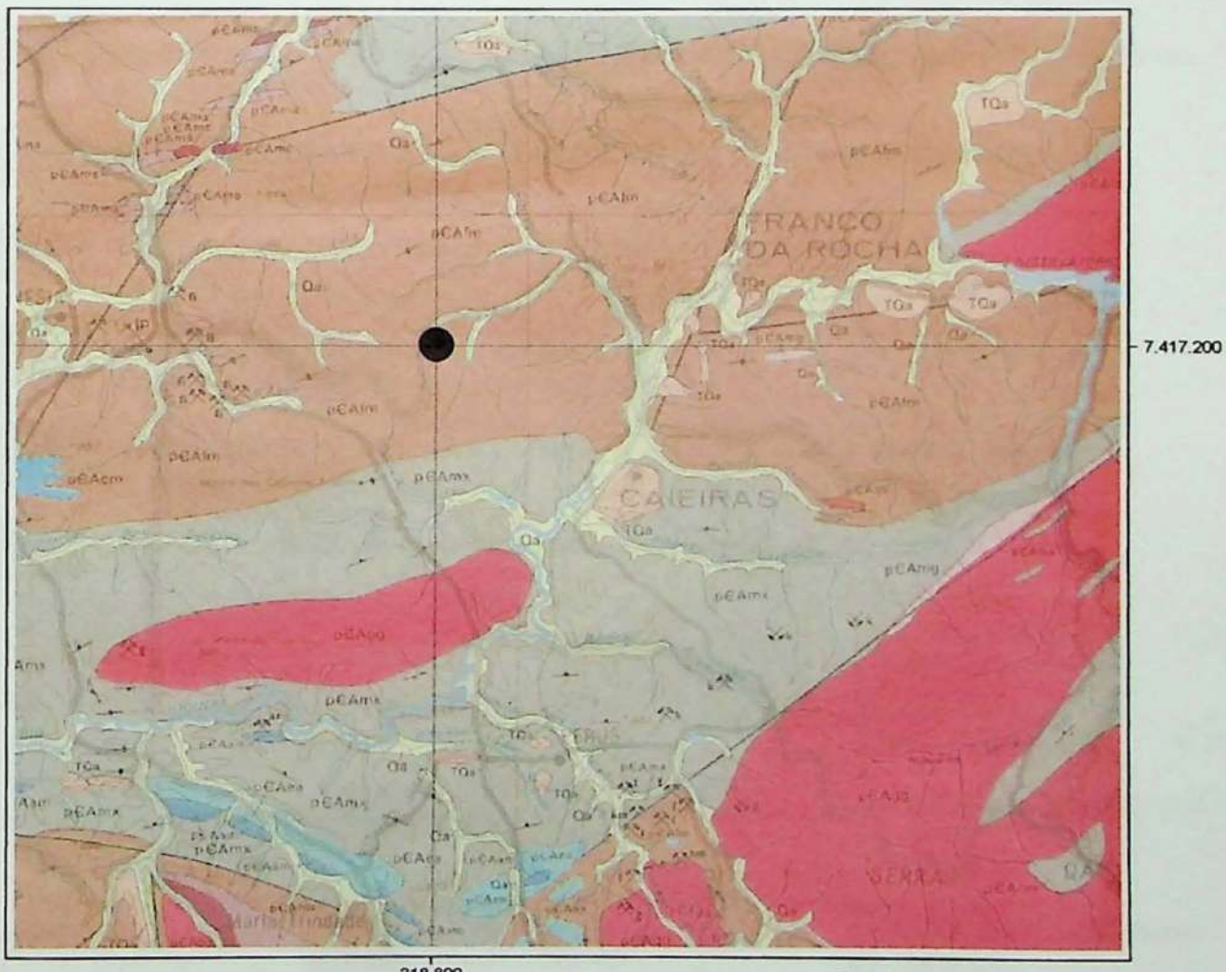
Os limites do Grupo São Roque são: a Zona de Cisalhamento de Jundiuvira, no norte, localizada a 5 km ao norte do empreendimento; no sul, a Zona de Cisalhamento de Taxaquara; ambas com movimentação destral. O embasamento é composto por gnaisses e migmatitos, relacionados ao complexo Amparo, e milonito-gnaisses e blastomilonitos dobrados.

Na área de influência, as rochas do Grupo São Roque configuram faixas alongadas em contatos freqüentemente transicionais, orientadas preferencialmente nas direções ENE e EW. De modo geral, compreendem metassedimentos pelíticos (filitos e xistos) e psamíticos (quartzitos, metarenitos e metaconglomerados), químicos

(metacalcários e metadolomitos) e químico-detríticos (cálcio-silicáticas), além de anfibolitos e metavulcânicas localizadas.

A unidade que predomina na região do Centro Tecnológico de Resíduos é a dos filitos e/ou metasiltitos, ocupando a região central e a parte norte da área de influência. Posteriormente, aparecem os micaxistos, aflorando ao sul da área, envolvendo o maciço granítico do Morro do Tico-Tico e encaixados nos filitos através de falhas em sua porção norte. Migmatitos e gnaisses-granitos aparecem subordinadamente no extremo nordeste em contatos inferidos com os micaxistos. Lentes de metarenitos e metaconglomerados ocorrem a noroeste, encaixados nas unidades dos filitos. Rochas metassedimentares químicas (metacalcários e metadolomitos) aparecem na porção leste, próximo a Cajamar, configurando uma unidade de pouca expressão na região. Corpos de rochas metabásicas ocorrem no extremo sul da região, encaixados nos xistos.

Figura 5. Mapa geológico da região do empreendimento



Fonte: Emplasa, 1980 (modificado)

N

● Área em estudo

Escala 1:100.000

LEGENDA DO MAPA GEOLÓGICO

Cenozóico

Qa — Aluviões fluviais: argila, areia e cascalho

TQa — Argilas, areias e cascalhos da Formação São Paulo e da Formação Caçapava

Mesozóico

db, lp — Diques de rochas básicas cretáceas. db = Diabásio, lp = Lamprófiro

Pré-Cambriano

pεAgg — Granitos a granodioritos normais ou em parte gnaissicos, equigranulares ou porfiróides

pεAqu — Quartzitos

pεAfm — Filitos e/ou metassiltitos, inclui também filonitos em zonas de movimentação tectônica intensificada

pεAma — Meta-arenitos (meta-arcósios e metagrauvacas) de baixo grau metamórfico

pεAmc — Metaconglomerados de baixo grau metamórfico

pεAmx — Micaxisto e/ou meta-arenito de médio grau metamórfico, inclui também xistos miloníticos em zona de movimentação tectônica

pεAea — Epídoto anfibolitos bandados e xistos verdes (metamargas e/ou metatufitos)

pεAam — Anfibolitos, metabasitos (metadiabásio, metagabro)

Contato definido

Contato aproximado

Contato suposto

Falha indiscriminada

Eixo de zona de falha

Foliação subvertical (mergulho 80° - 90°)

Foliação (mergulho 45° - 80°)

Foliação (mergulho 10° - 45°)

Foliação subhorizontal (mergulho 0° - 10°)

Lineação com caimento indicado — 25°

Área de extração mineral em atividade

Área de extração mineral abandonada

OCORRÊNCIAS MINERAIS
a – Areia
ar – Argila
am – Água
c – Calcário e Calcossilicato
k – Caulim
f – Feldspato
fl – Filito
g – Granito
q – Quartzo e Areia Industrial

Granitos e granitóides ocorrem como corpos de dimensões variáveis e formas irregulares, alguns dos quais formando grandes feições dômicas, tal como o Morro do Tico-Tico, localizado a sul dos limites da área.

Os depósitos quaternários de natureza aluvionar aparecem ao longo das principais drenagens da área com formas alongadas e largura média entre 200 e 300 metros.

Alguns depósitos cenozóicos são encontrados próximos à cidade de Caieiras e podem corresponder aos sedimentos da Formação São Paulo. Carneiro (*op. cit.*) associa estes sedimentos a depósitos colúvio-eluvionares inconsolidados.

As foliações predominantes possuem direções preferenciais ENE, com mergulho de médio a alto grau, muitas vezes subverticalizados. Localmente, as unidades dos filitos e/ou metassiltitos, micaxistos e dos pigmatitos e gnaisses-granitos apresentam feições de deformação por cisalhamento, gerando milonitos e/ou filonitos.

Dentro do contexto regional, a deformação na área ocorreu por cisalhamento não-coaxial em regime dúctil, gerando a estruturação sob a forma de corpos lenticularizados e alongados segundo a direção preferencial ENE.

A região é sismologicamente estável, de baixa ocorrência de abalos, no domínio de intensidades sísmicas IV a V, o que denota efeitos sísmicos de baixo prejuízo em construções comuns. Sob tal aspecto, a influência de sismos no empreendimento é praticamente inexistente.

8.1.3 Hidrogeologia

As águas subterrâneas na região do empreendimento fluem através de estruturas rúpteis, como fissuras e falhas nas rochas cristalinas intemperizadas. As diferenças entre unidades litológicas refletem as condições subterrâneas locais. Estas unidades não são uniformes; formações argilosas são intercaladas com areia, areia siltosa ou camada de areia siltosa fina. As áreas de areia e areia siltosa oferecem boas condições de recarga subterrânea. As áreas de altas elevações, associadas com unidades areia/silte e estruturas antiformais, exibem alto potencial de recarga do aqüífero.

Vários poços profundos foram utilizados para o abastecimento d'água da região até que o Sistema e Tratamento e Distribuição de água da Cantareira fosse construído. A taxa de produção destes poços atingiu de 5,0 a 100,0 metros cúbicos por hora (m^3/h). As taxas de vazão destes poços variam significativamente dependendo da possível associação com unidades litológicas menos favoráveis (formações homogêneas). Poços

profundos localizados em unidades litológicas que possuem baixos coeficientes de armazenamento e transmissividade produzem vazões baixas.

A área do empreendimento está localizada sobre rochas metamórficas pré-cambrianas, caracterizada por aqüíferos de rochas fraturados. Este tipo de terreno, com descontinuidades, junções e fraturas, constitui a estrutura mais importante do ponto de vista hidrogeológico. Estudos considerando o sistema principal de fraturas e suas relações com o potencial do aqüífero concluíram que fraturas transversais são mais favoráveis, desde que elas sejam originadas pela tração originando espaços vazios entre as paredes. Similarmente, as fraturas longitudinais também são zonas favoráveis.

A direção principal do fluxo de água subterrânea é controlada pelas descontinuidades nas geoestruturas e, em geral, o fluxo de água subterrânea acompanha a drenagem da água superficial.

8.1.4 Caracterização do empreendimento

O Centro Tecnológico de Resíduo de Caieiras tem por objetivo atender à grande e crescente demanda existente por locais adequados ao tratamento e disposição final de resíduos perigosos e não-perigosos em diferentes estados físicos, originários da intensa urbanização da RMSP e das cidades em seu entorno. Para tanto, o empreendimento é composto de um Aterro de Resíduos Perigosos Classe I e um Aterro Sanitário e de Resíduos Não-Perigosos Classe II (Aterro de Resíduo Co-disposto). Serão implantados, ainda, unidades de recepção, estocagem e tratamento de resíduos.

Até o momento está em operação a Fase I do Aterro de Resíduo Co-disposto, em implementação o Aterro Classe I e em fase de projeto a Fase II do Aterro de Resíduo Co-disposto.

8.1.4.1 Aterro de Resíduos Perigosos Classe I

O aterro de resíduos perigosos classe I foi locado no topo do morro, lado oeste do vale em que se encontra o empreendimento (figura 6).

Por estar em topo de morro a espessura da camada insaturada é maior, o que confere ao local características desejáveis em aterro de resíduos perigosos.

Neste aterro foi possível acompanhar a execução da parte final das investigações geológicas e hidrogeológicas e elaborar mapa potenciométrico. O aterro está em fase final de implementação, devendo entrar em atividade no início de 2004.

Figura 6. Aterro de Resíduos Perigosos Classe I em fase de obras

8.1.4.2 Aterro Sanitário e de Resíduos Não-Perigosos Classe II

Os aterros sanitário e industrial foram combinados em um único aterro e será referido como Aterro de Resíduos Co-disposto. Nesse aterro serão dispostos resíduos domésticos, resíduos industriais Classe II e lodos de estação de tratamento de esgotos domésticos. O aterro foi locado na metade sul da área e foi dividido em partes, cada uma com fases distintas de projeto. Cada fase do aterro tem como objetivo entrar em operação próximo ao fechamento da fase anterior. A Fase I entrou em operação em setembro de 2002 e a Fase II está em fase de projeto (figuras 7 e 8).

O local escolhido compreende quatro vales, e a intenção é que cada fase seja construída em um deles, o que minimizará os cortes e aterros, a interferência com futuras construções, o manuseio duplo do solo de escavação e a importação de material, maximizando a reutilização do solo local e volume útil de destino do lixo.

Figura 7. Aterro Co-disposto Fase I em atividade

Figura 8. Área onde será implantado o Aterro Co-disposto Fase II

8.1.5 Caracterização geológica e hidrogeológica

Todo e qualquer tipo de construção de obras civis e estudos de meio ambiente que não envolvem, necessariamente, obras civis, devem ser precedidos por estudos que caracterizem geológica e hidrogeologicamente a área de interesse. É muito importante que, desde o início das atividades, estejam bem definidas as principais características geológicas da área, para orientar o projeto segundo as aptidões naturais do local, propiciando a elaboração de um empreendimento ambientalmente mais seguro e mais econômico.

Em um aterro sanitário não é diferente, durante o planejamento e desenvolvimento de cada etapa da construção do aterro, é sempre necessário informações subsuperficiais. As características geológicas e hidrogeológicas que afetarão o desenho do projeto e sua construção precisam ser investigadas e avaliadas para definir a melhor maneira de construir o aterro sanitário, no que se refere a aspectos ambientais (minimizando seu potencial de contaminação) e econômicos.

Normalmente, qualquer tipo de trabalho cujo objetivo seja reconhecer as características subsuperficiais de uma área, envolvendo investigações geológicas e hidrogeológicas, é dividido em duas etapas bem distintas.

A primeira etapa, referida nesse trabalho como investigação fase I, envolve a análise das informações já existentes sobre o local, permitindo a elaboração de um modelo conceitual simplificado da área do empreendimento. Trata-se de um estudo preliminar, de âmbito regional, onde são realizados levantamentos bibliográficos, e consultas a mapas geológicos e estruturais e a cartas topográficas, geotécnicas,

pedológicas e geomorfológicas. É comum, nesta fase, recorrer-se a fotos aéreas e imagens de satélite, para reconhecimento de possíveis estruturas geológicas regionais.

A segunda etapa, referida neste trabalho como investigação fase II, inclui desde atividades de campo (investigações superficiais e subsuperficiais) a atividades de laboratório e gabinete (análise das amostras e interpretação dos dados coletados). Essa fase contempla investigações diretas na área do empreendimento, gera informações mais detalhadas e contempla grande parte do tempo e dos custos dos trabalhos de investigação geológica e hidrogeológica.

Neste trabalho serão descritas e detalhadas todas as atividades realizadas na fase II de investigação e caracterização geológica e hidrogeológica, que, por sua vez foram divididas em outras três etapas, as investigações superficiais, as investigações subsuperficiais e interpretação dos dados.

Após a realização destas etapas têm-se as condições necessárias para o desenvolvimento do projeto executivo do aterro e para a definição do plano de monitoramento das águas subterrâneas, esta última, também avaliada neste projeto.

8.2 Investigações superficiais

Foram consideradas investigações superficiais aquelas realizadas em superfície sem alteração nas propriedades físicas dos materiais investigados. Foram realizados mapeamento da geologia da área de interesse e investigações geofísicas.

No CTR – Caieiras estes trabalhos foram os primeiros da fase II de investigação, realizados logo após a definição da área onde seria construído o empreendimento. Além de subsidiar etapas posteriores, foram importantes na confecção dos relatórios e estudos de impacto ambiental.

8.2.1 Mapeamento da geologia local

Para maior conhecimento dos aspectos geológicos da área do empreendimento foi realizado um mapeamento geológico local. O mapeamento é um método de investigação que procura identificar tais aspectos, caracterizando as diferentes unidades presentes na área e seu comportamento. Durante os trabalhos é necessário sempre atentar para elementos de forte influência em etapas futuras, como possíveis falhas geológicas, contatos entre unidades, direção das fraturas, zonas cársticas, etc.

No CTR – Caieiras o mapeamento teve a função de orientar os projetistas sobre a futura localização de cada unidade, ou seja, de cada aterro que foi ou será construído. Os trabalhos foram realizados na execução do Relatório Ambiental Preliminar (RAP) e nos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e, portanto, os dados aqui apresentados referem-se a informações contidas nestes relatórios. Não foi possível o acompanhamento das atividades.

Para descrição da geologia local foram analisados cerca de 100 afloramentos e 6 lâminas petrográficas. Para auxílio na caracterização geológica local, foram realizadas, ainda, 13 sondagens mecânicas e 18 sondagens a percussão, distribuídas de forma homogênea pela área do empreendimento. As sondagens realizadas nesta etapa serão descritas posteriormente, junto às demais atividades de investigação de subsuperfície.

Foi constatado que, localmente, há predomínio de metapelitos e metasiltitos argilosos, intensamente intemperizados, que em contexto mais regional estariam incluídos dentro da unidade de filitos do Grupo São Roque. Foi possível, ainda identificar diferentes termos composicionais, que se repetem dentro do referido grupo, com passagem basicamente gradacional. É comum a ocorrência de intercalações de filitos pelíticos, metasiltitos e níveis silto-arenosos finos ou arenosos finos.

Nas extremidades norte e sul da área foi encontrado uma rocha bandada, muito intemperizada, com ocorrência de níveis centimétricos de filitos pelíticos em meio a metasiltitos de coloração vermelho claro. Na porção sul também foi identificado, junto a foliação, a presença de rochas vulcânicas ácidas de caráter intrusivo (figura 9).

Figura 9. Filitos com fraturas subverticais, unidade predominante na área, (esq.) e veio de quartzo de caráter intrusivo (dir.)

Nas cotas mais elevadas, no sul da área foi observado filitos e coloração cinza, grafitosos, com intercalações de bandas centimétricas (1 a 5 cm) de siltitos a arenitos finos rosa claro, finamente foliados.

A sudeste da área, próximo ao limite do empreendimento, foi encontrado metarenitos e/ou quartizitos maciços ou cizalhados, de granulometria média a grossa, cor branca, pouco micáceo.

Apesar do intenso grau de alteração dos metassedimentos, identifica-se muitas vezes a estratificação reliquiar (acamamento). Também é intenso seu dobramento, com presença de foliações na rocha, sejam elas clivagens ardosianas ou de crenulação de uma das duas outras fases de deformação.

Nos fundos dos vales, em especial àqueles associados a unidade dos filitos pelíticos homogêneos, ocorrem solos de caráter aluvionar hidromórficos, em muitos casos adquirindo uma coloração acinzentada, em função do material carbonoso associado (filito grafitoso).

Não foi observada em campo a presença de falhas, contudo, segundo os relatórios, na fotointerpretação realizada na fase I de investigação, foi inferida uma falha que atingiria a parte centro-sul da área, com direção sudeste-noroeste, associada ao lineamento da drenagem principal da área.

A partir dos trabalhos de investigação geológica em campo foi elaborado um mapa geológico local. Com base no mapa geológico local realizado e nas informações coletadas no mapeamento foi feita uma seção geológica de direção noroeste-sudeste, onde as principais características estruturais da área puderam ser melhor entendidas.

8.2.2 Investigações geofísicas

Os métodos de investigação geofísica são considerados métodos indiretos de investigação. Constituem um conjunto de ensaios de campo que não alteram as propriedades físicas do material ensaiado, utilizando parâmetros como velocidade de propagação de ondas acústicas, resistividade elétrica, contraste de densidade e campo magnético da Terra. Estas propriedades guardam estreita relação com características geológico-geotécnicas encontradas nos maciços e em seu manto de intemperismo. O custo dos trabalhos de levantamento geofísico pode ser considerado relativamente baixo quando comparado às investigações subsuperficiais, além disso, possibilitam o levantamento de uma área em muito menos tempo.

De acordo com Sara (1994), os métodos geofísicos podem ser usados para diferentes fins na avaliação das características de uma área onde será construído um aterro sanitário, a seguir:

- *Investigação geológica:* auxiliam no conhecimento da estratigrafia do local, determinando a espessuras dos depósitos superficiais e na profundidade do topo rochoso, na extensão do perfil de intemperismo e na caracterização estrutural.
- *Avaliação de recursos:* localização dos aqüíferos e avaliação da qualidade da água subterrânea; exploração de depósitos de areia e cascalho, e rocha para agregado; e identificação de depósitos de argila.
- *Detecção de vazios e resíduos enterrados:* cavidades naturais, áreas de deposição de resíduos antigas, tubulações, etc.

No CTR – Caieiras os trabalhos de investigação geofísica foram realizados no início dos trabalhos, para execução do Relatório Ambiental Preliminar (RAP) e nos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e, portanto, os dados aqui apresentados referem-se a informações contidas nestes relatórios. Não foi possível o acompanhamento destas atividades.

Foram realizadas investigações por métodos geoelétricos, ou seja, investigações que envolvem a detecção, na superfície dos terrenos, dos parâmetros relacionados ao fluxo de corrente elétrica em subsuperfície (Oliveira & Brito, 1998). Cada uma das técnicas de investigação geoelétrica tiveram objetivos distintos, sendo eles:

- *Sondagens elétricas verticais:* visaram identificar a posição do nível superior da camada saturada, ou seja, o nível d'água subterrânea. Foi utilizado o arranjo Schlumberger com espaçamento máximo entre eletrodos de emissão (AB) de 200 m.
- *Potencial espontâneo:* foi aplicado com o objetivo de obter informações sobre as direções do fluxo d'água no maciço. As leituras foram espaçadas em 20 m.
- *Caminhamento elétrico:* objetivou obter informações sobre a presença de fraturamentos, zonas de alteração no interior do maciço e eventualmente contatos litológicos. Foi utilizado o arranjo Dipolo-Dipolo com espaçamento de eletrodos de 20 m e 5 níveis de investigação.

Os relatórios mostram que os níveis d'água são relativamente profundos e devem situar-se na rocha alterada. No entanto, ao longo das linhas principais do fluxo das águas subterrâneas é normal a ocorrência de aqüíferos rasos (aqüífero suspenso), de pequena extensão lateral e por isso difíceis de serem quantificados por métodos indiretos de investigação. O nível d'água varia entre 1,3 m no SE 13 (ponto de sondagem elétrica vertical topograficamente mais baixo) e 23,5 m no SE 18 (ponto topograficamente mais

alto), o que demonstra uma relação entre a topografia e a superfície potenciométrica do local.

O topo rochoso e a espessura do manto de alteração apresentaram comportamento mais irregular, variando entre 10 m no SE 27 e 50,90 no SE 01, não apresentando nenhuma relação com a topografia.

O fluxo da água subterrânea no maciço possui controle estrutural, ou seja, é controlado pelas fraturas que ocorrem em grande quantidade na área.

Os dados referentes às sondagens elétricas verticais, incluindo profundidade do nível d'água e do topo rochoso, estão correlacionados no quadro a seguir:

Tabela 3. Profundidades do nível d'água e topo rochoso nas investigações geofísicas

Sondagem	Cota (m)	Profundidade NA* (m)	Profundidade TR** (m)	Cota NA (m)	Cota TR (m)
SE 01	827,10	21,40	50,90	805,70	776,20
SE 02	780,40	6,00	24,00	774,40	756,40
SE 03	795,90	14,00	49,00	778,90	743,90
SE 04	831,60	19,30	49,30	812,30	782,30
SE 05	838,70	17,70	50,70	821,00	788,00
SE 06	838,70	17,70	50,70	821,00	790,70
SE 07	779,20	5,00	25,00	774,20	754,20
SE 08	777,80	12,80	40,80	765,00	737,00
SE 09	829,60	13,20	43,20	816,40	786,40
SE 10	819,00	10,00	33,00	809,00	786,00
SE 11	776,10	4,60	34,60	771,50	741,50
SE 12	791,20	5,80	35,80	785,40	755,40
SE 13	785,40	1,30	17,90	784,10	767,50
SE 14	845,10	17,00	33,00	828,10	812,10
SE 15	828,20	14,00	44,00	814,20	784,20
SE 16	860,70	-	15,20	-	845,20
SE 17	892,60	-	43,50	-	849,10
SE 18	858,10	23,50	38,50	834,60	819,60
SE 19	834,50	21,30	26,30	813,20	808,20
SE 20	804,30	7,20	29,20	797,10	775,10
SE 21	818,10	17,20	25,20	800,90	792,90
SE 22	842,10	17,50	23,50	824,60	818,60
SE 23	833,10	19,20	25,20	813,90	807,90
SE 24	840,40	15,00	21,00	825,40	819,40
SE 25	840,20	18,20	28,20	822,00	812,00
SE 26	797,10	4,80	14,80	792,30	782,30
SE 27	798,30	6,00	10,00	792,30	788,30
SE 28	802,90	9,50	24,50	793,40	788,40

NA = nível d'água subterrânea; **TR = topo rochoso

8.3 Investigações subsuperficiais

As investigações subsuperficiais têm como principal função complementar as informações já adquiridas em fases anteriores, fornecendo informações subsuperficiais, detalhando ao máximo as características geológicas e hidrogeológicas de uma área e possibilitando interpretações mais precisas.

São investigações diretas, como furos de sondagens, poços e trincheiras, e ensaios realizados *in situ*, como SPT e ensaios de permeabilidade. São responsáveis pela maior parte dos custos na caracterização geológica e hidrogeológica de uma área para construção de um aterro sanitário.

8.3.1 Sondagens mecânicas

As sondagens mecânicas permitem amostrar pontualmente diversas características sobre o solo, a geologia e a hidrogeologia do local. São informações que, quando correlacionadas, permitem desenhar um quadro sobre as características subsuperficiais de uma área.

A determinação da localização, profundidade e número total de sondagens, piezômetros e poços, tem papel fundamental na interpretação dessas características. Uma subamostragem pode refletir em modelos conceituais errôneos, gerando erros de interpretação dos dados e comprometendo as etapas seguintes.

Por isso, na realização das sondagens, o primeiro passo deve ser a execução de um plano de sondagens, que incluirá a localização proposta e a profundidade estimada de cada furo de sondagem, levando-se em consideração todas as informações já adquiridas.

As sondagens realizadas no CTR - Caieiras foram realizadas em etapas. Primeiramente foi executado um plano de sondagem que abrangia toda a área de interesse, auxiliando na execução dos relatórios ambientais e no mapeamento geológico. Posteriormente, para execução do projeto de cada unidade foi realizado um plano de sondagem individual. Os trabalhos de sondagem realizados para projeto do Aterro Classe I e da Fase II do Aterro Co-disposto foram acompanhados.

Os métodos de investigação mecânica utilizados na caracterização geológica e hidrogeológica do CTR – Caieiras foram sondagens a trado, a percussão e sondagens mistas.

Todos os trabalhos de sondagem mecânicas foram realizados segundo às normas NBR 6484 – Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos e NBR 9603 – Sondagem a trado da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

8.3.1.1 Sondagens a trado

Como auxílio ao mapeamento geológico foram realizadas sondagens a trado. Foram executados 13 sondagens rasas (aproximadamente 5 m), com trado mecânico motorizado, de diâmetro de 4" . Essas sondagens permitiram o reconhecimento das unidades litológicas, por meio de seus produtos de alteração, e a definição do nível d'água, quando atingido.

Os resultados indicaram uma alteração predominantemente argilosa ou silto-argilosa, com intercalações silto-arenosas finas em trechos localizados.

As sondagens a trado não puderam ser acompanhadas e as informações foram retiradas dos relatórios gerados.

8.3.1.2 Sondagens a percussão

A sondagem a percussão é o método mais utilizado em coberturas terrosas e manto de intemperismo, estando limitada pela ocorrência de material duro, como, por exemplo, a camada rija de transição solo-rocha, matacões, seixos ou cascalhos.

Foram realizadas de acordo com as diretrizes da NBR 6484/1980 da ABNT, com tubo de revestimento de 2 ½" de diâmetro externo. Durante a execução das sondagens, foram medidas em diversas profundidades, as resistências oferecidas pelo terreno à cravação de um amostrador padrão tipo SPT, de 2" e 1 $^{3}/_{8}$" de diâmetros nominais, respectivamente, externo e interno.

Essas medidas, feitas a cada metro do terreno penetrado, correspondem ao número de golpes necessários de uma massa metálica de 65 kg, caindo livremente de uma altura de 75 cm sobre um ressalto da parte superior do hasteamento a ele conectado, para a cravação dos 30 cm finais do amostrador, um tubo único de 45 cm.

O equipamento utilizado foi um tripé, uma bomba d'água, um tanque d'água de 200 litros e ferramentas de corte de solo.

Para apresentação dos resultados foram feitos perfis de sondagem, individualmente para cada sondagem, que contêm informações técnicas, como diâmetro da perfuração, tipo de ferramenta utilizada, posição do revestimento, profundidade atingida, posição do nível d'água, etc., além de uma breve descrição do material

amostrado. Os dados do ensaio SPT são apresentados junto ao perfil da sondagem na forma um gráfico, onde esses são relacionados com a profundidade do ensaio.

Os resultados indicaram a existência de um material predominantemente argiloso a silto-argiloso, com intercalações silto-arenosas finas em trechos localizados.

8.3.1.3 Sondagens mistas

Sondagens mistas são realizadas quando se pretende perfurar o maciço rochoso com sondagens rotativas e acima dela há uma camada de material terroso. Nesta camada se realiza sondagem a percussão com SPT e, quando a resistência do material atinge 50 golpes para 30 cm, passa-se a sondagem rotativa.

A sondagem rotativa é um tipo de investigação feita com um tubo, denominado barrilete, dotado de uma peça cortante, feita com material de alta dureza (coroa) em sua ponta, que perfura o terreno através de um movimento de rotação. Normalmente este tipo de sondagem permite a recuperação de testemunhos das rochas perfuradas.

Os materiais utilizados foram sonda motorizada, hastes, barriletes e coroas, além dos materiais usados para realização das sondagens a percussão.

As sondagens foram realizadas com diâmetro NW (75,69 mm) e HW (99,23 mm), de acordo com a empresa contratada para realização dos serviços, e paralisadas ao atingirem 5 m abaixo do nível d'água. Caso o nível d'água não fosse atingido, as sondagens eram paralisadas de acordo com profundidades pré-estabelecidas caso a caso.

Os resultados foram apresentados em perfis de sondagens que, além das informações contidas em perfis de sondagem a percussão, contêm dados sobre o maciço rochoso como grau de alteração da rocha, grau de fraturamento, números de fraturas por metro, orientação das fraturas, porcentagem de recuperação de amostras. Devido à baixa dureza, o elevado grau de alteração e a predominância de fraturas subverticais das rochas encontradas, não foi possível a recuperação de testemunhos em bom estado, dificultando a determinação do grau de fraturamento da rocha.

As sondagens revelaram que a área é composta basicamente por filitos de estrutura foliada, variando entre inclinada e subvertical e textura muito fina. As fraturas predominantemente inclinadas a subverticais, com paredes lisas e oxidadas e o material inconsolidado é representado pelo solo de alteração da rocha, sendo constituído, em geral, por silte argiloso, micáceo, marrom rosado, vermelho e amarelo.

8.3.2 Ensaios de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade em solos têm a finalidade de determinar as condutividades hidráulicas dos terrenos em estudo. São ensaios pontuais, pois analisam apenas as condições no furo de sondagem ou no poço e não nas imediações.

Na imensa maioria das sondagens a percussão ou mistas foram realizados ensaios de permeabilidade em solos, executados conforme método descrito no Boletim nº 4 da ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia) de 1996.

O método utilizado para realização dos ensaios foi o de infiltração, onde o nível d'água é mantido constante dentro do furo de sondagem. Para manutenção do nível é aplicada uma carga constante e mede-se a vazão injetada necessária para manter tal nível assim.

O trecho ensaiado em cada sondagem foi entre 4 e 5 m e, em sondagens mais rasas, entre 3 e 4 m. Estes trechos, muitas vezes, estavam posicionados acima do nível d'água. Nas sondagens mistas, os trechos ensaiados foram mais profundos, variando com a profundidade da sondagem, posicionados no maciço rochoso, porém sempre na camada insaturada.

Para realização dos ensaios foram necessários uma bomba d'água, um hidrômetro, um tanque de água de 200 litros, provetas de 1 litro e medidor de nível d'água. Revestiu-se o furo de sondagem deixando exposto o intervalo desejado e, em seguida, encheu-se o furo até o revestimento. Por exemplo, para ensaio do trecho entre 4 e 5 m, encheu-se o furo até 4 m ou mais, e toma-se este instante como tempo zero. Após isso se manteve o nível d'água constante, alimentado a partir da bomba d'água, medindo-se o volume de água introduzido em um certo intervalo de tempo, ou seja, a vazão utilizada para o calculo da permeabilidade. O intervalo de tempo para medida de vazão, no geral, variou entre 15 e 20 minutos.

Após medida a vazão, os dados de perda d'água específica (vazão) são convertidos em condutividade hidráulica por meio de ábacos.

Os ensaios de permeabilidade em solos realizados mostraram que a área onde está sendo construído o CTR – Caieiras apresenta condutividades hidráulicas entre 1.10^{-5} e 8.10^{-6} cm/s, com franca predominância dos valores superiores a 10^{-6} cm/s. Os ensaios realizados dentro do maciço revelaram condutividades hidráulicas entre 1.10^{-3} e 5.10^{-5} cm/s, com franca predominância de valores próximos a 10^{-4} cm/s.

Em algumas sondagens não foi possível estabelecer a condutividade hidráulica devido à grande quantidade de fraturas encontradas no local e ao fato destas serem

meios preferenciais para caminho das águas subterrâneas, com valores de condutividade hidráulica muito alto. Isto exige uma vazão muito grande de água para manter o nível constante, o que não foi possível com a bomba d'água utilizada. Em outros casos o trecho ensaiado foi considerado impermeável, não sendo possível realizar o ensaio de permeabilidade.

8.4 Interpretação dos dados

Os resultados das investigações devem ser interpretados e apresentados com o objetivo de possibilitar sua fácil compreensão, permitindo sua utilização durante a execução do projeto do aterro sanitário e do plano de monitoramento da água subterrânea. A correlação e a interpolação de dados pontuais permitem o desenvolvimento de um modelo geológico e hidrogeológico aplicado à área em estudo, prevendo o comportamento de águas subterrâneas e seus eventuais contaminantes, o que torna possível o diagnóstico preciso de potenciais passivos associados à área investigada.

Estes documentos são de extrema importância, pois, além de representarem os resultados dos trabalhos realizados na área de interesse, subsidiam possíveis estudos futuros de remediação de acidentes ambientais que possam ocorrer durante a operação do empreendimento.

No CTR – Caieiras os dados das investigações foram usados para confecção de mapas e perfis geotécnicos, cujo maior interesse é a dureza do solo e da rocha alterada. Com finalidade de conhecimento geológico e hidrogeológico foram realizados mapas potenciométricos e seções geológicas.

8.4.1 Mapas potenciométricos

A partir das informações sobre a carga hidráulica fornecida nas sondagens e em alguns poços de monitoramento, foram traçados mapas potenciométricos.

Os mapas potenciométricos são importantes porque mostram a elevação da superfície piezométrica no aqüífero, fornecendo informações fundamentais para o projeto e construção do aterro sanitário de forma adequada, como sentido do fluxo, profundidade da água subterrânea, permitindo delimitar divisores de bacia hidrogeológica e definir gradientes hidráulicos, áreas de recarga e descarga.

Foi realizado um mapa potenciométrico simplificado geral da área e mapas potenciométricos individuais, para cada aterro. Não houve participação na execução do mapa potenciométrico da Fase I do Aterro Co-disposto.

Os mapas potenciométricos foram traçados a partir dos dados de profundidade de nível d'água, ou seja, das cargas hidráulicas fornecidas por cada sondagem, não importando a data de realização. Estas sondagens foram locadas na planta geral da área e, a partir disso, os dados foram interpolados.

Para a realização da interpolação foi utilizado o *software Surfer 8* e o método utilizado foi o método de krigagem.

O *Surfer 8* interpola os pontos amostrados, porém, não leva em consideração informações sobre o meio físico, como topografia, divisores de água, drenagens, diferenças litológicas e anisotropias. Por isso, antes de interpolar os dados, foi desenvolvido um modelo conceitual hidrogeológico da área em questão, levando em consideração todos as informações já adquiridas sobre a geologia e a hidrogeologia local.

A partir do modelo conceitual foi possível inferir o comportamento das curvas eqüipotenciais frente a dados do meio físico, acrescentando informações e permitindo a interpolação dos dados de maneira muito mais confiável.

Depois de elaborado o mapa potenciométrico no *Surfer 8*, o mapa foi transferido e redesenhado no *software AutoCAD R14*. Esta etapa permitiu o acréscimo de mais detalhes, informações geradas no modelo conceitual e que não puderam ser transferida para o *Surfer 8*, como curvatura em "V" nas drenagens e extrapolação de algumas curvas.

No *AutoCAD*, também, foi gerada uma rede de fluxo da água subterrânea a partir da superfície potenciométrica gerada. Essa rede de fluxo levou em consideração que o fluxo da água subterrânea é perpendicular às eqüipotenciais.

Os mapas potenciométricos realizados mostraram uma relação entre a superfície topográfica e a superfície piezométrica do aqüífero freático. Os rios são influenciados pela água subterrânea, constituindo as áreas de descarga do aqüífero freático, sendo a área de recarga, os topos dos morros.

8.4.2 Seções geológicas

As seções geológicas são resultados das interpretações realizadas nas investigações geológicas subsuperficiais. Os dados de pelo menos duas sondagens são correlacionados, permitindo inferir as condições geológicas entre elas.

No CTR – Caieiras foram realizadas três seções geológicas simplificadas para o projeto da fase II do aterro co-disposto. Estas seções tiveram como principal objetivo a determinação do topo rochoso e de áreas com concentração de material argiloso.

Para realização das seções geológicas utilizaram-se sondagens que se encontravam aproximadamente em linha e estivessem dentro ou próximo da área de interesse e dados da geofísica sobre o topo rochoso. Os dados fornecidos nos perfis geológico-geotécnicos de cada sondagem foram simplificados e agrupados em três grupos:

- *Material argiloso:* franca predominância de argila siltosa de coloração variegada, amarelo a marrom, eventualmente com presença de raízes. Em geral trata-se de solo superficial, solo coluvionar e solo aluvionar.
- *Material siltoso:* franca predominância de silte argiloso, vermelho a marrom, correspondente ao solo de alteração de rocha.
- *Filito:* maciço rochoso, generalizado como filito.

Como a maioria das sondagens não alcançaram a rocha, a determinação da profundidade do topo rochoso foi baseada nos dados de geofísica gerados.

Estes dados foram correlacionados, gerando três seções geológicas que incluíram dados relativos aos ensaios de SPT, realizados em cada sondagem a percussão ou mista.

8.5 Plano de monitoramento

Depois de projetado e construído o aterro é necessário preparar um plano de monitoramento das águas subterrâneas. Este plano deve estabelecer uma rede de monitoramento, determinando a quantidade, a localização, a profundidade e a seção filtrante dos poços de monitoramento, além dos parâmetros que serão analisados quimicamente e em que periodicidade. Estes fatores podem variar dependendo das características geológicas do local e do tipo de resíduo que será disposto no aterro. Neste trabalho nos interessa apenas os aspectos relativos a rede de monitoramento.

Os poços de monitoramento têm como principais objetivos possibilitar a medição do nível d'água subterrânea regularmente, possibilitar a coleta de amostras da água subterrânea para caracterização geoquímica, investigação de contaminação e, se for o caso, extensão de plumas, efetuar ensaios hidrogeológicos para determinar velocidades e direções de fluxo das águas subterrâneas, condutividade hidráulicas, dispersividade e retardamentos (Oliveira & Brito, 1998).

Para um correto monitoramento da qualidade das águas subterrâneas é fundamental que as etapas que compreenderam a caracterização geológica e hidrogeológica do local tenham sido bem executadas, permitindo desenvolver um modelo hidrogeológico próximo à realidade.

Foram instalados poços de monitoramento na Fase I do Aterro Co-disposto e projetado os poços do Aterro Classe I.

Os principais critérios utilizados para a locação em planta do poço de monitoramento foram o modelo geológico e hidrogeológico previamente desenvolvidos, aliada à geometria projetada para a disposição dos resíduos.

Como principais diretrizes para a construção e instalação do poço de monitoramento foram utilizadas as Normas ABNT NBR 13.895/1997 e CETESB 06.010. Os poços de monitoramento foram instalados utilizando-se PVC geomecânico com 2" (duas polegadas) de diâmetro interno. Os perfis construtivos apresentaram idealmente de 4,0 a 6,0 (quatro a seis) metros de seção filtrante, no sentido de se obter uma coluna d'água suficiente para a amostragem de água subterrânea, considerando as variações sazonais do nível d'água. Foi utilizado como material selante, bentonita, com o objetivo de vedar o espaço anular evitando a contaminação do aqüífero pela percolação de líquidos ao longo da seção do poço. O espaço anular entre o filtro e a parede de perfuração foi preenchido por pré – filtro constituído por areia quartzosa bem selecionada, tanto em termos mineralógicos como granulométricos, apresentando granulometria de 1 a 2 mm, sendo lançado desde 2 m acima do trecho de filtro até o fundo do furo.

Foi instalada uma caixa de proteção para os poços, uma proteção de PVC ao redor do poço com diâmetro aproximado de 40 cm ou uma proteção de concreto com diâmetro aproximado de 80 cm. Os tubos de revestimento foram deixados salientes na superfície a aproximadamente 30 cm acima da boca do poço.

Para o Aterro Co-disposto Fase I foram instalados 7 poços de monitoramento, 2 a montante e 5 a jusante. Para o Aterro Classe I estão projetados 4 poços de monitoramento locados ao redor do topo do morro em que está sendo construído o aterro.

9 Avaliação da metodologia

Diversos fatores possuem forte influência na tomada de decisões sobre quais os métodos serão utilizados na caracterização da geologia e da hidrogeologia de áreas onde

serão implantados aterros de resíduos sólidos. Fatores econômicos e disponibilidade de tempo são os principais. O alto custo de algumas operações e a ânsia dos clientes por verem seu empreendimento em operação fazem com que os técnicos responsáveis pelo projeto optem por métodos mais baratos, rápidos e nem sempre tão eficientes, podendo trazer complicações futuras, durante a operação do aterro.

Por outro lado, a carência de normas e diretrizes que possam definir, qualitativa e quantitativamente, a forma que será executada estas obras, torna mais complicada a argumentação sobre novas investigações (e consequentemente mais custos), frente aos clientes.

Não indiferente aos motivos pelo qual um ou outro método foi, ou não, aplicado, foram avaliados os métodos utilizados na caracterização geológica e hidrogeológica do Centro Tecnológico de Resíduos CTR – Caieiras, com a finalidade de facilitar a tomada de decisões em projetos futuros, direcionando os trabalhos.

9.1 Investigações superficiais

As investigações superficiais contemplaram os trabalhos de mapeamento geológico local e as investigações geofísicas.

Depois de escolhida a área onde será implantado o aterro, o mapeamento é, normalmente, a primeira etapa da fase II de investigação, auxiliando na definição da melhor maneira e local para construção do aterro sanitário. No caso em estudo, estes trabalhos foram realizados posteriormente aos trabalhos de investigação fase I, e foram as primeiras etapas realizadas da fase II de investigação, o que é coerente, pois facilita a tomada de decisões nas etapas futuras, diminuindo custos.

O empreendimento possui aproximadamente 35 ha e o número de 100 afloramentos permite uma boa amostragem da geologia local, considerando sua finalidade. Experiências anteriores mostram que em outros aterros sanitários construídos, esta etapa é realizada de maneira muito simples e, em alguns casos, não realizada, contudo, é crescente a exigência dos órgãos ambientais no que se refere à realização de mapeamento geológico mais detalhados, além do fato que a ausência desta etapa amplifica a possibilidade de erros em outras etapas.

Como os trabalhos não foram acompanhados não foi possível saber a qualidade dos afloramentos estudados e, tampouco, a qualidade dos trabalhos de descrição executados. Porém, as informações permitiram a caracterização das unidades litológicas

com suficiente detalhamento. Não foram confeccionadas fichas de afloramento e mapa dos afloramentos, o que dificulta a avaliação neste aspecto.

Há enorme carência em dados estruturais, estes se resumem a medidas aproximadas de mergulho das fraturas em poucos afloramentos. Por se tratar de um empreendimento localizado sobre rochas altamente fraturadas, deveria haver um detalhamento da geologia estrutural local, sem o qual fica impossível estabelecer um modelo conceitual próximo à realidade. Essas fraturas são caminhos preferenciais para água subterrânea e, conseqüentemente, dos contaminantes, devendo-se ter cuidado especial com elas.

As confecções do mapa geológico local e suas respectivas seções geológicas são frutos dos trabalhos de mapeamento e do desenvolvimento do modelo geológico conceitual da área, permitindo visualizar os dados coletados e as conclusões tiradas. Sua realização, quando em áreas de diversas unidades, como é o caso, é fundamental, permitindo otimizar etapas futuras.

As sondagens realizadas durante a etapa de mapeamento foram importantes, pois forneceram as primeiras informações sobre a subsuperfície, complementando os trabalhos de mapeamento geológico local e, sobretudo, fornecendo parâmetros de comparação com os dados gerados nas investigações geofísicas.

As investigações geofísicas permitem o conhecimento do subsolo com uma ótima relação custo/benefício e são normalmente utilizadas na fase de reconhecimento da área, auxiliando na definição da melhor maneira e local para construção do aterro sanitário e no entendimento geral da geologia local, nunca substituindo os trabalhos de investigação subsuperficiais. No caso em estudo as investigações geofísicas foram realizadas no começo dos estudos, complementando os dados preliminares de superfície gerados no mapeamento da área, fornecendo subsídios para um melhor aproveitamento da etapa seguinte, ou seja, das investigações subsuperficiais (sondagens mecânicas e ensaios de permeabilidade), e permitindo definir o local onde cada unidade seria construída.

Desta forma, portanto, cronologicamente a execução dos levantamentos geofísicos foi correta, pois permitiu otimizar os trabalhos de sondagem mecânica, reduzindo o número de ensaios requeridos, desenhando um quadro preliminar das condições geológicas e hidrogeológicas do local antes das etapas de maior custo.

Os métodos e arranjos utilizados foram corretos, pois são os mais indicados e de maior aplicação na identificação das características geológicas (contatos entre unidades, topo rochoso e fraturamento) e das características hidrogeológicas (direção do fluxo e nível d'água) desejadas. Oliveira & Brito (1998) correlacionaram os métodos de

investigações geofísicas e os objetivos da investigação, classificando entre zero, quando não aplicável, e quatro, quando de larga aplicação (anexo I). No caso em estudo, todos os métodos utilizados e seus objetivos são classificados como quatro, ou seja, de larga aplicação.

As interpretações dos dados gerados não coincidiram com dados reais, fornecidos pelas sondagens mecânicas. Nos casos em que a sondagem elétrica vertical foi realizada em cotas altas (topos de morros), houve divergência de até 25 m entre as cotas do nível d'água e do topo rochoso indicadas pela interpretação dos dados geofísicos e as cotas encontradas nas sondagens mecânicas. Nas cotas mais baixas, onde o nível d'água é mais raso, os erros foram bem menores, praticamente não existindo. Tal erro pode ser provocado pela carência de dados reais nas porções mais elevadas, já que as sondagens realizadas até este ponto do projeto se localizavam próximas às drenagens, nas porções mais baixas. Esta carência pode ter gerado um erro na interpretação dos dados geofísicos gerados.

9.2 Investigações subsuperficiais

Os métodos utilizados para conhecimento geológico e hidrogeológico da área, realizados em subsuperfície, foram as sondagens mecânicas e os ensaios de permeabilidade. Estes métodos são, reconhecidamente, os mais utilizados em obras de engenharia.

As sondagens mecânicas e os ensaios de permeabilidade são responsáveis por grande parte dos custos das etapas de investigação e, por isso, é extremamente necessário a execução de um plano de sondagem baseado em informações já adquiridas em etapas anteriores e em um modelo conceitual preliminar das características subsuperficiais da área, otimizando a execução e minimizando os custos desta etapa.

Desta forma, os trabalhos de investigação subsuperficial devem ser realizados posteriormente às investigações superficiais, podendo, em alguns casos serem concomitantes, pois auxiliam na interpretação desta etapa. Cronologicamente, portanto, estes trabalhos foram realizados corretamente no CTR – Caieiras.

Sara (1994) e USEPA (1993) quantificaram o número mínimo de sondagens ideal para caracterização de uma área com fins de construção de um aterro sanitário, gerando tabelas que relacionam a área do empreendimento com o número de sondagens rasas e profundas. Baseando-se nos trabalhos realizados por ambos os autores, o número de

sondagens realizadas no CTR – Caieiras é satisfatório, seja considerando a área total do empreendimento ou cada unidade individualmente.

Tabela 4. Número mínimo de sondagens mecânicas, segundo Sara (1994) e USEPA (1993)

Área	Sondagens Rasas		Sondagens Profundas	
Hectares	Sara (1994)	USEPA (1993)	Sara (1994)	USEPA (1993)
Menos que 4	3	4	1	1
4 a 19	6	8	2	2
20 a 39	10	14	4	4
40 a 80	15	20	5	5
Mais que 80	18 + 1 a cada 4 ha adicionais	24 + 1 a cada 4 ha adicionais	6 + 1 a cada 16 ha adicionais	6 + 1 a cada 4 ha adicionais

Fonte: Sara, 1994 e USEPA, 1993 (modificado)

Contudo, estas tabelas não levam em consideração a localização das sondagens, e o que se percebe quando analisado a distribuição destas sondagens é uma enorme carência de dados nas regiões mais elevadas da área, principalmente quanto a aspectos hidrogeológicos. Nesta regiões o nível d'água é mais profundo, havendo a necessidade de perfurações mais profundas e, por isso, mais caras. Com a finalidade de diminuir custos do projeto, optou-se, em muitos casos, por interromper as sondagens antes de chegar ao nível d'água subterrânea, diminuindo a quantidade de informações hidrogeológicas.

Nas regiões próximo às drenagens é natural haver maior concentração de dados subsuperficiais, uma vez que, além de serem sondagens mais rasas e mais baratas, fornecem grande quantidade de informações geotécnicas necessárias para realização do projeto construtivo do aterro.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados na imensa maioria das sondagens a percussão ou mistas, o que permitiu uma excelente amostragem de dados sobre condutividade hidráulica da área. Contudo, nas sondagens a percussão, os ensaios de permeabilidade foram realizados sempre nas mesmas profundidades (4 a 5 m ou 3 a 4 m), não importando as características do local ou a profundidade do nível d'água. O ideal seria que ao menos fossem realizados ensaios de permeabilidade a profundidades rasas (3 a 5 m), caracterizando o solo sobre o qual será construído o aterro sanitário, e ensaios de permeabilidade abaixo do nível d'água, caracterizando a zona saturada do aqüífero.

Nas sondagens mistas, os ensaios de permeabilidade caracterizaram intervalos mais profundos, no maciço rochoso, porém também na zona insaturada.

No CTR – Caieiras, foram realizados ensaios de permeabilidade sob o nível d'água subterrânea apenas nos casos onde este se localizava acima de 5 m de profundidade. Há, portanto, carência de dados de condutividade hidráulica da zona saturada do aqüífero.

Quanto a execução, os trabalhos foram realizados corretamente, conforme normas dos principais órgãos brasileiros, ou seja, NBR 6484 – Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos e NBR 9603 – Sondagem a trado da ABNT, e Boletim nº 4 da ABGE.

Para medição do nível d'água utilizou-se medidor de nível d'água, o que é correto. Contudo, não é rara a ocorrência de diferentes níveis d'água no terreno e nessas condições, o nível d'água no furo apresentará variações à medida que a perfuração avança. Ao término da sondagem, o nível d'água medido no furo refletirá o equilíbrio dinâmico desses vários níveis, com predominância daquele de maior condutividade hidráulica. Outro fator que influirá na medida do nível d'água é a utilização de água de circulação nas sondagens. Por isso, é necessário que, para medida do nível d'água, o furo seja esgotado, devendo-se aguardar reestabilização do equilíbrio natural.

Percebe-se, portanto, que a medida do nível d'água em furos de sondagem, como o que foi feito no caso em estudo, pode não representar a realidade, gerando interpretações errôneas no futuro.

9.3 Interpretação dos dados

Para uma correta interpretação dos dados coletados é importante que todas as informações obtidas em todas as etapas anteriores de investigação das características geológicas e hidrogeológicas da área de interesse sejam interligadas e analisadas como um todo, permitindo estabelecer um modelo geológico e hidrogeológico conceitual e inferir o comportamento das eqüipotenciais e das unidades geológicas encontradas.

É importante, também, que os dados sejam coletados adequadamente, o que não ocorreu no caso em estudo.

A superfície piezométrica de um aqüífero é um parâmetro dinâmico, que varia muito, sendo altamente influenciada pelo regime de chuvas de uma região e havendo alterações diárias em alguns casos. Por isso, para que dados sobre o nível d'água subterrânea encontrado nas sondagens possam ser correlacionados é extremamente

necessário que estes sejam coletados sobre as mesmas condições do aqüífero, ou seja, os dados devem ser coletados, se possível, no mesmo dia.

Além disso, a medida de nível d'água em sondagens nem sempre é confiável, uma vez que pode representar o equilíbrio dinâmico de vários níveis e pode ser alterado pela água de circulação da sondagem.

No CTR – Caieiras, os dados usados para confecção dos mapas potenciométricos foram coletados em sondagens e em diferentes datas, gerando, possivelmente, interpretações pouco confiáveis.

Contudo, antes da execução do mapa potenciométrico foi desenvolvido um modelo hidrogeológico conceitual da área, que como visto antes, é uma etapa fundamental. Quando dados sobre o nível d'água divergiam muito do modelo conceitual idealizado eram desconsiderados, o que julgo correto sob estas condições.

As seções geológicas geradas a partir dos dados das sondagens mecânicas e da geofísica foram muito simples. Embora, no geral, as condições de intemperismo da rocha encontrada no local (predominantemente filitos) tenham gerado solos bastante homogêneos, a simplificação em apenas três unidades foi exagerada. Deveria haver mais detalhes, incluindo mais unidades geológico-geotécnicas.

Como são poucas as sondagens profundas na área de interesse, a utilização dos dados gerados nas investigações geofísicas foi uma boa alternativa como fonte de informações sobre o maciço.

9.4 Plano de monitoramento

Após todas as etapas de investigação e de bem conhecidas todas as características geológicas e hidrogeológicas da área em que será implantado o aterro sanitário, tem-se as condições necessárias para a execução de um projeto de aterro ambientalmente seguro e de um correto plano de monitoramento das águas subterrâneas.

De acordo com o modelo conceitual e os mapas potenciométricos gerados, a locação dos poços de monitoramento foi adequada. Os poços instalados constituem uma rede de observação da qualidade da água subterrânea satisfatória do ponto de vista ambiental, pois suas respectivas localizações em planta consideram tanto um eventual aporte como uma eventual fuga de contaminantes, assegurando o monitoramento a jusante e a montante das áreas de interesse.

A quantidade também é satisfatória, estando acima do exigido pela CETESB (um a montante e três a jusante). No caso do aterro classe I, localizado em topo do morro e, portanto, área de recarga do aqüífero, não há normas e regulamentações sobre a quantidade de poços de monitoramento. Contudo, a locação dos poços de monitoramento regularmente espaçada em todo o entorno do aterro permite amostrar a qualidade da água subterrânea em todos os sentidos de fluxo.

Os poços de monitoramento foram executados corretamente segundo normas da ABNT (NBR 13.895/1997) e CETESB (06.010).

Para conhecimento da condutividade hidráulica da zona saturada, deveriam ser realizados ensaios tipo *Slug Test*. Estes ensaios determinam a condutividade hidráulica da zona saturada do aqüífero, a partir da mudança instantânea do nível d'água dentro do poço de monitoramento e na medida do tempo de recuperação do nível estático. Atualmente estes ensaios possuem larga aplicação e normalmente são os mais utilizados para determinação da condutividade hidráulica do maciço.

10 Interpretação dos resultados obtidos

A partir das atividades realizadas foi possível idealizar as etapas necessárias para que a caracterização geológica e hidrogeológica da área de interesse seja o mais próximo a realidade possível, dando subsídios para execução das etapas futuras dentro de um projeto de aterro de resíduos sólidos e assegurando uma proteção adequada às águas subterrâneas.

Como visto, durante a execução de um projeto de aterro diversos fatores possuem forte influência na tomada de decisões sobre a metodologia utilizada, como diminuição de custos, a exigência dos órgãos controladores ambientais responsáveis, o tamanho e o tipo de empreendimento, entre outros. Por isso, a relação entre o cliente e o responsável pelo projeto terá efeito significante no desenvolvimento das atividades, com forte influência nas etapas realizadas e nos caminhos pelo qual será conduzido os trabalhos.

A metodologia sugerida neste trabalho considera, em primeiro lugar, aspectos ambientais e a conseqüente necessidade de se conhecer detalhadamente o subsolo da área onde será construído o aterro, estando sempre dentro das exigências dos órgãos controladores ambientais.

Todo trabalho de investigação geológica e hidrogeológica de um lugar, seja qual for o fim, deve começar com os estudos de âmbito regional, com levantamentos bibliográficos e consultas a mapas, ou seja, as investigações fase I.

As etapas seguintes compreenderão as investigações fase II e o ideal é haver um aumento no grau de detalhamento do conhecimento da área a cada etapa realizada.

Sendo assim, as primeiras etapas a serem realizadas na fase II de investigação são as investigações superficiais. Estas etapas possuem menor custos, abrangem toda a área e fornecem informações fundamentais para escolha das etapas futuras.

Deve ser realizado um mapeamento geológico local e, se possível, devem ser analisadas lâminas petrográficas. Esta etapa deve incluir um estudo da geologia estrutural, com ampla coleta e análise de dados estruturais. As unidades identificadas e informações como mergulho das camadas, falhas e contato entre unidades devem ser apresentados em um mapa geológico local e seções geológicas das áreas de maior complexidade. Fichas e mapa dos afloramentos facilitam a posterior observação dos dados coletados, quando necessário.

Para complementar as informações adquiridas no mapeamento geológico podem ser realizadas investigações geofísicas. Esta etapa, no geral, não é exigida pelos órgãos controladores ambientais, porém, dependendo da complexidade geológica do local, pode se tornar vital para garantir a correta análise e interpolação de dados geológicos existentes, sendo necessário avaliar a relação custo/benefício com base nas necessidades do projeto e nas informações já adquiridas sobre a geologia. Deve vir sempre acompanhada de sondagens mecânicas auxiliares que possibilitarão a correta interpretação dos dados geofísicos.

Concluída estas etapas, deve-se analisar as informações adquiridas e definir preliminarmente um modelo conceitual da área em estudo. Com base neste modelo deve-se desenvolver o plano de sondagem. O plano de sondagem incluirá a locação das sondagens e sua profundidade estimada. Deve-se cuidar com a locação e o número de sondagens planejadas para que não ocorram interpretações errôneas devido uma subamostragem ou má localização dos furos de sondagem.

Segue-se com as sondagens mecânicas e os ensaios *in situ* (SPT e ensaio de permeabilidade), etapas que compreendem a maior parte dos custos dos trabalhos de investigação e de execução extremamente necessária, não podendo nunca ser substituída por investigações indiretas. Estes devem ser apresentados em perfis geológico-geotécnicos e correlacionados gerando seções geológicas.

A execução de seções geológicas entre as sondagens é fundamental para o entendimento da estratigrafia local, condição de forte influência no comportamento das águas subterrâneas.

A melhor maneira de se obter dados sobre o nível d'água no aqüífero seria a instalação de piezômetros. Espalhados pela área do empreendimento, estes fornecem informações precisas sobre a carga hidráulica nestes pontos. Contudo, não há exigência por parte dos órgãos controladores ambientais brasileiros (particularmente a CETESB) quanto a instalação de piezômetros e, em muitos casos, opta-se por utilizar dados de nível d'água coletados nas sondagens, opção mais rápida e barata. Seja qual for o caso, é necessário que os dados utilizados para interpretações futuras sejam referentes ao mesmo dia.

Todas as informações adquiridas permitirão a definição do modelo conceitual hidrogeológico final, onde a partir dele será confeccionado mapas potenciométricos e mapas de fluxo da água subterrânea. Caso sejam instalados piezômetros é possível fazer a modelagem matemática hidrogeológica do local, gerando um modelo muito mais preciso, se bem executado, e próximo à realidade, além de possibilitar a simulação de diversos cenários de fluxo da água subterrânea.

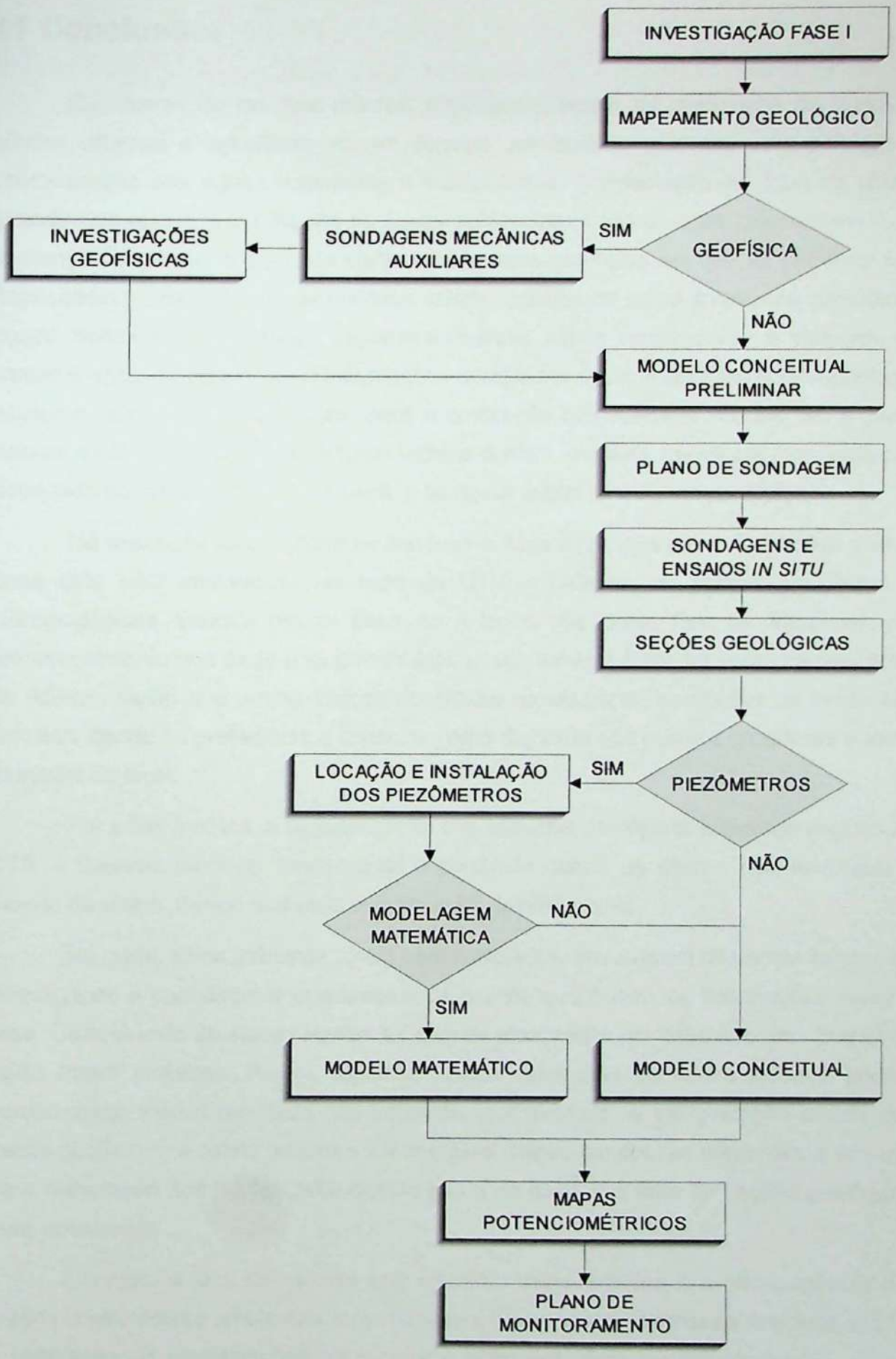
Com o modelo hidrogeológico desenvolvido é possível saber o comportamento das águas subterrâneas e então executar a locação dos poços de monitoramento de forma correta, garantindo a execução de um empreendimento ambientalmente seguro e diminuindo gastos futuros com potenciais contaminações das águas subterrâneas.

Evidentemente, no decorrer dos trabalhos e no avanço dos conhecimentos pode-se optar pela inclusão ou exclusão de etapas. De acordo com a complexidade geológica e, conseqüentemente, hidrogeológica do local e do tamanho do empreendimento, é possível optar pela execução de trabalhos mais detalhados, diminuição ou aumento da quantidade de sondagens realizadas ou execução ou não de modelagem matemática. Tal decisão deve ser tomada pelo responsável técnico frente à situação encontrada.

Entende-se como um local de menor complexidade geológica um local com apenas uma unidade homogênea e uma condutividade hidráulica, sem fraturas ou falhas e topografia suave. Locais com diversas unidades, diferentes condutividades hidráulicas, aqüíferos suspensos, aqüitardes e aqüicludes, alto mergulho das camadas e com grande quantidade de fraturas ou falhas aumentam a complexidade geológica do local.

A figura 10 resume as atividades ideais para realização da caracterização geológica e hidrogeológica em projetos de aterro de resíduos sólidos.

Figura 10. Fluxograma das atividades de investigação geológicas e hidrogeológicas em projeto de aterro de resíduos sólidos



11 Conclusões

Os aterros de resíduos sólidos, principais métodos de disposição de resíduos sólidos urbanos e industriais, trazem consigo um inerente potencial para poluição e contaminação das águas superficiais e subterrâneas. A percolação da água da chuva através dos resíduos carreia até as águas subterrâneas constituintes indesejáveis. Sua prevenção depende, em grande parte, do ambiente geológico em que os resíduos são depositados e, mesmo que os resíduos sejam depositados sobre ambientes geológicos pouco favoráveis e camadas impermeabilizantes sejam necessárias, a redução da contaminação vai depender de informações adequadas sobre a geologia e hidrogeologia existente nos locais selecionados para a colocação dos resíduos sólidos. Só a partir desses dados e de um planejamento técnico correto, pode-se assegurar uma proteção adequada ao meio ambiente, em geral, e às águas subterrâneas, em particular.

Na execução de um aterro de resíduos sólidos o primeiro passo é escolher a área onde este será implantado. No caso do CTR – Caieiras, os fatores geológicos e hidrogeológicos tiveram pouco peso na escolha da área. Por se tratar de um empreendimento que exige uma grande área e cujo objetivo é abrigar resíduos provindos da RMSP, região que possui intensa densidade populacional, as opções de áreas são restritas, dando-se preferência a aspectos como distância dos núcleos geradores e infra-estrutura do local.

Por estes motivos, a caracterização dos aspectos geológicos e hidrogeológicos no CTR – Caieiras deve ter fundamental importância dentre as etapas que envolvem o projeto de aterro. Sendo realizada com especial detalhamento.

No geral, estes trabalhos foram bem realizados, envolveram diferentes formas de investigação e permitiram a amostragem de grande quantidade de informações sobre a área. Comparando as etapas realizadas com as idealizadas por esse trabalho, boa parte delas foram incluídas. Porém, algumas etapas realizadas de forma errônea podem comprometer todo o resultado dos trabalhos, por exemplo, a interpretação errada dos dados geofísicos, a coleta de dados sobre o nível d'água em épocas diferentes, e seu uso para elaboração dos mapas potenciométricos e de fluxo, e a falta de seções geológicas mais detalhadas.

Contudo, a falta de normas que orientem estes estudos e a não-exigência dos órgãos controladores ambientais torna comum em projetos de aterros de resíduos sólidos a realização de investigações geológicas e hidrogeológicas pouco detalhadas, muitas

vezes insuficientes e gerando interpretações imprecisas. Os responsáveis pelos projetos, porém, devem ter sempre em mente, em primeiro lugar, que é importante que sejam bem definidas as principais características geológicas e hidrogeológicas da área, para poder orientar o projeto segundo as aptidões naturais do local e propiciar a elaboração de um empreendimento ambientalmente mais seguro e mais econômico.

12 Referências Bibliográficas

AMBITERRA TECNOLOGIA DE MEIO AMBIENTE LTDA. – 2000 Centro Tecnológico de Resíduos CTR – Caieiras – Projeto Básico.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – 1984 Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos. São Paulo, ABNT. NBR 8418 (março de 1984)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – 1985 Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. São Paulo, ABNT. NBR 8849 (abril de 1985)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – 1987a Resíduos sólidos – procedimento. São Paulo, ABNT. NBR 10004 (Setembro de 1987)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – 1997 Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. São Paulo, ABNT. NBR 13896 (junho de 1997)

BAGCHI, A. 1994 Design, construction, and monitoring of sanitary landfill. Wiley, New York, 361p.

BARRES, M.; GRENET. Y.; MILLOT, N. & MEISEL, A. 1990 Sanitary Landfilling in France. In: Carra, J.S. & Cossu, R. (edts) International Perspectives on municipal solid wastes and sanitary landfilling. Pg. 78-93.

BERGMANN, M. 1988 Caracterização estratigráfica e estrutural da seqüência vulcano-sedimentar do Grupo São Roque - na região de Pirapora do Bom Jesus - Estado de São Paulo. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 164p.

D'ALMEIDA, M. L. O. & VILHENA, A. 2000 Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. IPT/CEMPRE. São Paulo, 370p.

COMPANHIA AUXILIAR DE VIAÇÃO E OBRAS – CAVO 1999 Centro Tecnológico de Resíduos CTR Caieiras - Relatório Ambiental Preliminar – RAP.

COMPANHIA AUXILIAR DE VIAÇÃO E OBRAS – CAVO 1999 Centro Tecnológico de Resíduos CTR Caieiras – Estudo de Impacto Ambiental - EIA.

CARNEIRO, C. D. R. 1983 Análise estrutural do Grupo São Roque na faixa entre o Pico do Jaraguá e a Serra dos Cristais, SP. Dissertação de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 152p.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL 1998 Proposta de Política Estadual de Resíduos Sólidos. Série Documentos Ambientais. Secretaria do Meio Ambiente – Governo do Estado de São Paulo.

CETESB –COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL 1997 Inventário das Fontes Geradoras de Resíduos Sólidos. Secretaria do Meio Ambiente – Governo do Estado de São Paulo.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL 1993 Resíduos Sólidos Industriais. Secretaria do Meio Ambiente – Governo do Estado de São Paulo.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL 1985 Resíduos Sólidos Industriais. Série Atas n.º 1. Secretaria do Meio Ambiente – Governo do Estado de São Paulo.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL 1981 Apresentação de Projetos de Aterros Industriais. Normalização Técnica P4.240. Secretaria do Meio Ambiente – Governo do Estado de São Paulo.

CUNHA, A. S. 2001 Aspectos geológicos e geotécnicos na implantação de um aterro sanitário, São Paulo, 55p. Monografia de Trabalho de Formatura – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

DÖRHÖFER, G. & SIEBERT, H. 1997 The Search for Landifill Sites – Requirements and Implementation in Lower Saxony, Germany. Environmental Geology 35 (1) July 1998, Springer-Verlag, pp. 55-65.

FEITOSA, F. A. C. 1997 Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Fortaleza, 412p.

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

JULIANI, C. 1993 Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das Serras do Itaberaba e Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2 volumes, 803p.

NASCIMENTO, M. C. B. 2001 Seleção de sítios visando a implantação de aterros sanitários com base em critérios geológicos, geomorfológicos e hidrológicos.

Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 137p.

OLIVEIRA, A. M. S. & BRITO, S. N. A. 1998 Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 586p.

PELOGGIA, A. 1998 O homem e o ambiente geológico: geologia, sociedade e ocupação urbana no município de São Paulo. São Paulo, 271p.

QIAN, X.; KOERNER, R. M. & GRAY, D. H. 2002 Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Prentice Hall. New Jersey, 717p.

RHYNER, C. R. 1995 Waste management and resource recovery. CRC Press. Florida, pg 273-301.

SARA, M. N., 1994 Standard handbook for solid and hazardous waste facility assessments. Lewis Publishers. Florida.

SILVA, P. C. F. 1997 Ambientes de sedimentação e tectônica do Grupo São Roque na região entre Pilar do Sul e Votorantim, SP. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 127p.

TESTA, S. M. 1993 Geological aspects of Hazardous Waste Management. CRC Press. Florida, 537p.

TCHOBANOGLOUS, G. 1993 Integrated Solid Waste Management: Engineering Principals and Management Issues – McGraw Hill – p. 478-479.

TRINDADE, O. S. & FIGUEREDO, M. A. R. 1982 Aterro Sanitário – Aspectos estruturais e ambientais. Pallotti. Porto Alegre, pp. 33 – 36.

USEPA – U. S. ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY 1989 Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure. Center of Envirnment Research Information, Office of Research and Development, Cincinnati, 125p.

USEPA – U. S. ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY 1993 Technical Manual: Solid Waste Disposal Facility Criteria. U. S. Environment Protection Agency, Washington, DC, 93p.

ANEXO I

PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

Principais aplicações dos métodos geofísicos

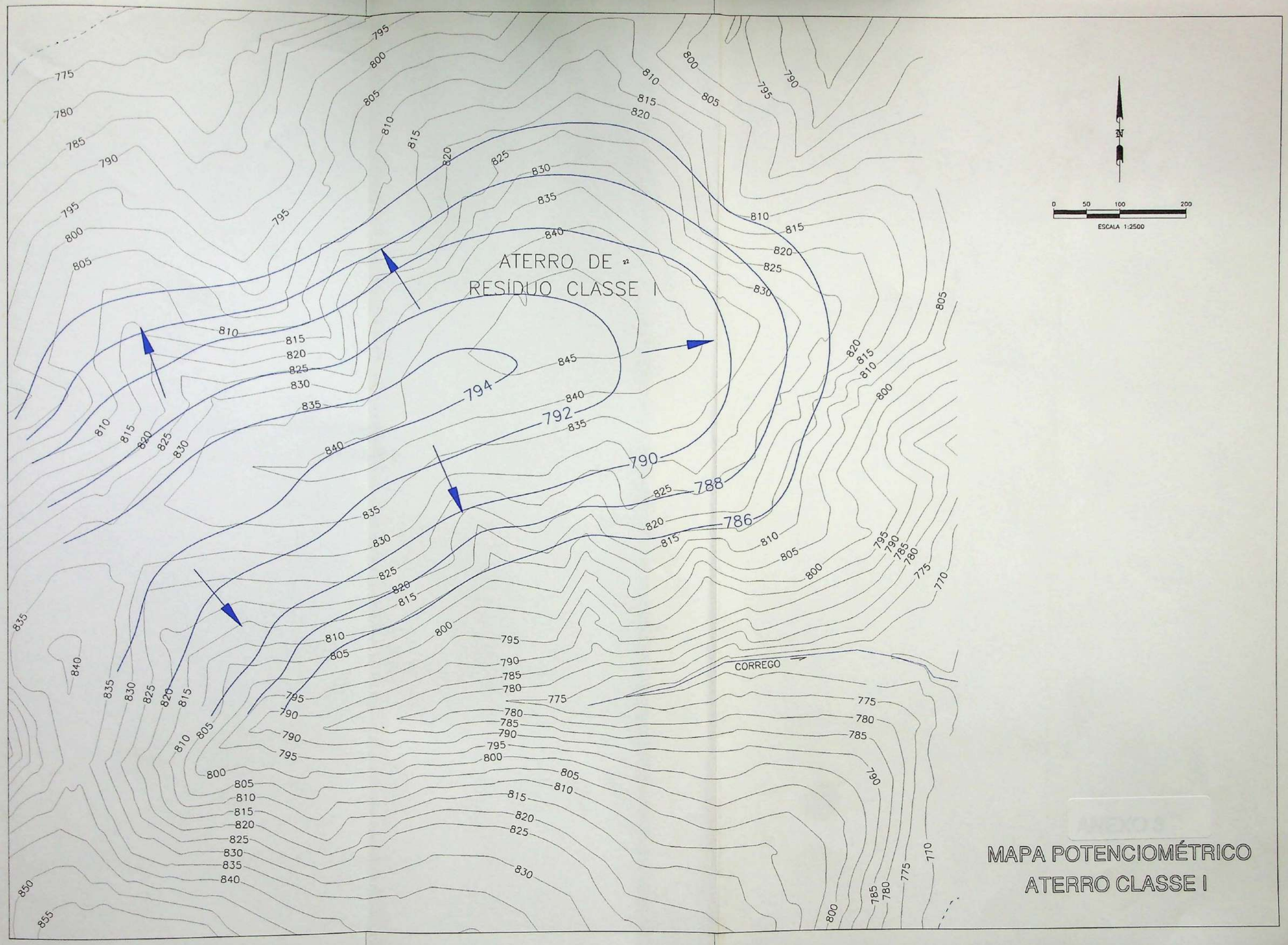
APLICAÇÃO	SISMICA DE REFRAÇÃO	SISMICA DE REFLEXÃO TERRESTRE	PERFILAGEM SISMICA CONTINUA	SONOGRAFIA	CROSS-HOLE	UP/DOWN HOLE	TOMOGRAFIA	SONDAGEM ELETRICA (SEV)	CAMINHAMENTO ELETRICO	RADAR (GPR)	POLARIZAÇÃO INDUZIDA	POTENCIAL ESPONTÂNEO	ELETROMAGNETOMETRIA	GRAVIMETRIA	MAGNETOMETRIA
Análise de escorregamentos	2	2	4	4	0	0	0	0	1	2	0	3	2	0	2
Caracterização de litologias	3	2	2	3	3	3	3	4	3	3	3	2	2	1	1
Cubagem de depósitos minerais	2	2	4	3	0	0	0	2	2	2	3	0	2	0	1
Cubagem de material para escavação	4	3	4	0	0	0	0	3	1	2	0	0	0	0	0
Determinação da densidade de rochas	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
Determinação da direção do fluxo d'água	0	0	0	0	0	0	0	2	3	1	3	4	3	0	0
Determinação da integridade de estruturas e zoneamento de maciços	0	0	0	0	0	0	4	0	1	4	0	0	0	0	0
Determinação da profundidade do topo rochoso	4	3	4	0	2	3	0	4	2	4	2	1	3	2	1
Determinação do nível d'água	3	2	0	0	0	0	0	4	4	3	2	2	3	0	0
Determinação dos módulos elásticos dinâmicos	1	0	0	0	4	3	4	0	0	1	0	0	0	0	0
Detecção de cavidades	1	2	0	0	3	1	3	2	4	3	3	3	3	3	2
Detecção de poluentes	0	0	1	1	0	0	0	0	1	3	2	4	3	0	0
Estratigrafia geológica e geotécnica	4	3	4	0	2	3	4	3	3	4	2	1	2	0	0
Estudos de escarificabilidade de maciços	4	1	1	0	2	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0
Localização de materiais ferromagnéticos em áreas submersas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Localização de depósitos de minerais pesados	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
Localização de objetos enterrados: cabos, dutos etc	1	2	3	3	2	0	0	1	2	4	2	2	3	1	3
Localização de paleocanais	2	3	4	3	0	0	0	1	2	3	1	1	2	1	1
Localização de zonas de falhas	4	2	3	3	1	2	3	2	4	3	3	2	3	1	2
Mapeamento de contatos geológicos	4	2	4	4	3	3	3	4	3	2	2	1	2	1	1
Mapeamento de diques	4	3	3	4	1	1	1	3	4	2	2	1	2	0	4
Prospecção de material de construção	4	3	4	4	1	0	0	2	2	2	1	0	1	0	2
Zona de fraturamentos	3	2	2	3	3	2	4	2	4	3	3	2	4	1	1

0 - não aplicável; 1 - uso restrito ; 2 - usado, porém com algumas limitações; 3 - excelente potencial, com algumas restrições ou aplicação em desenvolvimento; 4 - larga aplicação (bem desenvolvido)

ANEXO II

MAPA POTENCIOMÉTRICO

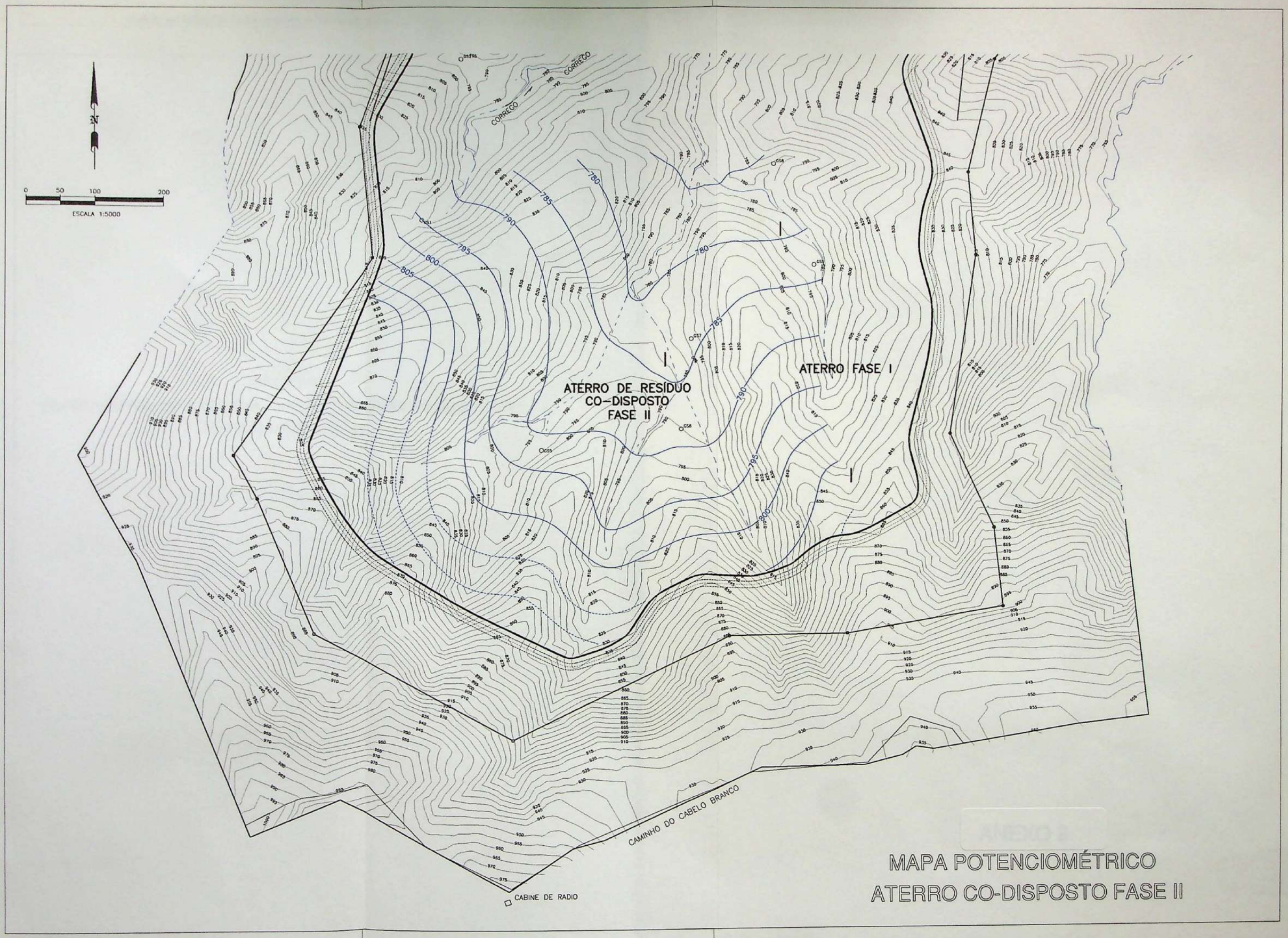
ATERRO CLASSE I


ATERRO DE
RESÍDUO CLASSE I
CORREGO
794
792
790
788
786
N
0 50 100 200
ESCALA 1:2500
MAPA POTENCIOMÉTRICO
ATERRO CLASSE I

ANEXO III

MAPA POTENCIOMÉTRICO

ATERRO CO-DISPOSTO FASE II


N
0 50 100 200
ESCALA 1:5000
CORREGO
CORREGO
ATERRO DE RESÍDUO
CO-DISPOSTO
FASE II
ATERRO FASE I
CAMINHO DO CABELO BRANCO
CABINE DE RADIO
MAPA POTENCIOMÉTRICO
ATERRO CO-DISPOSTO FASE II

ANEXO IV

PLANTA GERAL DA ÁREA E RESUMO DOS DADOS DAS SONDAGENS

SEÇÕES GEOLÓGICAS

SÍNTESE DE DADOS DAS INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS EXECUTADAS NA ÁREA DE INTERVENÇÃO

Sondagem	Coordenadas X	Coordenadas Y	Profundidade	Nível d'Água	Cota Topográfica	Cota Nível D'Água
PM – 208	319040,00	7417978,00	13,00	5,700	792,375	786,675
PM – 209	318990,00	7417936,00	13,00	6,150	792,371	792,221
PM – 210	318845,00	7417979,00	15,00	4,350	796,908	792,608
PM – 208	318915,00	7417906,00	15,50	1,260	798,190	798,820
PM – 209	318878,00	7417844,00	13,00	2,820	776,976	774,156
PM – 210	318796,00	7418017,00	13,25	1,840	791,600	789,710
PM – 211	319100,00	7418011,00	13,00	5,130	784,381	790,213
PM – 212	318800,00	7418008,00				
PM – 213	318830,00	7418005,00				
PM – 214	318910,00	7417938,00				
PM – 215	318864,00	7417906,00				
PM – 301	319313,62	7416380,96	43,00	38,000	830,022	792,022
PM – 302	319088,14	7416530,21			840,718	
PM – 303	318868,61	7416686,88			782,217	
PM – 304	318843,03	7417090,60			779,465	
PM – 305	318804,82	7417325,63			779,209	
PM – 306	318876,53	7417532,42			784,719	
SP – 1	318339,03	7417541,00	3,55	2,690	807,500	804,810
SP – 2	318404,00	7417581,00	7,11	1,620	796,000	794,380
SP – 3	318547,00	7417610,00	2,55	3,880	785,500	781,620
SP – 4	318674,00	7417614,00	5,00	5,840	798,000	792,160
SP – 5	318871,00	7418184,00	10,00	9,000	796,500	787,500
SP – 7	318727,57	7417839,55	7,11			
SP – 8	318603,13	7417882,52	6,30		841,000	
SP – 9	318411,50	7417942,74	5,45			
SP – 10	319080,50	7417842,00	7,33	1,280	882,500	881,220
SP – 11	319201,38	7417880,56	5,30		780,000	
SP – 12	318417,41	7416568,98			807,500	
SP – 12A	318388,14	7416516,38	3,10		814,500	
SP – 13	318863,73	7416447,47	2,60			
SP – 13A	318910,00	7416418,28	2,60			
SP – 14	319277,25	7417811,14	5,77			
SP – 16	318269,00	7416875,00	11,45	4,790	808,500	803,710
SP – 51	318745,00	7417940,00	5,00		835,000	
SP – 52	318600,00	7417940,00	8,18		841,000	
SP – 53	318500,00	7417936,00	7,37		838,000	
SP – 54	318300,00	7417850,00	4,27		826,000	
SP – 55	318000,00	7417720,00	8,32		825,000	
SP – 56	318500,00	7417640,00	8,34		798,000	
SP – 57	318500,00	7417600,00	6,00	0,930	780,000	779,180
SP – 58	318000,00	7417549,00	3,10		810,000	
SP – 59	318800,00	7417610,00	6,34	0,500	770,000	769,500
SP – 60	318800,00	7417570,00	8,31	0,050	764,000	763,950
SP – 61	319100,00	7417500,00	6,20		805,000	
SP – 62	319100,00	7417440,00	5,91	0,790	775,000	774,210
SP – 63	319570,00	7417500,00	5,00		826,000	
SP – 64	319200,00	7417800,00	5,00		800,000	
SP – 65	318400,00	7417300,00	5,45		800,000	
SP – 66	318600,00	7417300,00	5,34		800,000	
SP – 67	318800,00	7417300,00	5,14	2,230	774,000	771,770
SP – 68	319100,00	7417300,00	5,38		810,000	
SP – 69	319100,00	7417400,00	7,34		830,000	
SP – 70	319075,00	7417200,00	6,10	4,680	776,000	771,320
SP – 71	318800,00	7416900,00	5,20		830,000	
SP – 72	318600,00	7416800,00	5,19		820,000	
SP – 73	318700,00	7416900,00	6,35		800,000	
SP – 74	319000,00	7416800,00	5,34		815,000	
SP – 75	319150,00	7416800,00	5,19		825,000	
SP – 76	318800,00	7416700,00	9,35	1,840	795,000	793,160
SP – 77	318500,00	7416600,00	6,03		800,000	
SP – 78	318750,00	7416500,00	10,00	3,000	755,000	752,000
SP – 79	318800,00	7416000,00	4,18	0,530	800,000	799,470
SP – 80	318600,00	7417085,00	7,20		820,000	
SP – 101	318746,00	7418580,00	6,33		789,000	
SP – 102	318840,00	7418500,00	5,20		789,238	
SP – 103	318820,00	7418189,00	11,18	6,790	775,547	768,757
SP – 104	318934,00	7418011,00	13,20	6,170	777,452	765,283
SP – 105	318820,00	7418044,00	9,11	5,100	787,081	782,481
SP – 106	318900,00	7418178,00	4,30		788,144	
SP – 107	318931,00	7417892,00	4,18		806,272	
SP – 108	318950,00	7417900,00	4,13		778,354	
SP – 109	319898,00	7417292,00	4,30	2,780	792,000	789,220
SP – 201	318974,00	7416937,00	10,45	4,860	783,894	779,040
SP – 202	319024,00	7416800,10	10,41	4,700	794,908	779,908
SP – 203	319074,72	7416882,30	10,11	6,780	791,828	784,848
SP – 204	319069,04	7416998,45	8,40			
SP – 204A	319051,20	7416874,98	11,45	5,100	791,828	784,848
SP – 205	319009,96	7416786,98	10,36	5,300	799,143	793,843
SP – 206	319057,99	7416798,70	9,00	3,140	793,253	790,113
SP – 207	319095,10	7416600,18	10,00	3,870	800,363	796,493
SP – 253	318777,04	7417586,92	10,37	4,430	788,868	784,438
SP – 251	318905,02	7417500,80	8,45	4,520	790,400	785,880
SP – 252	318496,94	7417504,87	10,04	4,650	782,600	777,940
SP – 253	318886,37	7417805,75	8,45	4,500	781,052	777,552
SP – 254	318576,46	7417640,13	10,18		781,785	
SP – 255A	318505,84	7417528,04	1,50	2,280	788,505	786,145
SP – 255B	318241,80	7417515,63	13,30	9,890	774,412	764,522
SP – 256	318829,84	7417656,78	10,04		777,141	
SP – 257	318886,71	7417574,55	2,45	6,550	776,108	769,558
SP – 258	318864,81	7417711,08	9,04	7,730	788,483	781,753
SM – 01	319135,03	7417895,03	19,30		781,000	
SM – 02	319135,03	7417885,03	19,30		781,000	
SM – 03	319135,03	7417845,03	19,30		786,000	
SM – 301	318873,03	7418124,03	21,00		826,163	
SM – 302	318873,03	7417882,03	41,00		846,139	
SM – 303	318874,03	7417882,03	16,00		836,069	
SM – 304	318861,03	7417882,03	28,00		838,035	
SM – 305	318851,84	7417869,88	15,50		807,271	
SM – 402	318883,48	7417261,14	18,40		814,584	
SM – 307	318301,06	7416760,60	20,00	22,630	864,000	841,370
SM – 304	318432,44	7416503,20	3,35		842,217	
SM – 305	318203,79	7416204,10	18,00		819,444	
SM – 306	318768,82	7416374,83	43,45	1,400	785,000	783,600
SM – 307	319148,82	7418017,53	6,1		828,138	
SM – 308	318631,81	7417267,96	15,15		788,838	
SM – 309	318894,17	7417501,85	28,40	7,400	771,687	763,687
SM – 401	318929,96	7418815,15	40,00	33,630	821,693	787,063
SM – 402	318930,13	7418815,58	40,00	38,200	821,443	783,243
SM – 403	318680,18	7418580,73	35,05	26,600	854,071	827,471
SM – 501	318608,78	7417884,43	70,00	55,000	847,704	792,704
SM – 502	318417,15	7417810,43	55,72	44,000	840,053	796,153
SM – 503	318307,56	7417784,87	39,83	32,100	818,738	786,638
SM – 504	318127,20	7417686,87	80,12	61,210	811,735	720,615
SM – 505	318114,46	7417689,25	49,00	45,000	808,138	767,138
SM – 506	318513,30	7417898,34	48,01	41,330	835,892	793,082
SL – 31	318588,46	7417888,28	12,15		847,932	
SL – 323	318872,15	7417827,81	25,20	12,330	788,988	776,658
SZ – 01	319221,30	7417737,30		21,400	827,300	805,700
SZ – 02	319600,00	7417610,00		6,000	780,400	774,400
SL – 03	319100,00	7417388,00		14,000	792,800	778,800
SZ – 04	318533,00	7417202,00		18,300	831,800	813,500
SZ – 05	319170,00	7416900,00		13,700	838,700	825,000
SZ – 06	319171,00	7416716,00		15,000	838,400	823,700
SZ – 07	318941,00	7417278,00		5,000	779,200	774,200
SL – 08	318730,00	7417600,00		13,800	777,800	765,000
SZ – 09	318604,00	7416822,00		13,200	829,600	816,400
SL – 10	318536,00	7416715,00		10,900	821,800	811,000
SZ – 11	318570,00	7417074,00		4,600	776,100	771,500
SL – 12	318533,00	7416874,00		5,800	791,200	785,400
SZ – 13	318574,00	7416745,00		1,300	785,400	784,100
SZ – 14	318565,00	7416597,00		17,000	845,100	828,100
SL – 15	318443,00	7416633,00		14,000	828,300	814,300
SZ – 16	318425,43	7416444,90			835,900	
SL – 17	318228,43	7416430,92			891,900	
SZ – 18	318200,00	7416191,00		33,500	858,100	824,600
SL – 19	318118,00	7416114,00		21,300	834,900	813,600
SZ – 20	318149,00	7417149,00		7,200	804,300	797,100
SL – 21	318126,00	7417462,00		17,200	818,100	800,900
SZ – 22	318153,00	7417416,00		17,500	842,100	824,600
SZ – 23	318226,00	7417881,00		19,200	833,100	813,900
SL – 24	318027,00	7417849,00		15,000	840,600	825,600
SZ – 25	318403,00	7417874,00		18,200	840,200	822,000
SL – 26	318400,00	7418005,00		4,800	797,100	792,300
SZ – 27	318426,00	7417181,00		6,000	798,300	792,300
SL – 28	318521,00	7417295,00		9,100	812,900	803,800

LEGENDA:

- 821 — TOPOGRAFIA
- LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA VOLTAGEM
- SP70 — PONTOS DE SONDAGEM SPT COM NÍVEL D'ÁGUA
- SP101 — PONTOS DE SONDAGEM SPT SECO
- SEV06 — PONTOS DE SONDAGEM ELÉTRICA
- SM201 — PONTOS DE SONDAGEM MISTA SECO
- SM201 — PONTOS DE SONDAGEM MISTA COM NÍVEL D'ÁGUA
- PM301 — POÇOS DE MONITORAMENTO
- RUA DE ACESSO
- RUA DE ACESSO FASE I

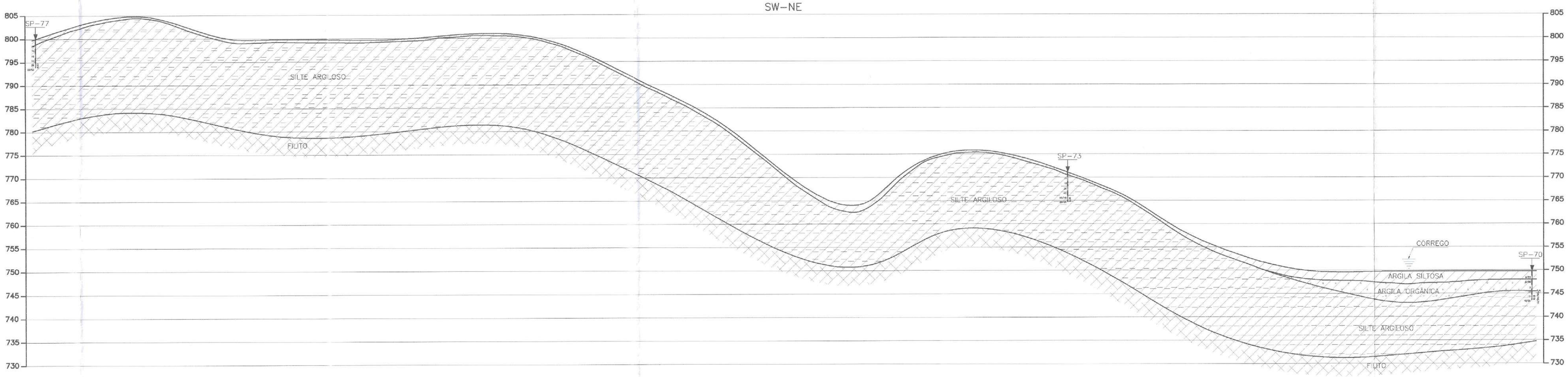
0 50 100 200
ESCALA: 1:4000

PLANTA GERAL DA ÁREA E RESUMO DOS DADOS DE SONDAGEM

SW–NE

SEÇÃO A – A'

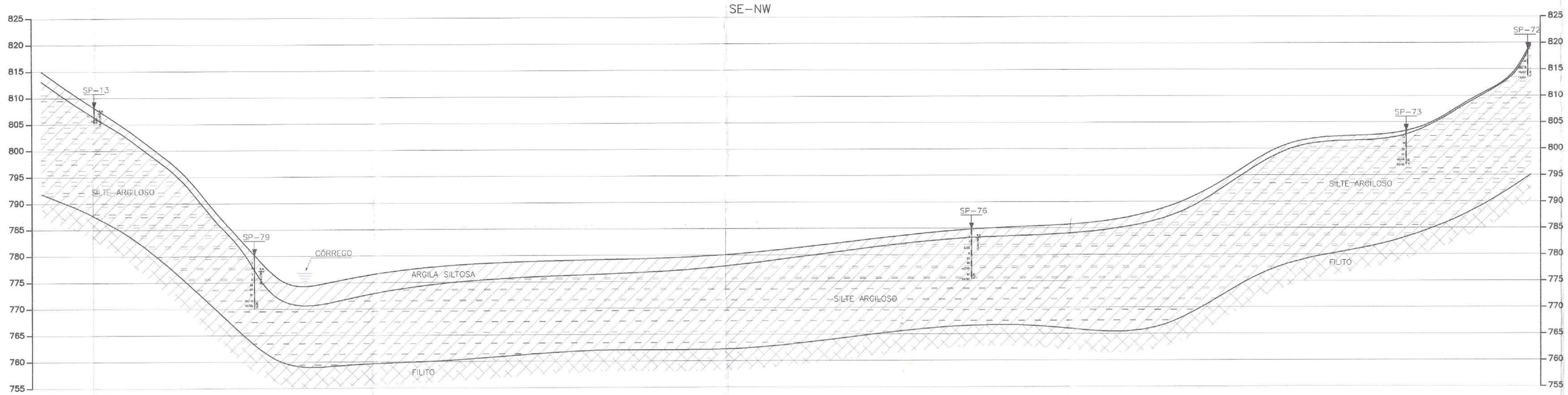
ESC. H=1:1000
V=1:500



SE–NW

SEÇÃO B – B'

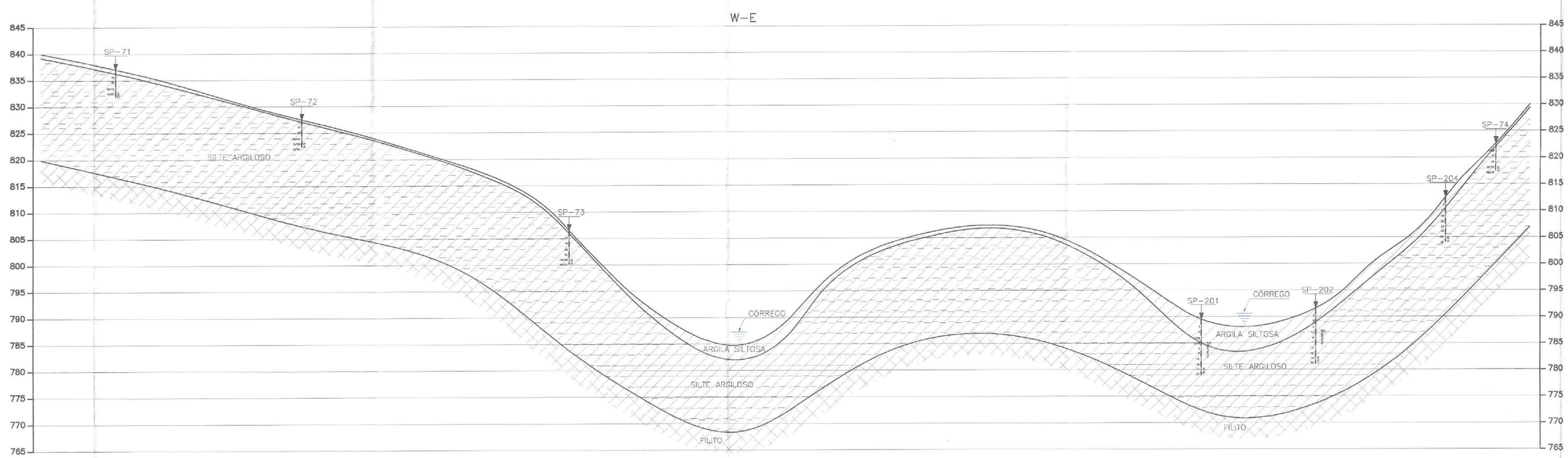
ESC. H=1:1000
V=1:500



W–E

SEÇÃO C – C'

ESC. H=1:1000
V=1:500



SEÇÕES GEOLOGICAS