

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-  
PPGEM

Diagnóstico geológico, hidrogeológico e geotécnico de área de mineração de  
carvão para implantação de um aterro sanitário

Gustavo Antônio Bastiani

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, RS

2007

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-  
PPGEM

Diagnóstico geológico, hidrogeológico e geotécnico de área de mineração de  
carvão para implantação de um aterro sanitário

Gustavo Antônio Bastiani

Trabalho realizado no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da  
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre, RS

2007

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jair Koppe PPGEM

Prof. Dr. Ivo Schneider PPGEM

Prof. Dr. Rubens M. Kautzmann DNPM

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM

A minha querida Vânia e  
meus filhos André e  
Antônio, razões de tudo  
o que faço.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tantos privilégios, que incluem as condições materiais, intelectuais e relações de amizade, fundamentais para a realização desse trabalho.

À todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, meu sincero agradecimento.

Ao professor João Felipe Coimbra Leite Costa pela inspiração, dedicação, e principalmente amizade ao longo desses anos.

Ao colega Zé, pela amizade e incentivo.

Às empresa Sil Soluções Ambientais, Har Engenharia e Meio Ambiente e Copelmi Mineração Ltda por terem permitido a utilização dos dados e pelo apoio na realização dos trabalhos e ao Geólogo Glaucus Ribeiro que participou na elaboração de plantas e desenhos.

## Índice

Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	viii
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
Capítulo 1 .....	1
1 Introdução .....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do Trabalho.....	4
Capítulo 2 .....	6
2 Exemplos de Áreas - Problema e Normas Técnicas .....	6
2.1 Alguns Exemplos de Aterros com Problemas de Contaminação.....	6
2.2 Normas Técnicas Brasileiras para o Diagnóstico do Meio Físico .....	8
Capítulo 3 .....	13
3 Metodologia de Trabalho Utilizada .....	13
Capítulo 4 .....	17
4 Diagnóstico da Área .....	17
4.1 Caracterização Geológica da Área .....	17
4.1.1 Localização da Área .....	17
4.1.2 Geomorfologia .....	18
4.1.3 - Geologia Regional .....	19
4.1.4 - Geologia Local .....	22
4.1.5 - Geologia Estrutural.....	28
4.2 - Caracterização Hidrogeológica da Área .....	29
4.2.1 - Recursos Hídricos Superficiais .....	29
4.2.2- Hidrogeologia Regional .....	30
4.2.3 - Hidrogeologia Local .....	31
4.3 Geotécnica e Caracterização dos Materiais Disponíveis para o Projeto.....	35
4.4 Monitoramento de Água Subterrânea.....	38

Capítulo 5 .....	43
5 Discussão dos Resultados .....	43
5.1 Avaliação Geológica .....	43
5.2 Avaliação Hidrogeologica.....	44
5.3 Geotecnia.....	47
Capítulo 6 .....	50
6 Conclusões, Resultados e Trabalhos Futuros .....	50
6.1 Conclusões e Resultados.....	50
6.2 Trabalhos Futuros .....	51
Referências Bibliográficas .....	53
Anexo A - Ensaios de Permeabilidade.....	53
Anexo B - Análises Granulométricas, Ensaios de Compactação e Ensaios de Deformação .....	53

## Lista de Figuras

Figura 3.1: Ensaio de permeabilidade em cavas tipo Matsuo segundo normas da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1996).....	15
Figura 3.2: Ensaio de permeabilidade em furo de sondagem segundo Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE (1996).....	15
Figura 4.1: Mapa de localização da área da Mina do Recreio.....	
Figura 4.2: Corte de lavra de carvão da Mina do Recreio estudada para implantação de aterro de resíduos.....	
Figura 4.3 :Divisão da Mina do Recreio em blocos.....	
Figura 4.4: Mapa geológico da região do baixo Jacuí com localização da Mina do Recreio. Fonte DNPM, 1989.....	
Figura 4.5: Mapa geológico da área em estudo.....	
Figura 4.6: Perfil estratigráfico médio do sub - bloco Coréia.....	
Figura 4.7: Mapa do bloco Coréia com localização das seções geológicas pré lavra.	
Figura 4.8: Seção geológica longitudinal I.....	
Figura 4.9: Seção geológica longitudinal II.....	
Figura 4.10: Seção geológica transversal III.....	
Figura 4.11: Seção geológica transversal IV.....	
Figura 4.12: Seção geológica pós-lavra.....	



Figura 4.13: Talude natural no limite norte da área estudada mostrando as Formações Rio Bonito na base (cinza) e Palermo no topo (amarela).....	
Figura 4.14: Depósito de bota-fora presente no limite sul da área de estudo.....	
Figura 4.15: Mapa hidrogeológico da região em estudo.....	
Figura 4.16: Siltitos da formação Rio Bonito que configuram aquíferos e aquícludes.....	
Figura 4.17: Detalhe dos arenitos da formação Palermo.....	
Figura 4.18: Seção esquemática - sistema de aquíferos.....??	
Figura 4.19: Argila vermelha caracterizada para utilização na impermeabilização do aterro sanitário.....??	
Figura 4.20: Argila amarela caracterizada para impermeabilização do depósito.....??	
Figura 4.21: Piezômetro PZ-1P.....??	
Figura 4.22: Piezômetro PZ-3P.....??	
Figura 4.23: Piezômetro PZ 1A e PZ-3A.....??	
Figura 4.24: Piezômetro PZ 05, PZ 06 e PZ 07.....??	
Figura 4.25: Piezômetro PZ 08.....??	
Figura 4.26: Equipamento para implantação de piezômetros com tubulação para ensaios de permeabilidade em furo de sondagem.....??	
Figura 4.27: Piezômetros de monitoramento.....??	
Figura 4.28: Mapa com a localização dos piezômetros e ensaios de permeabilidade....??	

Figura 5.1: Paraconglomerado presente no fundo da cava de lavra avaliada.....??

## Lista de Tabelas

Tabela 5.1: Ensaio de Permeabilidade nos piezômetros profundos.....??

Tabela 5.2: Ensaio de Permeabilidade no fundo da cava.....??

Tabela 5.3: Ensaio de laboratório das argilas presentes na mina do Recreio.....??

## Resumo

O presente trabalho aborda o problema da contaminação do meio físico causado pela disposição de resíduos sólidos urbanos em áreas inadequadas. Para tal, são discutidos diversos casos de problemas existentes no mundo que impactaram principalmente o solo e o lençol freático. Aborda, também, a metodologia e normas técnicas existentes para o correto diagnóstico de áreas para essa finalidade. Sob esse prisma, são apresentadas todas as atividades técnicas desenvolvidas para o diagnóstico das condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas de uma área de lavra de carvão mineral a céu aberto situada no município de Minas do Leão - RS visando a implantação, na mesma, de um aterro de resíduos sólidos urbanos. A metodologia adotada para o presente estudo constou basicamente da execução e descrição dos perfis de sondagens rotativas e percussivas amostradas, mapeamento das litologias e do lençol freático, testes de permeabilidade no terreno, e ensaios físicos de laboratório em amostras coletadas na área. As conclusões obtidas, a partir da caracterização da área e região de estudos, permitiram o licenciamento da área estudada para a implantação de um aterro de resíduos sólidos urbanos, além de demonstrar as vantagens da utilização de áreas de mineração para a implantação de depósitos de resíduos sob o ponto de vista ambiental. São apresentadas, também, considerações técnicas sobre a possibilidade de utilização de outras áreas de mineração de carvão no RS para a implantação de aterros de resíduos como forma de aproveitar locais já impactados pela atividade evitando, dessa forma, a degradação de novas áreas.

## Abstract

This study presents the problems associated with environmental contamination due to improper land fill constructions and domestic waste deposition. For that purpose various case studies around the world are presented and discussed showing the contamination problems in soil and underground water. The study also proposes a methodology following the regulatory standards for characterizing the site where a land fill is planned to be installed. All the steps used for geological, hidrogeological and geotechnical evaluation used in this diagnosis are presented. The site evaluated is located at mined out area where previously open cast coal mining took place in Minas do Leão county, RS, Brasil. The methodology used basically consisted of drilling and logging the cores obtained from diamond drill holes and percussion drilling (chip samples), geological and hidrogeological mapping, in situ permeability tests and geotechnical lab tests. The results from the various tests allow concluding the area is adequate to host the land fill added to the fact the region was previously environmentally impacted by coal mining. The study also proposes some technical issues to be considered when evaluating sites for new land fills planned to be installed at other coal mined out sites within RS state.

# Capítulo 1

## 1 Introdução

A disposição de resíduos urbanos, também denominados de lixo doméstico, constitui-se num dos maiores problemas ambientais da civilização atual. Com o desenvolvimento da medicina e a melhoria nas condições de saneamento básico, os índices de mortalidade infantil e a expectativa de vida melhoraram consideravelmente nos últimos 40 anos, tendo, população mundial, chegado a 6,8 bilhões de pessoas em 2006 (IBGE 2.006).

O crescimento acelerado e desordenado da população mundial aumentou consideravelmente o uso das reservas do planeta para a produção de bens de consumo, gerando, também, uma quantidade excessiva de lixo, com conseqüências graves para o meio ambiente. A poluição causada pelos resíduos orgânicos em decomposição nos lixões pode contaminar os solos, o ar e as águas superficiais e subterrâneas, alterando suas características físicas, químicas e biológicas, colocando em risco a vida dos seres humanos pela possibilidade de surgimento de doenças como cólera, tifo, leptospirose, pólio, hepatite, diarreia, entre outras (Lima, 1995).

A preocupação com a disposição de lixo urbano é histórica. Existem evidências de que os resíduos domésticos e agrícolas eram enterrados em trincheiras na Mesopotâmia para a produção de fertilizante orgânico, utilizado na cultura de cereais, 2.500 anos antes de Cristo. Os romanos, preocupados com a grande quantidade de roedores e insetos nos locais de depósito de lixo, abriam valas para aterrar os resíduos (Campinas, 1996). Durante a idade Média, a peste bubônica matou mais de 20 milhões de pessoas na Europa e, desde então, técnicas

mais confiáveis de manejo dos resíduos foram desenvolvidas até surgir o que conhecemos hoje por aterro sanitário.

Segundo Luz (1981) in Lima (1995), os aterros sanitários são aqueles executados conforme critérios e normas de engenharia e atendem aos padrões de segurança preestabelecidos, permitindo uma confinamento segura em termos de controle da poluição ambiental e proteção ao meio ambiente. Segundo NBR 10703/89 aterro sanitário é a “forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, pelo confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Segundo a NBR 8419 resíduos sólidos urbanos são aqueles gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos.

Além desse tipo de aterro, existem os aterros controlados cuja diferença básica é a inexistência nesses de impermeabilização de fundo o que compromete a qualidade das águas subterrâneas, além de não existir tratamento de chorume. Este último é definido, segundo NBR 9896/93, como o “resíduo líquido proveniente da decomposição de resíduos sólidos (lixo) particularmente quando dispostos no solo, como, por exemplo, nos aterros sanitários. Resulta principalmente da água da chuva que infiltra e da digestão biológica da parte orgânica dos resíduos sólidos. O chorume apresenta elevado potencial poluidor e tem como característica a cor negra e o mau cheiro.

Dados do Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos realizado em 2006 em 25 estados brasileiros e o Distrito Federal que correspondem a 38% da população brasileira, constataram que os resíduos sólidos urbanos produzidos nos municípios brasileiros são destinados a lixões e aterros sanitários (36%). Em 49% desses depósitos não há impermeabilização do solo e em 11% o lixo fica descoberto.

Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo IBGE em 2005, do total de resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil (cerca de 157.000 toneladas/dia) 47% são destinados a aterros sanitários, 23,% para aterros controlados e 30% para lixões. A mesma pesquisa aponta que, do total de municípios brasileiros onde há coleta de lixo, 59% fazem a disposição final em

lixões, 13% em aterros sanitários, 17% em aterros controlados, 0,6% em áreas alagadas, 0,3% em áreas especiais e 2,8% tem programas de reciclagem.

A disposição dos resíduos urbanos em aterros construídos dentro das normas técnicas, que minimizam os impactos ambientais, esbarra nos problemas de custos de implantação e gerenciamento, fazendo com que a maioria dos municípios destine seus resíduos para aterros clandestinos, também denominados “lixões”. Além das questões econômicas, devem ser analisadas as condições naturais das áreas e sua vulnerabilidade para a implantação de aterros controlados. As questões hidrogeológicas relativas à presença de aquíferos sem proteções naturais, drenagens com ecossistemas frágeis, a pressão das populações contra a implantação desses depósitos e alto custo de áreas próximas aos núcleos urbanos são também fatores adversos à construção de aterros dentro das normas legais.

As exigências legais estabelecidas como normas técnicas tem evoluído à medida que a proteção dos meios naturais, principalmente aquíferos, tem sido uma preocupação cada vez maior de ambientalistas, técnicos e legisladores.

Dentro deste cenário de dificuldades ambientais e sócio-econômicas para a solução do problema da disposição de lixo doméstico, essa dissertação propõe uma metodologia para investigar os aspectos do meio físico relevantes para viabilizar uma área minerada para receber resíduos domésticos.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são verificar a adequabilidade de uma área de mineração de carvão a céu aberto para receber um aterro sanitário, seguindo as normas técnicas que dispõe sobre este tipo de diagnóstico, fornecendo subsídios para que outras áreas afetadas por atividades de mineração de carvão sejam passíveis de estudos para tal finalidade. A área foi inicialmente estudada para a recepção de resíduos sólidos urbanos, contemplando, também, uma estação de tratamento de efluentes. Os aspectos abordados referem-se especificamente aos seguintes propósitos:



- Diagnosticar as condições geológicas da área em termos de tipos litológicos, homogeneidade e condições tectônicas;
- Diagnosticar o comportamento hidrogeológico dos maciços envolvidos na área prevista para a implantação do aterro, bem como a posição e dinâmica do lençol freático;
- Caracterizar os materiais disponíveis na área estudada para as obras de implantação do aterro.

Para tal propósito, são apresentadas todas as etapas de estudo, documentadas por plantas, planilhas de campo e laboratório, bem como fotos ilustrativas dos trabalhos e condições naturais da área para demonstrar a aptidão da mesma ao projeto pretendido em conformidade com a legislação e normas técnicas vigentes.

A avaliação dos resultados do diagnóstico geológico, hidrogeológico e geotécnico realizado na área de implantação do aterro apresenta os dados levantados em campo e laboratório em relação às exigências normativas e legais para o diagnóstico da área. Não são consideradas as obras relativas à impermeabilização da área e os elementos construtivos do aterro e sim suas condições naturais para suportar o depósito sem afetar os meios envolvidos e as características dos materiais disponíveis na Mina do Recreio para a implantação da obra.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho possui a seguinte estrutura:

- Capítulo 1 - Apresenta a problemática da disposição de lixo urbano ao longo da história, o panorama brasileiro nessa questão, alguns conceitos básicos sobre depósitos de resíduos sólidos urbanos, os objetivos do trabalho e a estrutura do mesmo.

- Capítulo 2 - Apresenta alguns casos de problemas ambientais causados pela falta de estudos em áreas de aterros, além das normas técnicas existentes no Brasil que regulamentam a execução de diagnósticos e as características exigidas para a aprovação de locais para implantação de aterros. Nesse capítulo, é demonstrada, também a metodologia de trabalho utilizada para elaborar o diagnóstico;

- Capítulo 3 - Descreve a metodologia de trabalho utilizada para o diagnóstico da área;

- Capítulo 4 - Apresenta as condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas verificadas a partir dos estudos, da área de mineração de carvão destinada à implantação do aterro de resíduos sólidos urbanos, além da rede de monitoramento de água subterrânea implantada;

- Capítulo 5 - Apresenta a discussão dos resultados obtidos no estudo em relação aos objetivos propostos;

- Capítulo 6 - Apresenta as conclusões sobre os objetivos e sobre a adequabilidade da área, incluindo a discussão sobre as vantagens e limitações da utilização de área de mineração de carvão para a implantação de aterros de resíduos.

- Figuras - São apresentados mapas, desenhos e fotos resultantes dos trabalhos de investigação desenvolvidos;

- Anexos - Apresentam os ensaios de campo relativos à permeabilidade do terreno, e de laboratório que caracterizam os materiais a serem utilizados na implantação do aterro.

## Capítulo 2

### 2 Exemplos de Áreas - Problema e Normas Técnicas

Serão abordados, nesse capítulo, alguns casos de problemas ambientais relatados na bibliografia gerados por aterros de resíduos sólidos urbanos construídos em áreas vulneráveis e o impacto gerado principalmente ao substrato, águas subterrâneas e superficiais.

A partir desses exemplos, são colocadas as normas orientativas obedecidas para a elaboração do presente diagnóstico, aplicadas de forma a evitar tais impactos, bem como toda a metodologia utilizada para obtenção dos dados de campo e laboratório de forma a atingir os objetivos propostos.

#### 2.1 Alguns Exemplos de Aterros com Problemas de Contaminação

A bibliografia apresenta vários casos de aterros de resíduos sólidos urbanos construídos sem diagnóstico em áreas vulneráveis, causando sérios danos ao meio físico, especialmente nas águas subterrâneas. Alguns casos são apresentados a seguir.

Pereira e Rimoldi (2003) relatam a situação dos depósitos de lixo e resíduos industriais da grande Buenos Aires. Nessa cidade, com aproximadamente  $13 \times 10^6$  habitantes, há problemas generalizados de disposição de lixo urbano e resíduos industriais sobre solos expansivos e permeáveis com lençol freático raso, onde 40%

da população é servida por água obtida por poços perfurados em aquífero com profundidade da ordem de 40 m hoje contaminado. A partir dessa política desordenada, em 1978, foi criada uma organização para gerenciar a disposição de resíduos urbanos. Os locais definidos para a disposição não foram corretamente diagnosticados, sendo que a geologia e hidrogeologia da área, especialmente a profundidade do lençol freático, permeabilidade dos solos, presença de argilas expansivas e a abrangência do cone de rebaixamento dos poços em operação não apresentam condições naturais adequadas para suportar o depósito. O diagnóstico imperfeito das áreas de depósito tem como consequência o progresso da contaminação, já verificada na região do aterro.

Ekpo et al. (2000) relatam as características geológicas e hidrogeológicas de áreas de disposição de resíduos na Nigéria, onde em algumas regiões desse país, a disposição de lixo urbano acontecia ao longo de rodovias. Áreas destinadas a depósitos são constituídas por substratos arenosos com permeabilidades da ordem de  $1 \times 10^{-1}$  cm/s. O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas das regiões em torno dos depósitos, considerando pH, condutividade, teores de fosfatos, nitratos, nitritos dentre outros elementos, demonstraram que há contaminação dessas águas por chorume.

Outra avaliação realizada por Despina et al. (1999) aborda o impacto causado por depósitos de resíduos urbanos em áreas compostas por calcários Jurássicos e Triássicos sem a utilização de impermeabilização de fundo nem drenagem de chorume. Nesses locais, a coleta de amostras de água subterrânea indica pesada carga orgânica com parâmetros que indicam contaminação do aquífero local devido à alta permeabilidade do substrato da ordem de 8 a 10 metros por dia.

Israde-Alcantara et al. (2005) apresentam problemas de contaminação causados por um depósito na região centro-oeste do México. Esse aterro foi construído sobre um substrato rochoso basáltico fraturado e com falhamentos. A análise da água subterrânea demonstrou elevada contaminação por chorume. Segundo esse artigo, no México, 90% dos aterros sanitários não possuem qualquer controle, nem foram construídos com diagnóstico prévio. A permeabilidade dos estratos, em alguns casos é agravada por falhamentos e abalos sísmicos.

A realidade da disposição de resíduos urbanos no Brasil e mesmo no RS também demonstra a dificuldade de gestão desse problema haja vista a grande quantidade de lixões clandestinos existentes.

Em Porto Alegre - RS, a construção de um aterro de resíduos sólidos urbanos sobre rochas do embasamento cristalino próxima à drenagens causou problemas de contaminação ao manancial. Essa informação foi obtida em visita técnica à área pelo autor em 1998. (verificar com Ivo trabalho da ABES.)

## **2.2 Normas Técnicas Brasileiras para o Diagnóstico do Meio Físico**

As normas técnicas que definem as exigências para a construção de aterros variam em cada país, e tem evoluído à medida que a preocupação com os impactos ambientais aumentam, restringindo, cada vez mais, as áreas passíveis de licenciamento ambiental para tal finalidade. Um exemplo dessa evolução é demonstrado pelos critérios observados na definição de locais para aterros de resíduos em Londres no século XVII, onde a única preocupação era de que a área não poderia ser invadida por águas do mar. Para tal, foram eleitas três montanhas no entorno da cidade que atendiam plenamente à única exigência técnica.

Se verificarmos as exigências contidas nas normas técnicas brasileiras em comparação, por exemplo, com as vigentes no estado do Novo México constantes no “State of New México Solid Waste Landfill Regulations” (1996), verifica-se as mesmas preocupações no que diz respeito à proteção de aquíferos, distâncias drenagens e em áreas não sujeitas a inundações. Acrescem-se alguns aspectos não constantes nas normas brasileiras, explicitando a proibição de aterros em áreas de mineração subterrânea, sujeitas a terremotos, estabelecendo também distância mínima de 300 metros de poços de bombeamento com vazão de 380 litros por minuto ou mais.

O diagnóstico geológico e hidrogeológico de áreas para a implantação de aterros sanitários no Brasil, bem como em qualquer país do mundo, deve ser feito com a observância de normas técnicas estabelecidas pelos órgãos técnicos e reguladores da disposição de resíduos. No caso do Brasil as exigências são definidas

pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e sua aplicação e fiscalização é feita pelos órgãos ambientais. Além das normas da ABNT, existem orientações criadas pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo, CETESB, que se consagraram ao longo do tempo e que também estabeleceram diretrizes para o diagnóstico do meio geológico.

Além do estabelecido nas normas técnicas, em cada área, face às suas particularidades, são feitas adaptações e complementações às exigências normatizadas. Essas inovações vão, ao longo do tempo, fornecendo subsídios para o aprimoramento das normas existentes num processo evolutivo natural.

As normas brasileiras observadas para a elaboração do presente diagnóstico foram NBR 8419 (Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos, 1995) NBR 13896 (Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação, 1997) e NBR 13895 (Construção de poços de monitoramento e amostragem, 1997).

Das normas citadas são abordados, a seguir, alguns aspectos fundamentais ao diagnóstico realizado, bem como à implantação da rede de monitoramento de água subterrânea.

- NBR8419 (Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos) - Esta norma fixa as condições mínimas exigíveis para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

- Caracterização geológica, hidrogeológica e geotécnica - Deve ser apresentada investigação geológica e geotécnica do terreno envolvido no aterro sanitário, que contribua objetivamente para a avaliação dos riscos de poluição das águas e das condições de estabilidade dos maciços.

Essas informações referentes à geologia, natureza dos solos e da água subterrânea são assim relacionados: a litologia, as estruturas, o perfil, a espessura do solo, sua granulometria, sua homogeneidade e permeabilidade, posição e dinâmica do lençol freático, qualidade e importância econômica das águas subterrâneas, importância do terreno em termos de recarga de água subterrânea, os riscos de ruptura ou erosão acentuada do terreno de fundação e/ou dos terrenos adjacentes.

Os métodos de investigação devem se valer das técnicas correntes em geologia de engenharia como: inspeção de reconhecimento, mapeamento detalhado de superfície, execução de sondagens diretas (poços, trincheiras, sondagens a trado, a percussão, rotativa) e indireta (métodos geofísicos), ensaios “in situ” (resistência à penetração, infiltração) e laboratoriais (granulometria e resistência à compressão).

A investigação e apresentação dos resultados devem ser feitas por profissional legalmente habilitado.

- NBR13896 (Aterros de Resíduos não perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação) - Essa norma fixa as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas. Seus aspectos fundamentais são apresentados a seguir:

- Localização: Um local para ser utilizado para aterros de resíduos não perigosos deve ser tal que o impacto ambiental a ser causado pela instalação do aterro seja minimizado, sem causar problemas às populações da região e de acordo com o zoneamento da região. Seu prazo de utilização deve ser longo e sua implantação rápida. A distância do limite da área útil do aterro a núcleos populacionais, recomendando-se que esta distância seja superior a 500m.

- Características físicas da área: Topografia adequada, evitando-se área com grande inclinação natural (< 30 %).

A geologia e tipos de solos existentes devem ser caracterizados para determinação da capacidade de depuração do solo e da velocidade de infiltração. Considera-se desejável a existência, no local, de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-6}$  cm/s e uma zona não saturada com espessura superior a 3,0m.

Com relação às águas, deve ser avaliada a possível influência do aterro na qualidade e no uso das águas superficiais e subterrâneas próximas. O aterro deve ser localizado a uma distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso d'água e o depósito não deve ser implantado em áreas sujeitas a inundações.

Como forma de evitar a contaminação da água subterrânea entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático deve haver uma camada natural de espessura mínima de 1,50 m de solo insaturado. O nível do lençol freático deve ser medido durante a época de maior precipitação pluviométrica da região. O aterro deve ser executado em áreas onde haja predominância no subsolo de material com coeficiente de permeabilidade inferior a  $5 \times 10^{-5}$  cm/s. Deve ser projetado um sistema de impermeabilização do aterro, drenagem e tratamento do líquido percolado.

Com relação às características dos materiais a serem utilizados como camadas de impermeabilização, os mesmos devem ter propriedades químicas compatíveis com o resíduo, com suficiente espessura e resistência de modo a evitar rupturas devido a pressões hidrostáticas e hidrogeológicas. Essas camadas devem ser colocadas sobre uma base ou fundação capaz de suportá-la, bem como resistir aos gradientes de pressão acima e abaixo da impermeabilização, de forma a evitar sua ruptura por assentamento, compressão ou levantamento do aterro. Essas camadas devem ser instaladas de forma a cobrir toda a área de modo que o resíduo ou o líquido percolado não entre em contato com o solo natural.

NBR13895/ Jun/97 Construção de poços de monitoramento e amostragem - Esta norma fixa as condições exigíveis para construção de poços de monitoramento de aquífero freático e dados mínimos para apresentação de projetos de redes de monitoramento. Os aspectos mais importantes contidos na norma referem-se ao seguinte:

- Os poços devem ser posicionados de forma a permitir a definição do sentido do fluxo do lençol freático, permitindo a determinar o gradiente de escoamento da água subterrânea;
- Devem ser posicionados na área de interesse pelo menos 03 poços de monitoramento a jusante do empreendimento e 01 a montante, sendo sempre considerado o sentido de fluxo da água subterrânea;
- Deve ser feita a descrição do perfil geológico e hidrogeológico de cada piezômetro, bem como a classificação das unidades perfuradas em termos de comportamento hidrogeológico.



- Deve ser construído um mapa piezométrico da área envolvida e entorno definindo os aquíferos presentes, a profundidade e dinâmica do lençol freático da região; Esse mapa deve conter a locação dos piezômetros, bem como sua referência topográfica;

- Os parâmetros da água subterrânea a serem analisados devem ser pré-estabelecidos de forma a permitir a avaliação dos mesmos após a implantação do empreendimento;

Para a construção dos poços de monitoramento devem ser observados alguns procedimentos, relacionados a seguir:

- A perfuração dos poços deve ser feita num diâmetro mínimo de 200 mm, evitando-se a utilização de fluidos de perfuração e o processo deve ser supervisionado por profissional habilitado, com elaboração de relatório de execução;

- Devem ser utilizados materiais normatizados para a completação (revestimento, cimentação, etc) do poço;

- O poço, após o término da execução, deve ser esgotado sucessivas vezes até que sejam eliminados todos os resíduos de perfuração.

Com respeito à legislação que trata da disposição de resíduos sólidos urbanos, a mesma é bastante genérica, valendo-se, sempre das normas técnicas. Um exemplo é a Lei 9.921 de 27/07/93 do estado do RS cujo artigo 5 diz: “Quando a destinação final de resíduos for no solo, deverão ser tomadas medidas adequadas para a proteção de águas superficiais e subterrâneas, obedecendo aos critérios e normas estabelecidas pelo órgão ambiental do estado”. Outro exemplo do estado do Ceará em sua lei 13.103 de 24/01/01 artigo 12 diz: “Solo e subsolo somente poderão ser utilizados para armazenamento, acumulação ou disposição final de resíduos sólidos de qualquer natureza desde que sua disposição seja feita de forma tecnicamente adequada, definida em projetos específicos, obedecidas as condições e critérios estabelecidos por ocasião do licenciamento pelo órgão ambiental estadual.

## Capítulo 3

### 3 Metodologia de Trabalho Utilizada

O emprego da metodologia correta para o diagnóstico do meio físico é imprescindível para a escolha de áreas de implantação de aterros de resíduos. No presente estudo, é feita a caracterização das litologias presentes numa área prevista para implantação de um aterro de resíduos sólidos urbanos em termos de estabilidade geotécnica de taludes, permeabilidade natural dos maciços, com cálculo do período de retenção natural, além dos aquíferos presentes, mapeando sua profundidade, direção de fluxo da água subterrânea, vulnerabilidade e importância dos mesmos no abastecimento das populações da região. São identificadas as drenagens presentes com suas respectivas bacias de captação e sua posição em relação à área-alvo.

Para tal finalidade a metodologia utilizada, consistiu de consulta bibliográfica e a execução de ensaios de campo e laboratório objetivando verificar se as condições naturais da área possibilitariam a implantação do aterro. A metodologia de estudo para cada item de interesse foi a seguinte.

- Caracterização Geológica: A bibliografia consultada auxiliou na caracterização da Geologia da região de estudo a partir de mapas e publicações com definição das unidades estratigráficas presentes, suas respectivas litologias e ambientes geológicos. Além de trabalhos publicados foram utilizados dados de pesquisa dos arquivos da empresa Copelmi Mineração Ltda. que compreendem mais de 1000 (mil) sondagens amostradas com perfilagem geofísica executadas ao longo da história da empresa na região denominada “Grande Butiá”. Essas informações foram fundamentais para a

correlação estratigráfica e para o conhecimento em detalhe de todos os estratos envolvidos, bem como de todas as variações faciológicas do pacote sedimentar onde foi estabelecido o projeto. A avaliação dos depósitos de bota-fora foi feita por sondagens percussivas tipo Standard Penetration Test (SPT).

- **Caracterização Hidrogeológica:** A avaliação hidrogeológica foi feita mediante consulta bibliográfica que possibilitou o conhecimento hidrogeológico das diversas formações presentes na região com dados gerais sobre a dinâmica da água subterrânea nessas unidades. A hidrogeologia específica da área e entorno foi estabelecida por ensaios de permeabilidade de campo e implantação de poços de monitoramento, procedimentos que avaliaram a posição do lençol freático e sua dinâmica local, governada pela permeabilidade natural dos estratos. Os ensaios de permeabilidade foram executados em furos de sondagem segundo normas publicadas no Boletim número 4 de 1996 - Ensaios de Permeabilidades em solo - Orientações para sua execução no campo da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1996). Foram também executados ensaios em cavas (Tipo Matsuo) quando o objetivo foi definir a permeabilidade de horizontes superficiais. Na Figura 3.1 apresenta-se a execução de um ensaio em cava tipo Matsuo o qual consiste na escavação de uma cava no local do ensaio com geometria e dimensões definidas a qual é cheia com água previamente até a saturação do solo. Após passa-se a monitorar o volume infiltrado por tempo, cujos valores são lançados em planilha constante no boletim da ABGE já citado, onde existe uma fórmula para o cálculo da permeabilidade do material ensaiado. Na Figura 3.2 é mostrada a execução de um ensaio de permeabilidade em furo de sonda segundo normas da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1996). Nesse ensaio é feito um furo no local, o qual é posteriormente revestido até o topo do trecho a ser ensaiado. Após é feita a saturação prévia do terreno, passando-se a medir o volume de infiltração por unidade de tempo. Esses valores, lançados em

planilha própria, mais valores relativos à geometria do ensaio, são usados em fórmula que define a permeabilidade do intervalo ensaiado.



Figura 3.1: Ensaio de permeabilidade em cavas tipo Matsuo segundo normas da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1996).



Figura 3.2: Ensaio de permeabilidade executado em furo de sondagem segundo padrões da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE (1996).

- Caracterização Geotécnica: Os ensaios geotécnicos dos diversos materiais disponíveis na Mina do Recreio possibilitaram eleger aqueles aptos a serem utilizados como camadas de impermeabilização. Essa escolha foi consequência de ensaios de laboratório que caracterizaram os materiais e estabeleceram a metodologia de trabalho a ser empregada na execução da obra, de forma a atingir-se os parâmetros físicos definidos nas normas técnicas. Assim foram definidos os limites de Atterberg, granulometria, permeabilidade normal e compactada e os parâmetros de compactação. A estabilidade de taludes do entorno da cava para prevenir escorregamentos para o interior do futuro depósito de resíduos não foi objeto de investigação, adotando-se valores históricos da mineração de carvão. A composição dos materiais de empréstimo, principalmente argilas já havia sido feita em trabalhos anteriores (CORREA, KCR 2.000) por meio de difratometria de raio X com o objetivo principal de verificar a presença de tipos expansivos que pudessem alterar seu comportamento ao longo do desenvolvimento da obra. Além desses foram feitos ensaios de limites de Atterberg, permeabilidade compactada em laboratório, e ensaios de compactação.

## Capítulo 4

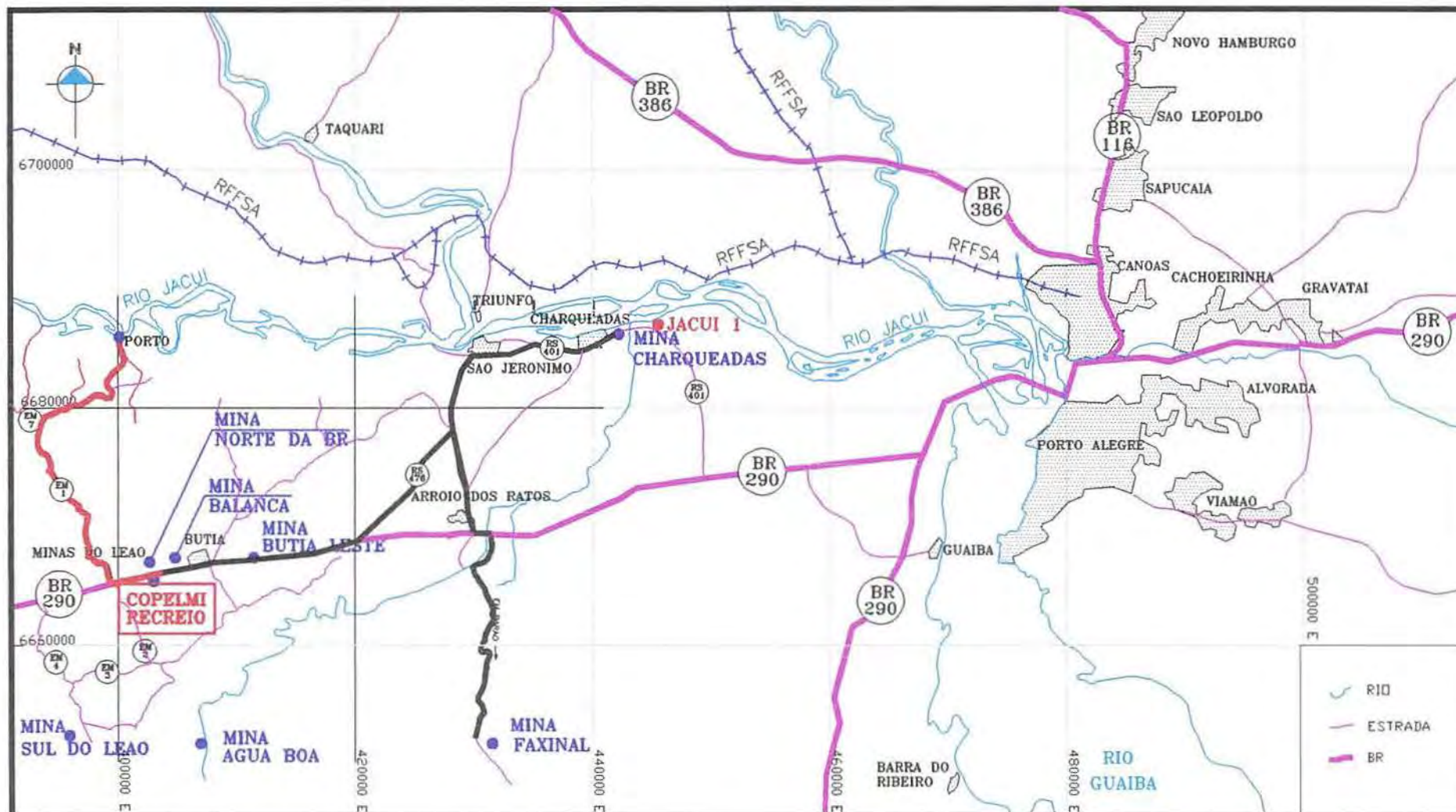
### 4 Diagnóstico da Área

Serão apresentados, nesse capítulo, os dados obtidos nos estudos efetuados de forma a caracterizar o meio físico da área envolvida no projeto.

#### 4.1 Caracterização Geológica da Área

##### 4.1.1 Localização da Área

A área definida para a implantação do empreendimento pertence à empresa Copelmi Mineração Ltda e está localizada nos municípios de Minas do Leão e Butiá - RS, distando 86 km de Porto Alegre. Consiste numa mina de carvão mineral a céu aberto onde o processo de lavra é executado em tiras paralelas (*strip minning*). Por esse método, quando da execução do corte final em um bloco de lavra, a cava permanece aberta, resultando num grande espaço modificado pela lavra do carvão. Apresenta-se, na Figura 4.1, a seguir, um mapa de localização da área da Mina do Recreio e na Figura 4.2 uma fotografia panorâmica da área estudada para a implantação do projeto onde pode ser visto o terreno natural à direita, a cava de lavra aberta no centro e os depósitos de bota-fora à esquerda.



TÍTULO DO DESENHO		
MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DA MINA DO RECREIO		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA
ESCALA	1:500.000	junho/2006
ARQUIVO C/DESSERTAÇÃO	GUSTAVO	FIGURA
localização mina recreio		FIG. 4.1



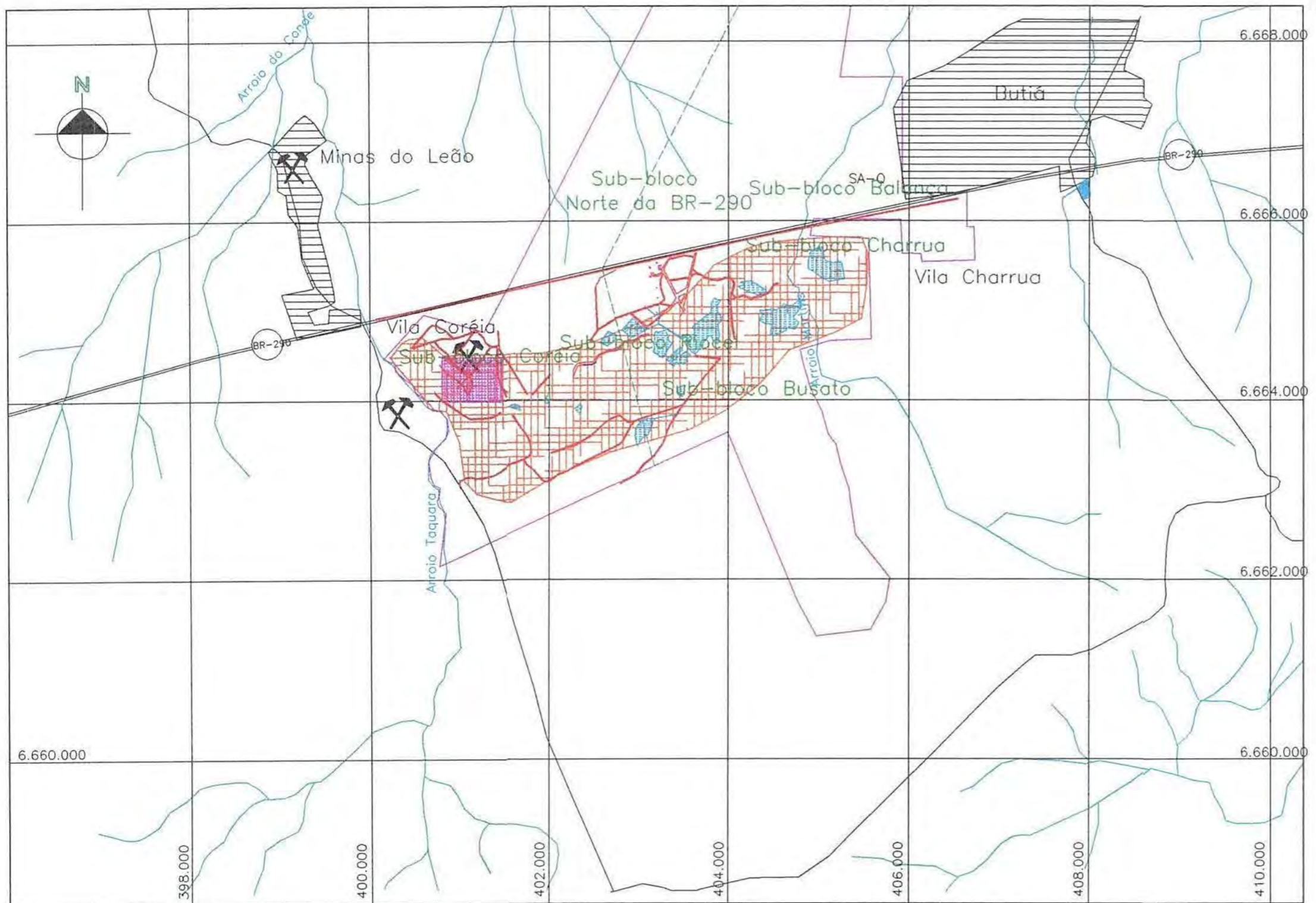
Figura 4.2: Corte de lavra de carvão da Mina do Recreio estudada para implantação de aterro de resíduos.

O depósito de carvão onde se situa a mineração é dividido em cinco blocos de lavra, separados por condições geológicas e estruturais distintas: Coréia, Riocel, Charrua-Balança, Busato e BR-290. Dentro desse contexto, a área selecionada para a implantação do aterro de resíduos sólidos situa-se no bloco Coréia, localizado no limite sudoeste da mina do Recreio. A divisão da área de mineração em blocos pode ser vista na Figura 4.3 onde está demonstrada a área total da mina do Recreio até 1999.

#### 4.1.2 Geomorfologia

A área do empreendimento está situada na região geomorfológica da depressão central do RS, mais especificamente na depressão do rio Jacuí. Esta região situa-se na faixa central do Estado do Rio Grande do Sul, apresentando uma forma alongada no sentido leste-oeste. A unidade é caracterizada por apresentar relevo sem grandes variações altimétricas, gerando um caráter monótono à paisagem. Existe a predominância de colinas (coxilhas) alongadas com topos convexos e vertentes côncavas suavizadas. A declividade do terreno raramente é





### LEGENDA

- drenagens
- corpos d'água
- áreas urbanas
- DNPM's n° 2839/35; 800.455/77 e 810.145/87
- área do projeto
- rodovia federal
- rodovia vicinal
- área minerada até 1999
- área de mineração
- divisa municipal: Minas do Leão/Butiã

TÍTULO DO DESENHO		
<b>MAPA COM A DIVISÃO DA MINA DO RECREIO EM BLOCOS</b>		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA
		junho/2006
ESCALA	ARQUIVO C:\DISSERTACAO GUSTAVO	FIGURA
1:50.000	mapa divisao mina em blocos	FIG. 4.3

maior que 20% e os vales fluviais normalmente são largos com fundo plano - vales em U aberto. O padrão de drenagem é do tipo subdendrítico.

Localmente, a área da Mina do Recreio é constituída por um agrupamento de colinas onduladas suaves e zonas baixas associadas às drenagens, com altitudes variando de 50 a 130 metros, e declividades situando-se entre 4 e 7%. As litologias mais resistentes, como arenitos, tendem a sustentar o relevo com topografia mais elevada, especialmente na porção oeste da mina.

Nos locais da mina, onde houve a mineração de carvão a céu aberto, com a posterior recuperação, a geomorfologia foi modificada, geralmente com uma diminuição da declividade original. Além disso, há um aumento volumétrico no material colocado nos bota-foras (empolamento em torno de 30 % em todas as litologias). O talude final dos bota-foras apresenta uma inclinação média de 10% que é favorável às técnicas de recuperação ambiental. A cota final das áreas recuperadas é variável, procurando se aproximar o máximo possível da cota original.

O principal fator de instabilidade do meio, na área, é a ação do próprio homem, devido a mineração executada em cavas, já que a condição topográfica da área confere estabilidade às vertentes, sem processos erosivos.

#### **4.1.3 - Geologia Regional**

A área de implantação do empreendimento situa-se na borda sul da Bacia do Paraná (CARRARO et alli, 1974) a maior bacia intracratônica brasileira. Nessa região, afloram sedimentos gondwânicos depositados, principalmente, durante as eras Paleozóica e Mesozóica, sendo limitados ao sul pelo escudo Sul-rio-grandense e, ao norte, pelas escarpas dos derrames vulcânicos da formação Serra Geral. O mapa geológico regional com as unidades estratigráficas é apresentado na Figura 4.4, onde são demonstradas as diversas formações geológicas ocorrentes na região de estudos.

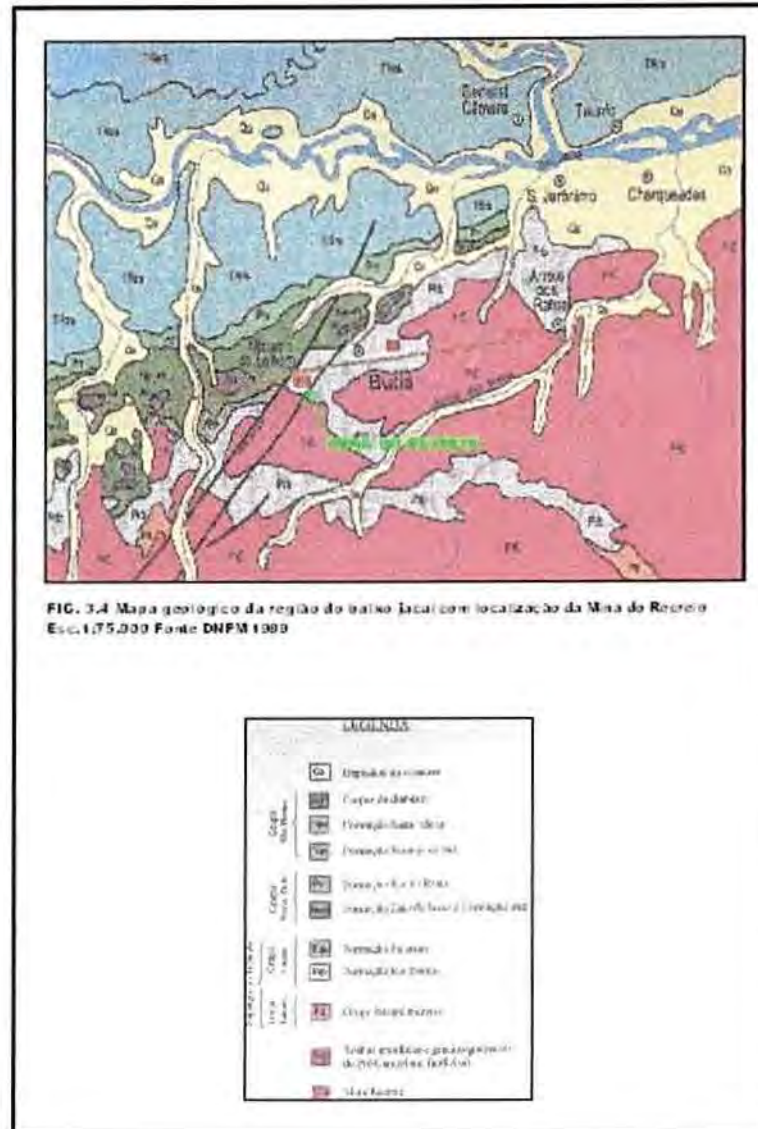


FIG. 3.4 Mapa geológico da região do baixo Jacuí com localização da Mina do Recreio Esc. 1:75.000 Fonte DNPM 1989

Figura 4.4: Mapa geológico da região do baixo Jacuí com localização da Mina do Recreio. Fonte DNPM, 1989.

Os depósitos de carvão localizam-se estratigraficamente na formação Rio Bonito pertencente ao grupo Guatá de idade Permiana Inferior. Essa formação no estado do Rio Grande do Sul é composta por três seqüências sedimentares denominadas seqüência basal, seqüência média e seqüência superior.

A seqüência basal é constituída por uma sedimentação siltico-arenosa fina, com intercalações de ritmitos, siltitos e arenitos com ocorrência subordinada de leitos de calcário e leitos de vitrênio. A laminação dos ritmitos é plano-ondulada e cruzada, com lâminas claras arenosas e lâminas escuras silticas. Essa formação está sobreposta às rochas do grupo Itararé.

A seqüência média é caracterizada por uma sedimentação eminentemente clástica com predominância de arenitos fluviais com intercalações de pelitos, localmente leitos de carvão e com lentes de material grosseiro depositados em ciclotemas. É característica dessa seqüência a grande variação lateral de fácies, refletindo a coexistência de ambientes e processos sedimentares variados, conseqüência da irregularidade do embasamento cristalino e movimentação tectônica sinsedimentar.

A seqüência superior é constituída por uma sedimentação pelítica sendo que nessa seqüência localizam-se os depósitos de carvão de Charqueadas, Butiá-Leão, Faxinal, Gravataí e Chico Lomã. Além de siltitos, argilitos e camadas de carvão ocorrem na base dessa seqüência sedimentos imaturos e relativamente grosseiros relacionados a deslizamentos subaquáticos e canais que carreavam detritos para dentro das turfeiras. Essas rochas foram denominadas informalmente de pedra-areia, e petrograficamente são paraconglomerados cujos clastos de quartzo e feldspato estão imersos em uma matriz pelítico-carbonosa.

A área de estudo situa-se na denominada Bacia Carbonífera Butiá-Leão localizada na parte sul do vale do rio Jacuí. Essa bacia é dividida em dois blocos separados por uma faixa de cisalhamento de características regionais denominada Falha do Leão com orientação N40°E. O bloco Butiá, a leste da falha, onde está situada a área em estudo, possui uma cobertura máxima em relação às camadas carbonosas de 90 metros, enquanto que no Bloco Leão (oeste da falha), a mesma alcança até 450 metros. A área total da jazida Butiá-Leão é de cerca de 1.070 km<sup>2</sup>, com estratos apresentando mergulho regional de 1 a 4° em direção a N-NE. Seus limites são definidos por altos estruturais que controlam a deposição das camadas sedimentares.

De uma maneira genérica, o ambiente deposicional onde foram geradas as camadas de interesse econômico (formação Rio Bonito) é caracterizado por canais meandranes com camadas de carvão de origem lacustre, sotopostas a um espesso pacote pelítico. Posteriormente, toda a bacia foi recoberta por sedimentação marinha, marcando a transgressão permiana.

#### 4.1.4 - Geologia Local

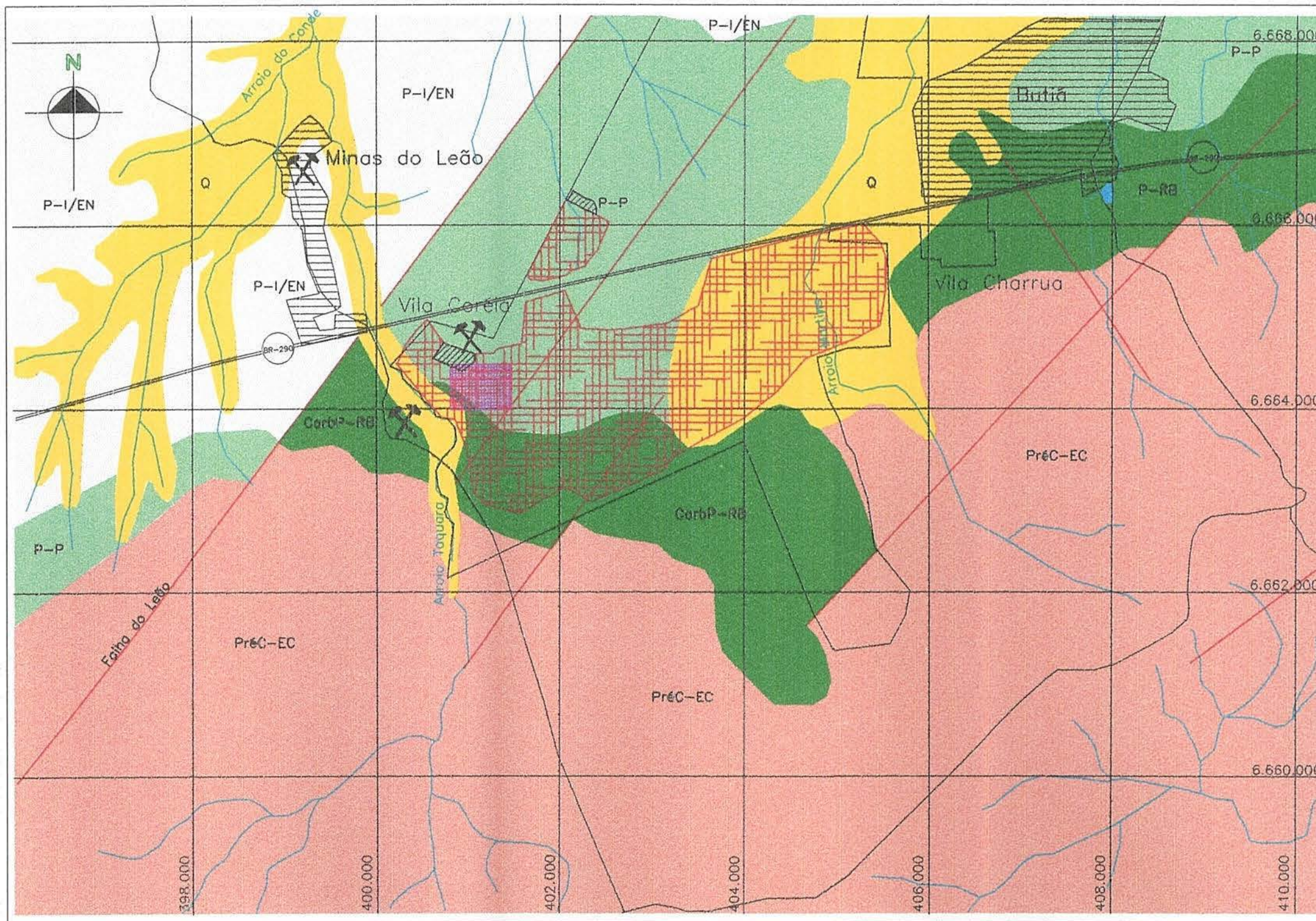
A geologia da área de interesse e entorno é composta por cinco unidades estratigráficas: grupo Cambaí (embasamento cristalino indiviso pré cambriano), grupo Itararé (permo-carbonífero), formação Rio Bonito (permo - carbonífero), formação Palermo (Permiano) e sedimentos recentes (Quaternário). A nível regional destacam-se, ainda as formações Irati e Estrada Nova. Dentre as unidades citadas, as formações Rio Bonito, Palermo e os sedimentos recentes, são aflorantes, e as rochas do grupo Itararé e do embasamento cristalino no local do projeto só são identificáveis por sondagem.

O mapa geológico da região do empreendimento é apresentado na Figura 4.5, onde podem ser vistas as formações geológicas existentes na área do empreendimento e entorno, bem como a zona impactada pela mineração.

O grupo Cambaí é formado por rochas gnáissicas e granitóides com restitos de xistos e veios pegmatíticos quartzo-feldspáticos associados. Esta unidade forma um paleorelevo muito irregular, sobre o qual depositaram-se as unidades gondwânicas. Os contatos com o grupo Itararé e com a formação Rio Bonito, sobrepostos, são nítidos, caracterizando uma discordância pré-carbonífero do tipo erosiva.

O grupo Itararé é formado por uma seqüência de sedimentos flúvio-lacustres de origem periglacial caracterizada como ritmitos e, na base, nas proximidades do embasamento cristalino, depósitos de tilitos. Os contatos do grupo Itararé com a formação Rio Bonito são do tipo gradacional, considerando-se, para efeitos de campo, como o início da formação Rio Bonito um pacote de siltitos carbonosos, subordinadamente carvão, maciço, com espessura de até 15 m e de presença constante nas bacias carboníferas do estado.

A principal unidade estratigráfica, onde se inserem as camadas de carvão economicamente lavráveis, é a formação Rio Bonito depositada sobre uma superfície muito irregular do embasamento cristalino ou Grupo Itararé. Na área em estudo, a formação Rio Bonito é representada por duas seqüências sedimentares distintas, sendo uma basal constituída por clásticos grosseiros e outra superior, composta por sedimentos pelíticos e camadas de carvão. Esses dois pacotes



### LEGENDA

- Estratigrafia**
- Q Sedimentos Recentes
  - P-I/EN Formações Irati/Estrada Nova
  - P-P Formação Palermo
  - CarbP-RB Formação Rio Bonito
  - PréC-EC Embasamento Cristalino Indiviso
- Convenções**
- lineamentos estruturais
  - drenagens
  - área de bota-fora
  - corte de lavra em preenchimento
  - áreas urbanas
  - DNPM's n° 2839/35; 800.455/77 e 810.145/87
  - área do projeto
  - rodovia federal
  - rodovia vicinal
  - área de mineração

TÍTULO DO DESENHO		
MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA EM ESTUDO		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA	1:50.000	ARQUIVO C:\DISSERTACAO GUSTAVO geologico
		FIGURA FIG.4.5

pertencem à seqüência superior da formação Rio Bonito já descrita. Seu contato com a formação Palermo, sobreposta, é do tipo gradacional.

O pacote carbonoso lavrável é composto, basicamente, por duas camadas denominadas Superior (S) e Média (M), separadas por 3,5 a 7,0 de material estéril. Um perfil de sondagem típico da área é apresentado na Figura 4.6. As litologias que compõe o material estéril são siltitos cinza escuro e paraconglomerados, intercalados por dois bancos decimétricos de carvão denominados de S3 e L. A camada superior tem espessura média de 1,7 m sendo aquela que possui o comportamento mais regular na bacia, tanto estratigraficamente como estruturalmente. A camada média tem ocorrência menos abrangente que a superior e apresenta maiores irregularidades de espessuras em função de variações faciológicas e sua espessura média é de 1,5 m. O carvão é do tipo medianamente brilhante, com nódulos e disseminações de pirita, além de lâminas médias de vitrênio em quantidades moderadas a abundantes. A profundidade de ocorrência do pacote carbonoso lavrável a céu aberto varia de 3 a 90 metros. A Figura 4.6, a seguir, mostra um perfil estratigráfico da área.

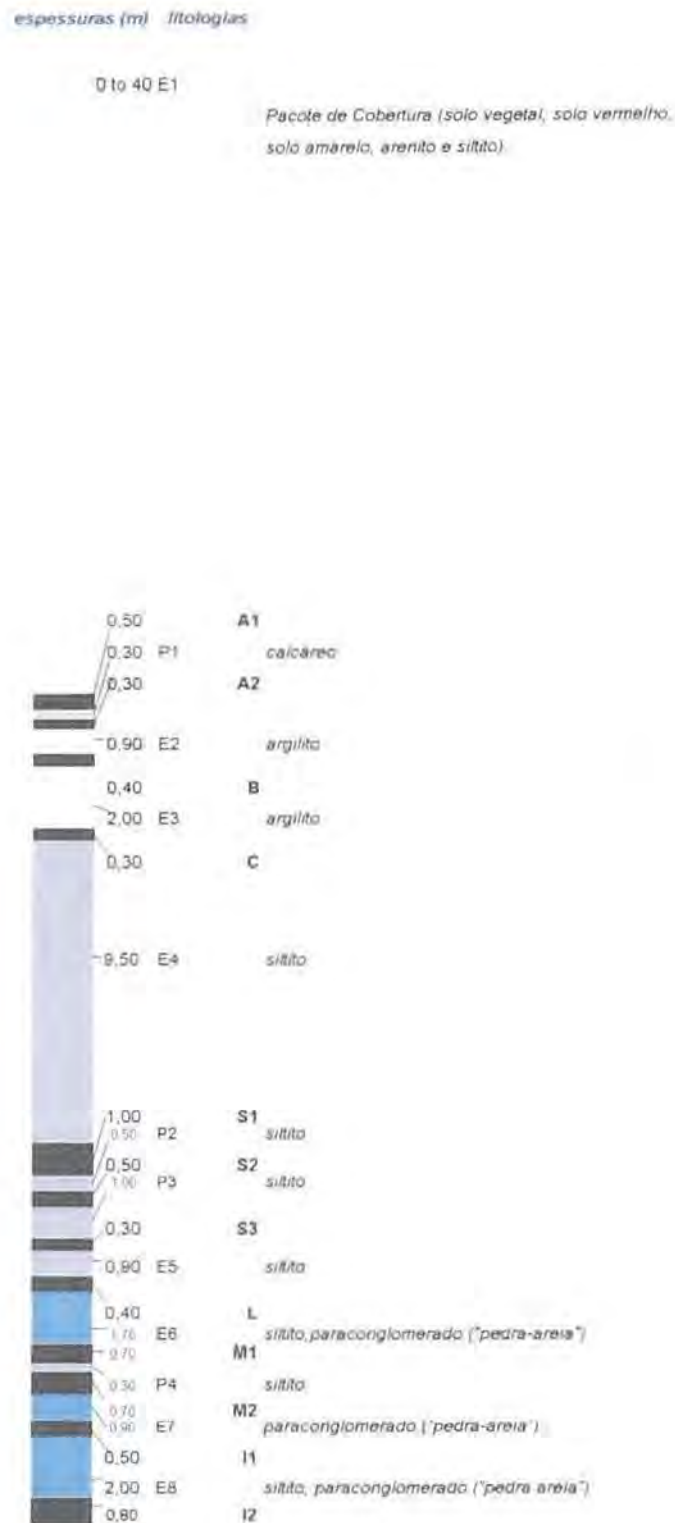


Figura 4.6: Perfil estratigráfico médio do sub - bloco Coréia mostrando as camadas de carvão Superior (S1,S2,S3), Média(M1, M2), Inferiores (I1,I2), A,B C e as rochas estéreis intercaladas.

A formação Palermo, que marca o início da transgressão marinha permiana, aflora naquelas porções da área onde as camadas de carvão encontram-se a



profundidades superiores a 40 metros. É constituída por siltitos arenosos e bancos de arenitos de coloração cinza médio com estratificação cruzada. Com a ocorrência de alteração intempérica, as litologias adquirem uma coloração alaranjada devido à presença de óxido de ferro, tornando-se muito friáveis. A espessura dessa formação na área raramente ultrapassa 30 metros.

Os sedimentos aluvionares recentes são representados principalmente pela deposição ao longo da planície de inundação das duas drenagens presentes na região: arroio Taquara (porção SW) e arroio Martins (porção E). A espessura desses depósitos varia de 3 a 10 m, com composição de solo vegetal, argilas siltico-arenosas, areias silticas e grosseiras. Tais sedimentos assentam-se de forma erosiva sobre as litologias da formação Rio Bonito.

O bloco Coréia abrange a porção mais ocidental da área, estando localizado ao sul da BR-290 e a oeste do bloco Riocel. Os limites sul e oeste do bloco são controlados pela erosão gradativa das camadas de carvão (borda da bacia), observando-se que sua porção sul já foi minerada a céu aberto. O limite leste é marcado por um falhamento NE com rejeito superior a 10 m e a profundidade das camadas de carvão no bloco varia de 20 a 50 metros. A soma das espessuras das camadas de carvão situa-se entre 4 e 6 m as quais possuem as seguintes denominações: camada A (bancos A1, A2, B e C), S (bancos S1, S2 e S3), L, M (bancos M1 e M2), I1 e I2, com estéril intermediário total variando de 3 a 7 metros. A variação da profundidade das camadas está vinculada à topografia ondulada presente na região.

A cobertura das camadas de carvão é formada por siltitos, folhelhos e, subordinadamente, argilitos. Já, o estéril intermediário é composto por siltitos, e, por vezes, níveis de paraconglomerado. A ocorrência de paraconglomerados como estéril intermediário sobreposto à camada M1 ocasiona acentuadas variações de espessura, o que gera grandes variações na profundidade da camada. Tal litologia ocorre sob a forma de lentes a partir do limite leste do bloco. Nas áreas com cotas superiores a 92 m, há a presença da seqüência de arenitos praias transicionais da formação Palermo, apresentando espessuras de até 30 metros.

Na Figura 4.7, a seguir, é apresentado um mapa da porção oeste da mina do Recreio com destaque para o bloco Coréia com a localização das seções geológicas da zona minerada nesse bloco antes da lavra do carvão. Nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10

4.11, são apresentadas seções geológicas da zona minerada demonstrando as várias litologias com base em sondagens amostradas executadas na área. Na Figura 4.12 é apresentada uma seção geológica da área após a lavra do carvão demonstrando a área não minerada, os depósitos de bota-fora e a cava remanescente.

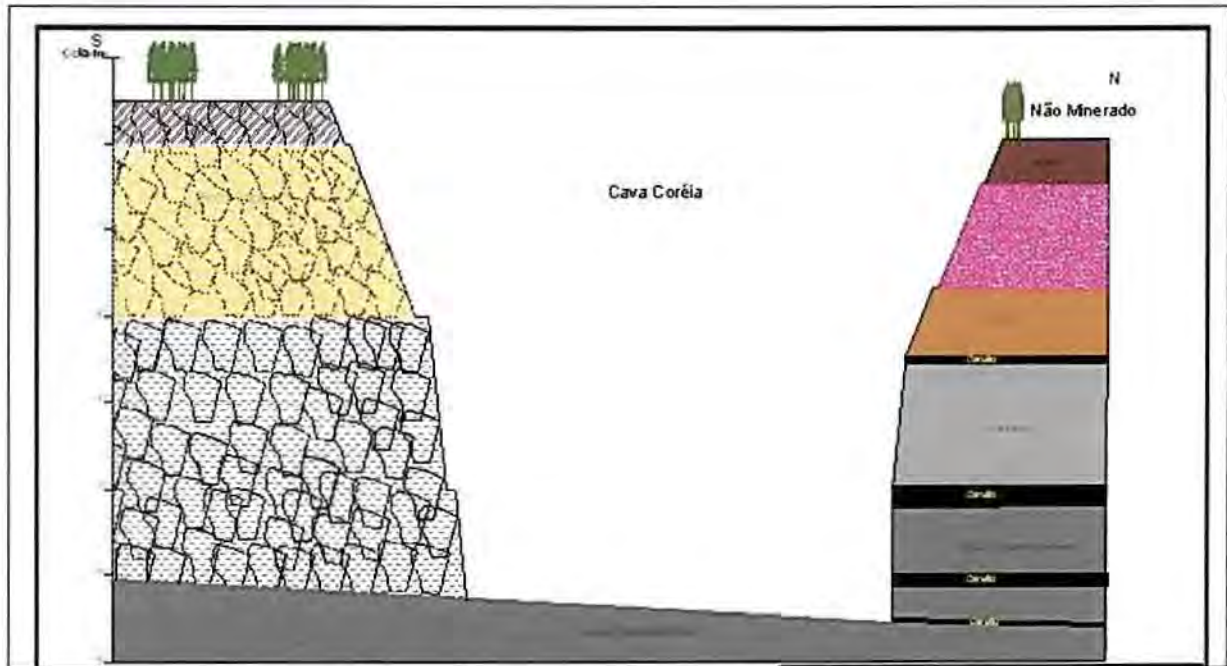
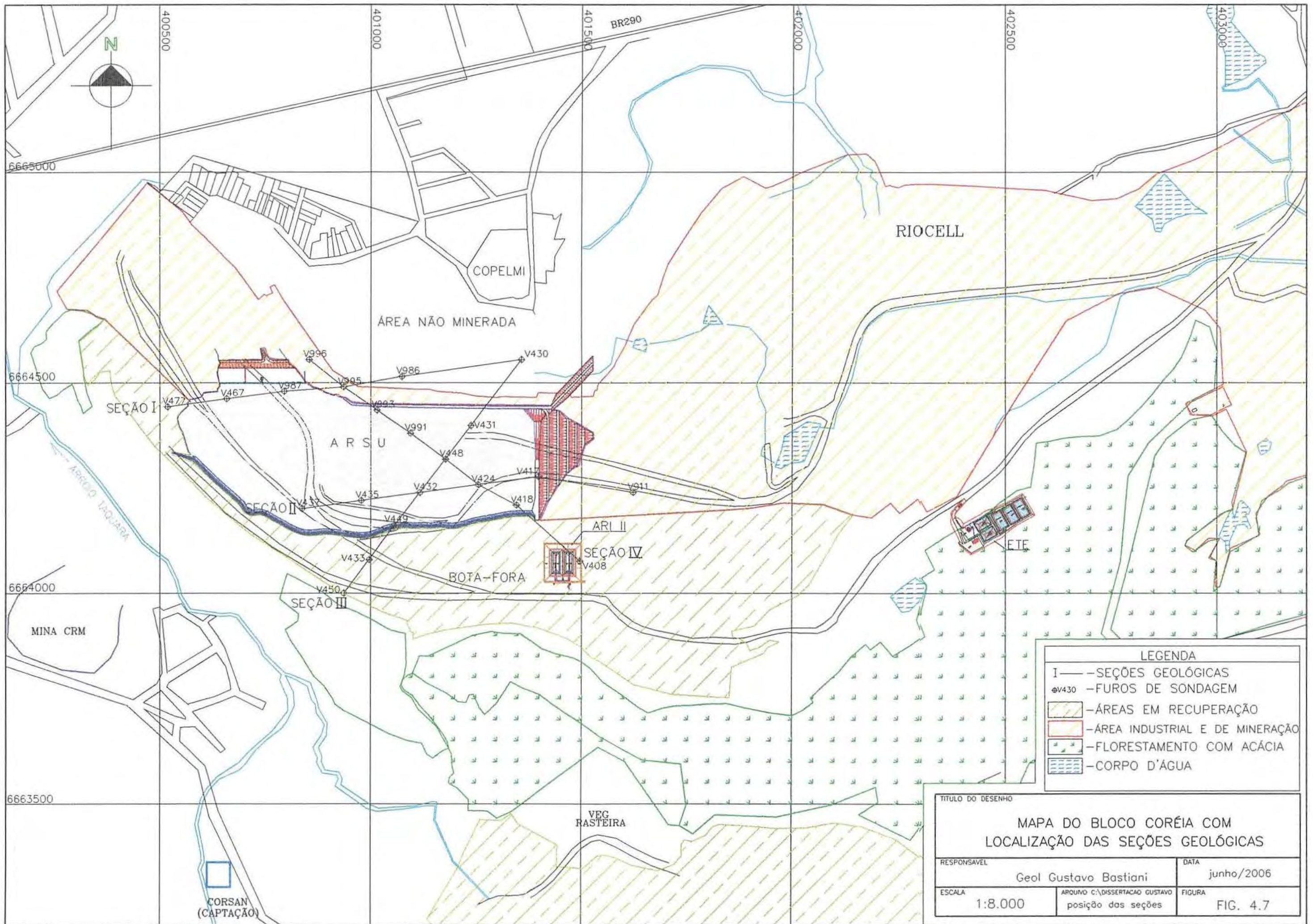
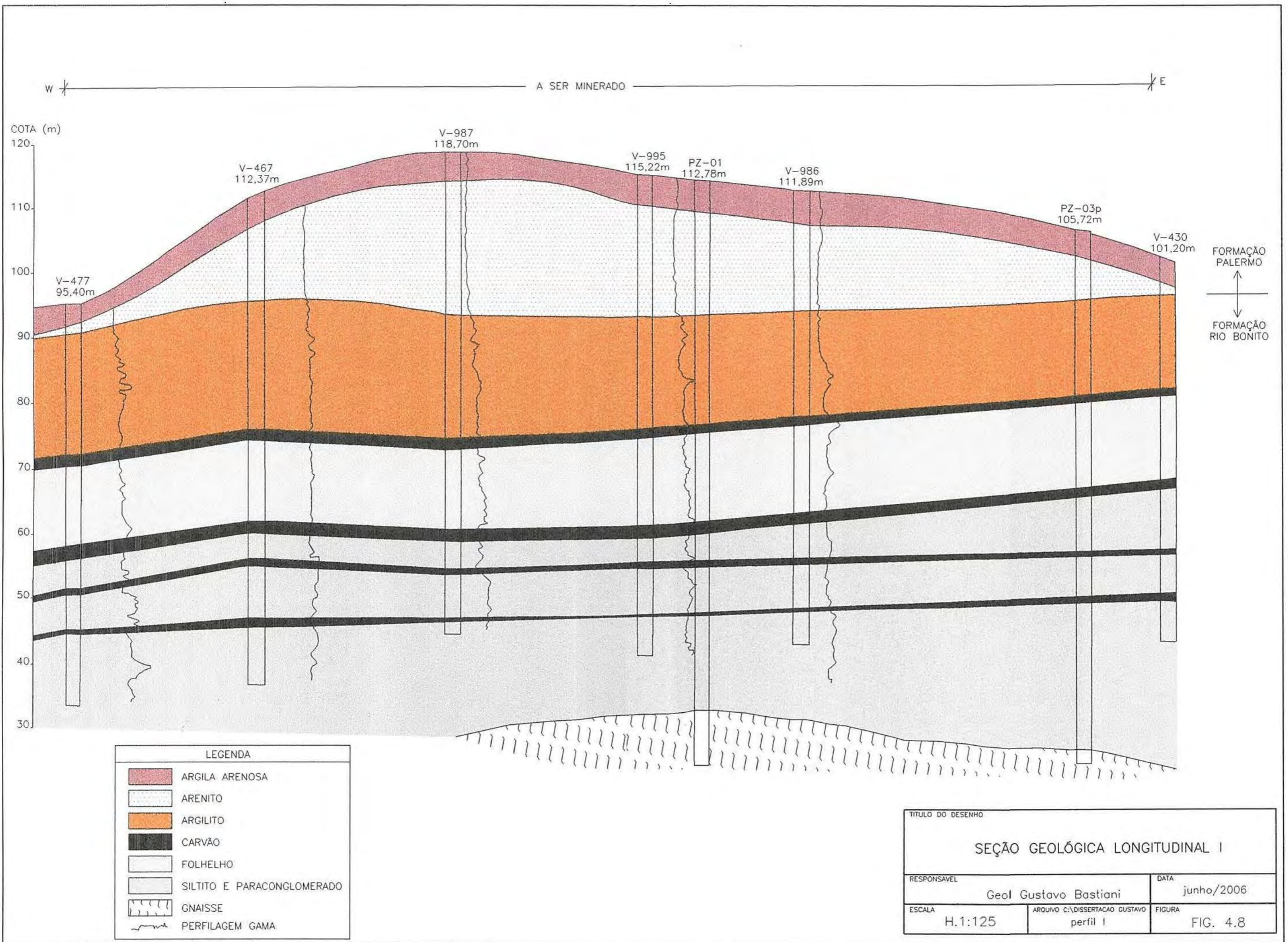
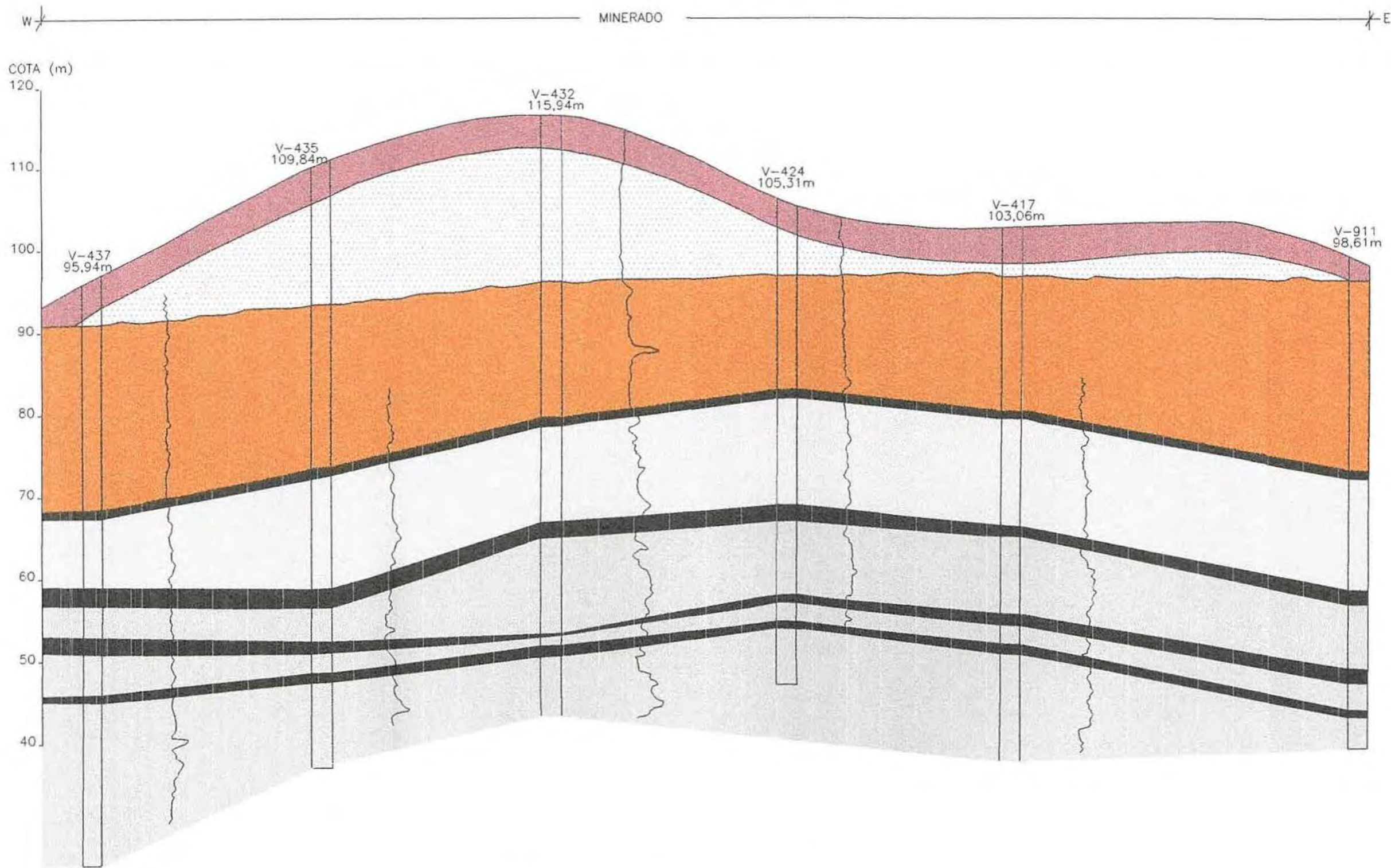


Figura 4.12: Seção geológica esquemática pós-lavra.

Na figura 4.13 é mostrado o talude remanescente norte da área estudada, observando-se os pelitos com camadas de carvão da formação Rio Bonito na base e os arenitos da formação Palermo no topo.



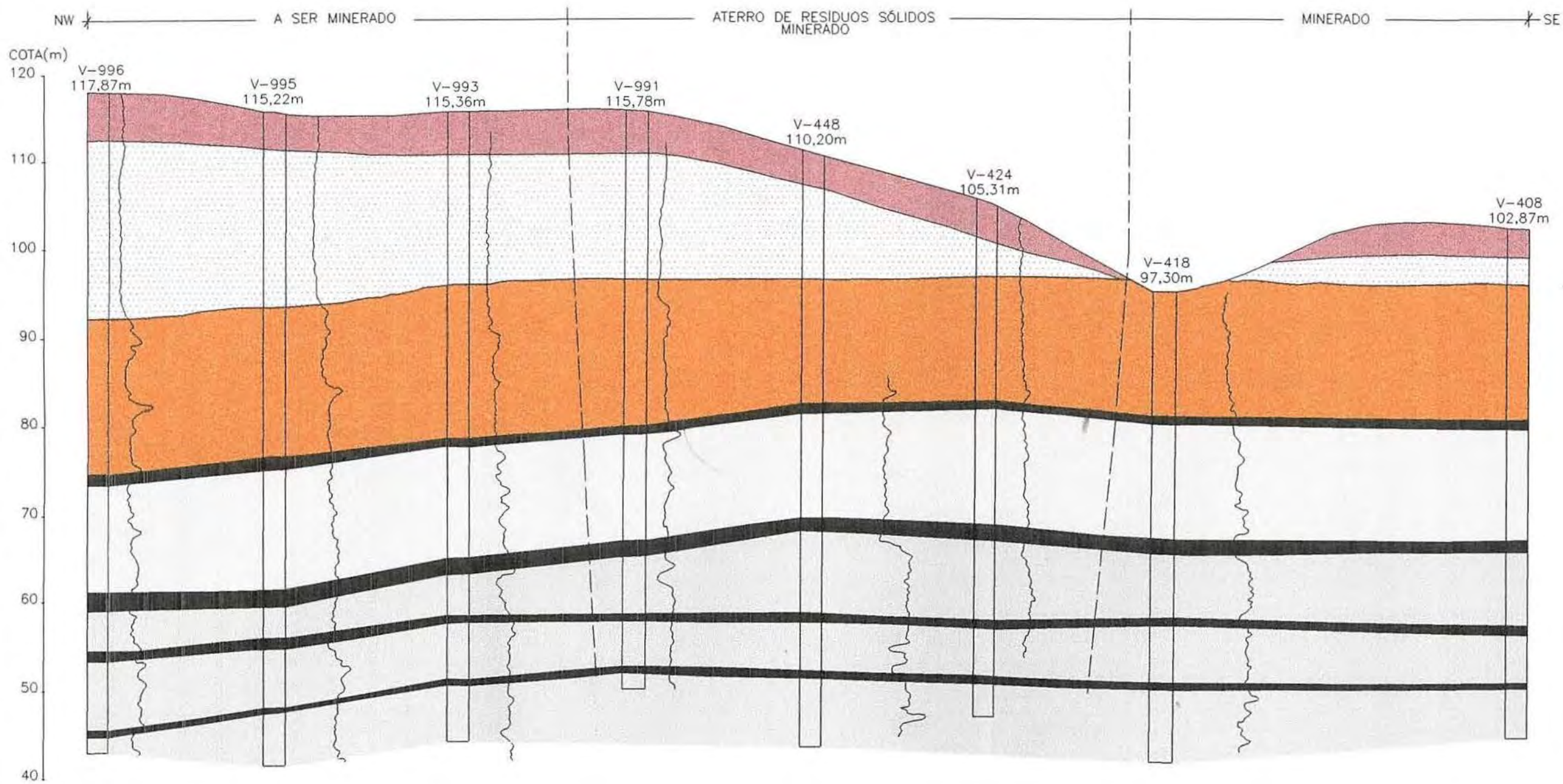




LEGENDA	
	ARGILA ARENOSA
	ARENITO
	ARGILITO
	CARVÃO
	FOLHELHO
	SILITITO E PARACONGLOMERADO
	PERFILAGEM GAMA

TÍTULO DO DESENHO		
SEÇÃO GEOLÓGICA LONGITUDINAL II		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA H.1:125	ARQUIVO C:\DISSERTAÇÃO GUSTAVO perfil 2	FIGURA FIG. 4.9





LEGENDA	
	ARGILA ARENOSA
	ARENITO
	ARGILITO
	CARVÃO
	FOLHELHO
	SILTITO E PARACONGLOMERADO
	PERFILAGEM GAMA

TÍTULO DO DESENHO		
SEÇÃO GEOLÓGICA TRANSVERSAL IV		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA	H.1:125	ARQUIVO C:\DISSERTAÇÃO GUSTAVO perfil 4
		FIGURA FIG. 4.11



Figura 4.13: Talude natural no limite norte da área estudada mostrando as Formações Rio Bonito na base (cinza) e Palermo no topo (amarela).

Os depósitos de bota-fora, presentes na área, também foram caracterizados por constituírem uma unidade de grande extensão com importância para o estudo. Esses depósitos são provenientes da operação de descobertura das camadas de carvão e remoção dos estéreis intermediários presentes entre as camadas de carvão.

A estratigrafia dos bota-foras é criada pela deposição planejada dos diversos materiais. Dessa forma, na base são depositados folhelhos, siltitos cinza escuros e carbonosos juntamente com paraconglomerados. Sobre esses materiais está depositado o estéril de cobertura composto por argilas arenosas de coloração amarelada e arenitos oxidados. Na seqüência de empilhamento é colocada argila vermelha com adequação da topografia do depósito sobre a qual é espalhado o solo vegetal, sendo depois de feita a revegetação da área.

Apresenta-se, na Figura 4.14, a seguir, a configuração dos depósitos de bota-fora presentes no limite sul da área estudada, verificando-se o empilhamento das várias litologias que compõe o material estéril da mineração.





Figura 4.14: Depósito de bota-fora presente no limite sul da área de estudo.

#### 4.1.5 - Geologia Estrutural

A área da Mina do Recreio foi afetada por vários processos tectono-sedimentares, os quais foram responsáveis por variações em pequenas distâncias e por particularidades locais do pacote carbonoso. Dentre os processos tectônicos destacam-se as diversas reativações da falha do Leão, que é a principal estrutura tectônica que afeta a bacia sedimentar na região. Essa falha, de direção NE, ocorre a oeste da área de estudo gerando pequenas falhas associadas individualizando blocos dentro da área de mineração. Outros processos que afetaram a evolução da bacia estão relacionados à subsidência diferencial, seu paleorelevo e a ocorrência de enxurradas e escorregamentos de lama à época da geração das camadas de carvão.

O mergulho regional das camadas varia de 1 a 4° para N-NE, sendo que as camadas de carvão têm a configuração de pequenas e suaves anticlinais em função da compactação diferencial sofrida pela turfeira original e devido ao paleorelevo irregular.

As principais falhas verificadas na Mina do Recreio tem orientação paralela à falha do Leão (NE), sendo mais comuns na porção oeste, zona mais próxima àquela estrutura. Dentro do bloco Coréia ocorrem três falhas com essa orientação, cujos rejeitos variam de 4 a 12 metros. Essas estruturas situam-se a leste da área do projeto.

Além destas, outras falhas de menor porte, perpendiculares às primeiras, também ocorrem e são relacionadas a esforços de alívio de tensão ocasionados durante as reativações dos falhamentos regionais. Elas são classificadas como normais com presença de estrias nas superfícies de escorregamento que são superfícies estriadas que demonstram movimento entre blocos de rocha. O comportamento das litologias sedimentares frente a esforços tectônicos é do tipo plástico gerando deformações sem descontinuidades, as quais poderiam estabelecer a circulação de água subterrânea. As estruturas tectônicas regionais podem ser vistas no mapa geológico regional apresentado na Figura 4.5.

## 4.2 - Caracterização Hidrogeológica da Área

### 4.2.1 - Recursos Hídricos Superficiais

A área da Mina do Recreio é drenada pelo Arroio Martins, a leste, e Taquara a oeste, cursos d'água que alimentam o arroio do Conde, tributário da margem direita do Rio Jacuí. A referida área está inserida na bacia hidrográfica do rio Jacuí, sendo a confluência do rio com o arroio do Conde, no município de São Jerônimo.

O arroio Taquara possui suas nascentes localizadas no cerro do Roque, ao sul, e desenvolve-se no sentido sul-norte, cruzando a cidade de Minas do Leão, quando passa a chamar-se arroio do Conde até a confluência com o rio Jacuí. Ao longo de seu percurso, suas águas são utilizadas na dessedentação de animais, irrigação de lavouras de arroz e no abastecimento de água da cidade de Minas do Leão. Serve ainda como escoadouro natural da drenagem superficial das localidades servidas (esgotos sanitários e industriais). Apresenta uma extensão de

50 km da nascente à foz, recebendo no seu terço médio, as águas drenadas da porção oeste da Mina do Recreio e da área minerada no bloco leste da Mina São Vicente Sul da Companhia Rio-grandense de Mineração (CRM). A Sub-bacia Hidrográfica do Arroio Taquara tem aproximadamente 35 km<sup>2</sup> desde suas nascentes até a BR 290.

O Arroio Martins tem suas nascentes localizadas no Cerro do Martinzinho e desenvolve-se no sentido sul-norte, cruzando a cidade de Butiá à nordeste. Ao norte dessa cidade, passa a denominar-se sanga da Cascata, até confluir pela margem direita com o Arroio do Conde. Ao longo de seu percurso, suas águas são utilizadas principalmente na dessedentação de animais e irrigação de lavouras de arroz. Também é utilizado como escoadouro natural da drenagem superficial da cidade de Butiá e de corpo receptor final de esgotos sanitários e industriais. O Arroio Martins apresenta uma extensão de 11 km da nascente até a confluência com a sanga da Cascata, sendo receptor das águas drenadas da porção leste da Mina do Recreio, na sua porção média inicial. A Sub-Bacia Hidrográfica do Arroio Martins possui aproximadamente 32 km<sup>2</sup> de área. Na Figura 4.15 são demonstradas as drenagens existentes na região e sua posição em relação à área do projeto.

#### 4.2.2- Hidrogeologia Regional

Para a caracterização dos ambientes hidrogeológicos envolvidos no projeto faz-se necessária a revisão aos conceitos de aquífero - formação que contenha água subterrânea e seja suficientemente permeável para transmitir água em quantidade utilizável, aquícludes - camadas confinantes essencialmente impermeáveis, e aquíquardos que são camadas suficientemente permeáveis para transmitir água verticalmente de ou para um aquífero confinado mas não suficientemente permeável para permitir um transporte lateral de água. (Bear, J. 1979. *Hydraulics of Groundwater*).

Os aquíferos, por sua vez podem ser livres ou confinados: aquífero livre é aquele cuja pressão atuante é a pressão atmosférica. Já os aquíferos confinados

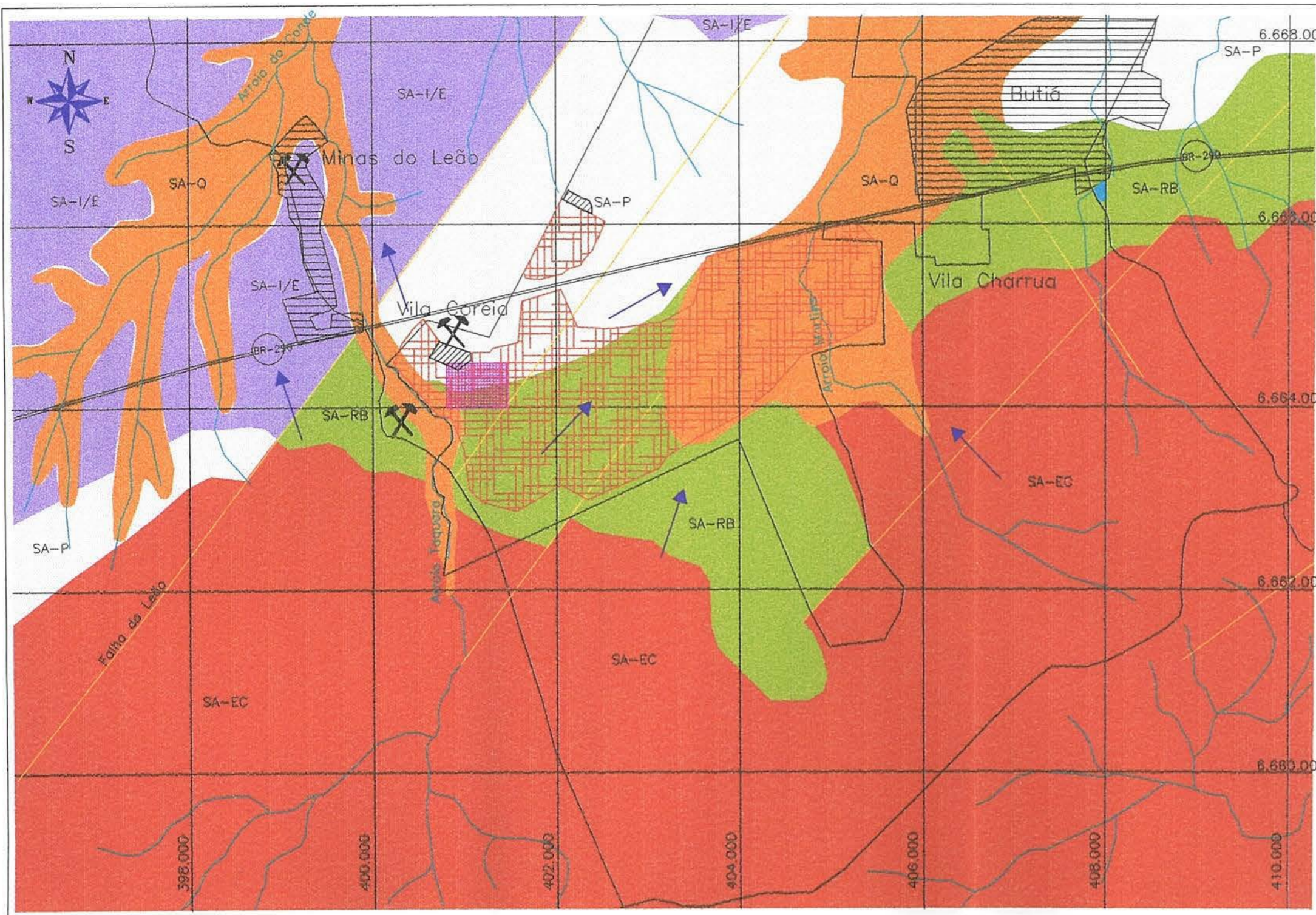
contêm água sob pressão constituindo-se por uma camada saturada limitada em seu topo e base por camadas impermeáveis.

No contexto hidrogeológico brasileiro, a área da mina do Recreio está inserida na província hidrogeológica da bacia do Paraná (DNPM, CPRM, 1983). Nessa macro-divisão são distintos os seguintes tipos de aquíferos:

- i. aquíferos contínuos de extensão variável, livres, constituídos por sedimentos clásticos não consolidados, de permeabilidade variável, com água de qualidade química geralmente boa, com possibilidade de exploração por poços rasos (até 50 m). Esses aquíferos são formados por depósitos aluvionares;
- ii. aquíferos contínuos de extensão regional, livres ou confinados, constituídos por sedimentos clásticos, consolidados com permeabilidades geralmente baixa. Esses aquíferos são representados pelas formações sedimentares predominantemente pelíticas (Rio Bonito, Palermo, Irati e Estrada Nova).
- iii. Aquíferos contínuos de extensão regional, livres ou confinados, formados por sedimentos clásticos consolidados, com permeabilidades médias a altas, passíveis de exploração por poços profundos. Esses aquíferos são representados pelas formações sedimentares triássicas denominadas Formação Rio do Rasto e Botucatu.

#### 4.2.3 - Hidrogeologia Local

Na divisão regional dos tipos de aquíferos presentes na bacia do Paraná predominam na área de estudo os aquíferos do tipo ii, inseridos nos domínios das rochas sedimentares da formação Rio Bonito, capeados pelos arenitos da base da formação Palermo. Esse pacote sedimentar assenta sobre o embasamento cristalino, ou rochas do grupo Itararé, apresentando mergulhos de 1 a 4° para N-NE. Na Figura 4.15, é apresentado o mapa contendo as unidades hidrogeológicas da área da mina do Recreio e entorno, incluindo as drenagens naturais e a indicação da direção de fluxo da água subterrânea.



### LEGENDA

#### Sistemas Aquíferos

- SA-Q Sistema Aquífero Quaternário
- SA-I/E Sistema Aquífero Irati/Estrada Nova
- SA-P Sistema Aquífero Palermo
- SA-RB Sistema Aquífero Rio Bonito
- SA-EC Sistema Aquífero Embasamento Cristalino
- Sistema Aquífero Modificado pela Lavra
- Corte de Lavra em Preenchimento

#### Convenções

- lineamentos estruturais
- drenagens
- áreas urbanas
- DNPM's n° 2839/35; 800.455/77; 810.145/87
- área do projeto
- rodovia federal
- rodovia vicinal
- fluxo de água freática (direção aproximada)
- área de mineração

TÍTULO DO DESENHO		
<b>MAPA HIDROGEOLÓGICO DA REGIÃO EM ESTUDO</b>		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA	1:50.000	ARQUIVO C:\DISSERTAÇÃO GUSTAVO hidrogeologico
		FIGURA FIG. 4.15

Em cada uma dessas formações, e nas áreas de bota-fora, o comportamento da água subterrânea é distinto em função das litologias e variações faciológicas, podendo ser estabelecida a seguinte divisão:

- sistema aquífero Embasamento Cristalino: Composto por rochas metamórficas (gnaisses e migmatitos) e granitóides do embasamento cristalino, constituindo um aquífero fraturado onde o fluxo da água subterrânea é controlado pela orientação, densidade e continuidade do fraturamento das rochas. A zona de recarga desse aquífero situa-se a cerca de 1,5 km ao sul da área do projeto, na faixa de afloramento das rochas do embasamento cristalino. Nas zonas onde essas rochas estão encobertas pela sedimentação gondwânica, a recarga do aquífero não acontece, tendo em vista a baixa permeabilidade das formações sedimentares que recobrem as rochas do embasamento.
- sistema aquífero Rio Bonito: Esse aquífero é constituído na área por três litofácies: a litofácies pelítica onde ocorrem às camadas de carvão associadas a siltitos maciços, argilosos de cor cinza escuro, muitas vezes carbonosos; a litofácies paraconglomerática que ocorre abaixo das camadas principais de carvão, sendo composta por paraconglomerados de coloração cinza escura, com matriz siltico-argilosa, por vezes muito carbonosa com clastos variando de areia grossa a seixo, com predominância de grânulos de quartzo e feldspato; a litofácies ortoconglomerática que ocorre na base da seqüência deposicional da formação Rio Bonito, no contato com o embasamento, tendo pouca expressão na área de estudo. É composta por conglomerados contendo seixos de granito e siltito e porção arenosa variando de grossa a média. A composição litológica destas fácies revela que estas seqüências apresentam comportamento hidrodinâmico tanto de aquífero quanto de aquícludes, dependendo de interconexão por fraturas que beneficiariam a recarga e circulação da água subterrânea. A Figura 4.16, a seguir, mostra em detalhe a litologia predominante na área composta por siltitos cinza da formação Rio Bonito.



Figura 4.16: Siltitos da formação Rio Bonito que configuram aquípardos e aquícludes.

- sistema aquífero Palermo: Compõe-se, na área em estudo, por arenitos da base da formação Palermo em contato direto com a Formação Rio Bonito. São arenitos finos, com boas condições de circulação e armazenamento, constituindo um típico aquífero poroso cuja condutividade hidráulica situa-se entre  $10^{-1}$  e  $10^{-3}$  cm/s, dependendo da granulometria. Figura 4.17 mostra em detalhe os arenitos oxidados da formação Palermo que configuram aquífero.

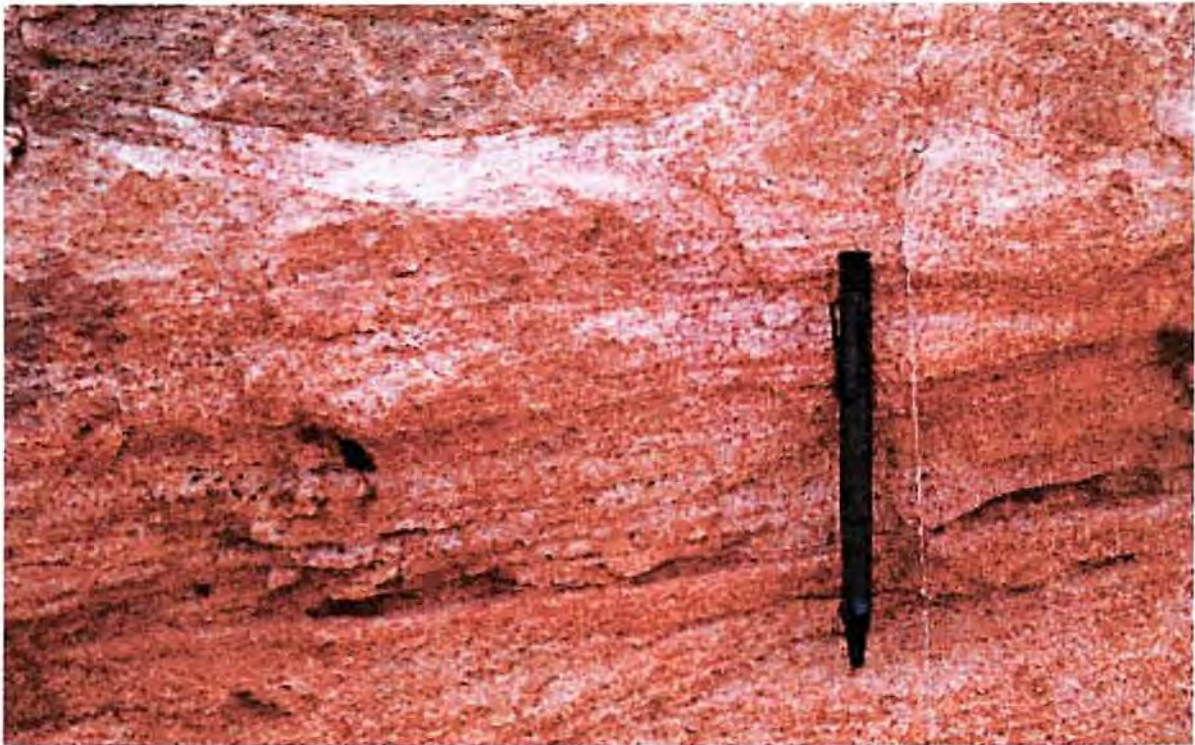


Figura 4.17: Detalhe dos arenitos da formação Palermo.

- sistema aquífero modificado pela lavra (bota-foras): está representado por grandes áreas que já foram lavradas e reconstituídas topograficamente, o que implica na modificação considerável das condições hidrogeológicas originais. Nesses depósitos, a disposição e preenchimento das cavas de mineração segue uma seqüência lógica que procura manter a ordem deposicional original das litologias, bem como as feições topográficas. O comportamento da água subterrânea constatada nesse meio revelou que o nível do lençol freático está estabelecido no contato entre o depósito e o substrato rochoso do fundo da cava original que representa uma barreira impermeável. Nos materiais que compõem os depósitos, predominantemente pelitos intemperizados, o próprio processo de deposição com o trânsito de equipamentos pesados causou sua compactação, impedindo a formação de um aquífero artificial. Na Figura 4.18 é apresentada uma seção esquemática dos sistemas aquíferos presentes na área do projeto. Nessa figura, fica clara a situação que ocorre na área estudada, observando-se o perfil hidrogeológico natural composto por solo, arenitos da formação Palermo e aquitardos e aquícludes da



formação Rio Bonito, e o perfil modificado onde os depósitos de bota-fora assentam sobre a base dessa formação.

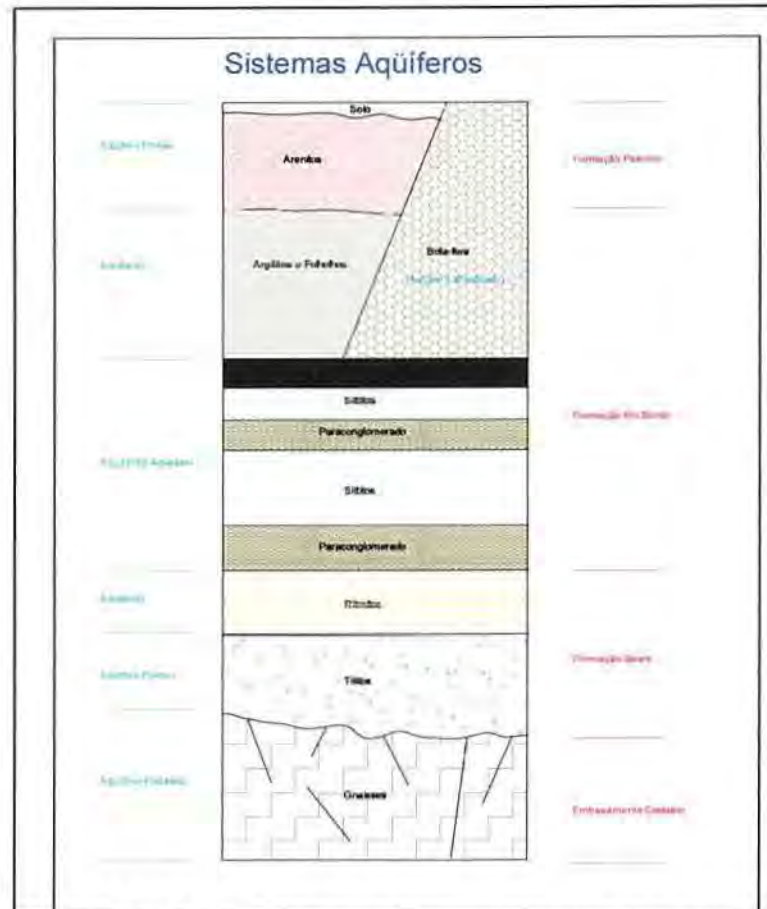


Figura 4.18: Seção esquemática - sistema de aquíferos

### 4.3 Geotécnica e Caracterização dos Materiais Disponíveis para o Projeto

Os estudos geotécnicos efetuados visando à implantação do aterro foram direcionados para a análise de estabilidade dos taludes planejados para o local. Também houve a caracterização dos diversos materiais existentes na área e removidos durante as operações de lavra que fossem aptos à utilização na obra dentro do princípio de não degradar novas áreas para obtenção de materiais e para minimizar custos de transporte. A utilização dos materiais foi direcionada para a impermeabilização da base e laterais do aterro com o objetivo de impedir a migração de contaminantes para o substrato. Outra utilização prevista para os

materiais, foi a cobertura diária dos resíduos para minimizar a geração de odores e impedir a proliferação de insetos.

Os principais materiais caracterizados para utilização na impermeabilização do aterro sanitário foram os seguintes:

- argila arenosa de coloração avermelhada com alguma matéria orgânica produto da alteração intempérica de arenitos, correspondendo ao nível mais superficial do estéril de cobertura, sobreposto aos arenitos da formação Palermo. A mineralogia dessa argila é quartzo, caulinita e muscovita;
- argila vermelha produto da alteração intempérica dos pelitos da formação Rio Bonito. A mineralogia dessa argila é quartzo, caulinita e muscovita;
- argila de coloração amarelada correspondendo ao nível de estéril de cobertura sobreposto aos folhelhos cinza esverdeados da formação Rio Bonito. A mineralogia dessa argila é quartzo, muscovita e caulinita;
- folhelho de coloração cinza-médio a esverdeado, com alteração intempérica, correspondendo ao estéril intermediário entre as camadas de carvão de topo (A, B, e C) e as camadas principais (S12 e M). A mineralogia desse material é quartzo, caulinita, esmectita, muscovita e vaterita;
- siltito cinza escuro, correspondendo ao estéril intermediário entre as camadas S1 e S2. A mineralogia desse material é quartzo, caulinita, esmectita, e muscovita com presença de matéria carbonosa.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 a são mostradas as argilas presentes na área de mineração e caracterizadas para verificar sua adequação ao emprego como camadas de impermeabilização.



Figura 4.19: Argila vermelha caracterizada para utilização na impermeabilização do aterro sanitário.



Figura 4.20: Argila amarela caracterizada para impermeabilização do depósito.

Os ensaios realizados nos materiais de interesse foram limites de Atterberg, permeabilidade em laboratório a carga constante, compactação na energia normal, análises granulométricas e ensaios de compressão triaxial.

Os limites de Atterberg são usados para determinar o teor de umidade no qual o solo atinge seu limite de liquidez (LL) ou seu limite de plasticidade (LP). Esses ensaios são aplicados somente em materiais coesivos de granulometria fina. O

teor de umidade é usado para estimar propriedades como compressibilidade, características de dilatação e de resistência, que fornecem uma indicação de como o material reagirá quando solicitado à carga.

Os ensaios de compressão triaxial são usados para determinar a resistência ao cisalhamento dos materiais semelhantes ao solo sob condições de drenagem controlada. A resistência ao cisalhamento dá uma indicação da capacidade de suporte do material e da estabilidade de aterros construídos com esse material.

Os ensaios de permeabilidade fornecem a velocidade de infiltração da água no solo e em consequência sua capacidade de retenção em seu estado natural ou compactado com a finalidade de verificar sua aplicabilidade como material de impermeabilização e a espessura necessária para garantir o período de retenção de eventuais percolados.

Esses ensaios, também foram utilizados durante a fase de implantação da obra como controle da permeabilidade das argilas compactadas. Durante a execução da obra foram retirados blocos de argila compactada para a realização de ensaios de permeabilidade em laboratório em amostras indeformadas.

Todos os ensaios executados para a caracterização dos materiais citados são apresentados no anexo B.

#### **4.4 Monitoramento de Água Subterrânea**

O estudo desenvolvido buscou caracterizar a situação dos diversos meios envolvidos na área, antes da implantação do projeto, prevendo, também, o monitoramento dos mesmos ao longo da implantação e desenvolvimento do aterro. Dessa forma, foram estabelecidas redes de monitoramento para a água subterrânea e água superficial, que são os meios mais vulneráveis a qualquer empreendimento dessa natureza.

A rede de monitoramento da água subterrânea foi estabelecido a partir da norma técnica, posicionando-se um piezômetro a montante do fluxo da água subterrânea e dois a jusante. Um terceiro piezômetro de jusante foi construído

posteriormente. A dinâmica do lençol freático baseou-se no mergulho regional dos extratos para norte o que governa também a direção do fluxo da água subterrânea.

A construção dos poços de monitoramento baseou-se na norma técnica NBR 13895 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, (ABNT) já citada e comentada. Conjuntamente com a implantação dos poços de monitoramento, foram feitos ensaios de infiltração em trechos pré-estabelecidos visando definir a permeabilidade das diversas litologias.

As atividades relativas à implantação dos piezômetros profundos nas rochas das formações Palermo e Rio Bonito foram desenvolvidas também com o objetivo de definir a permeabilidade in situ dessas formações. Para tal, a metodologia de trabalho foi adaptada, utilizando-se o seguinte procedimento.

- perfuração das litologias da formação palermo (aquífero) em diâmetro de 27 cm com brocas destrutivas e coleta de amostras de calha utilizando-se lama bentonítica para estabilização das paredes do furo;
- revestimento do intervalo perfurado com tubos geomecânicos (norma DIN 4925) em diâmetro de 15 cm;
- cimentação do espaço anelar revestimento-furo com mistura de cimento e bentonita por circulação reversa (injeção pelo tubo com saída pelo espaço anelar) com tempo de secagem de cinco dias. Esse procedimento foi utilizado para isolamento do aquífero da formação Palermo, já que o objetivo é monitorar a presença de água subterrânea existente nas litologias da Formação Rio Bonito que é a unidade a ser diretamente afetada pelo depósito;
- perfuração com amostragem das litologias em diâmetro NW (7,62 cm) até o topo do intervalo a ser ensaiado;
- colocação de revestimento em diâmetro BW (5,42 cm) até o topo do intervalo a ser amostrado, verificando-se a estanqueidade das roscas e inexistência de vazamentos no contato entre a extremidade dos tubos e o fundo do furo;
- perfuração do intervalo a ser ensaiado em diâmetro BW, com amostragem das litologias;

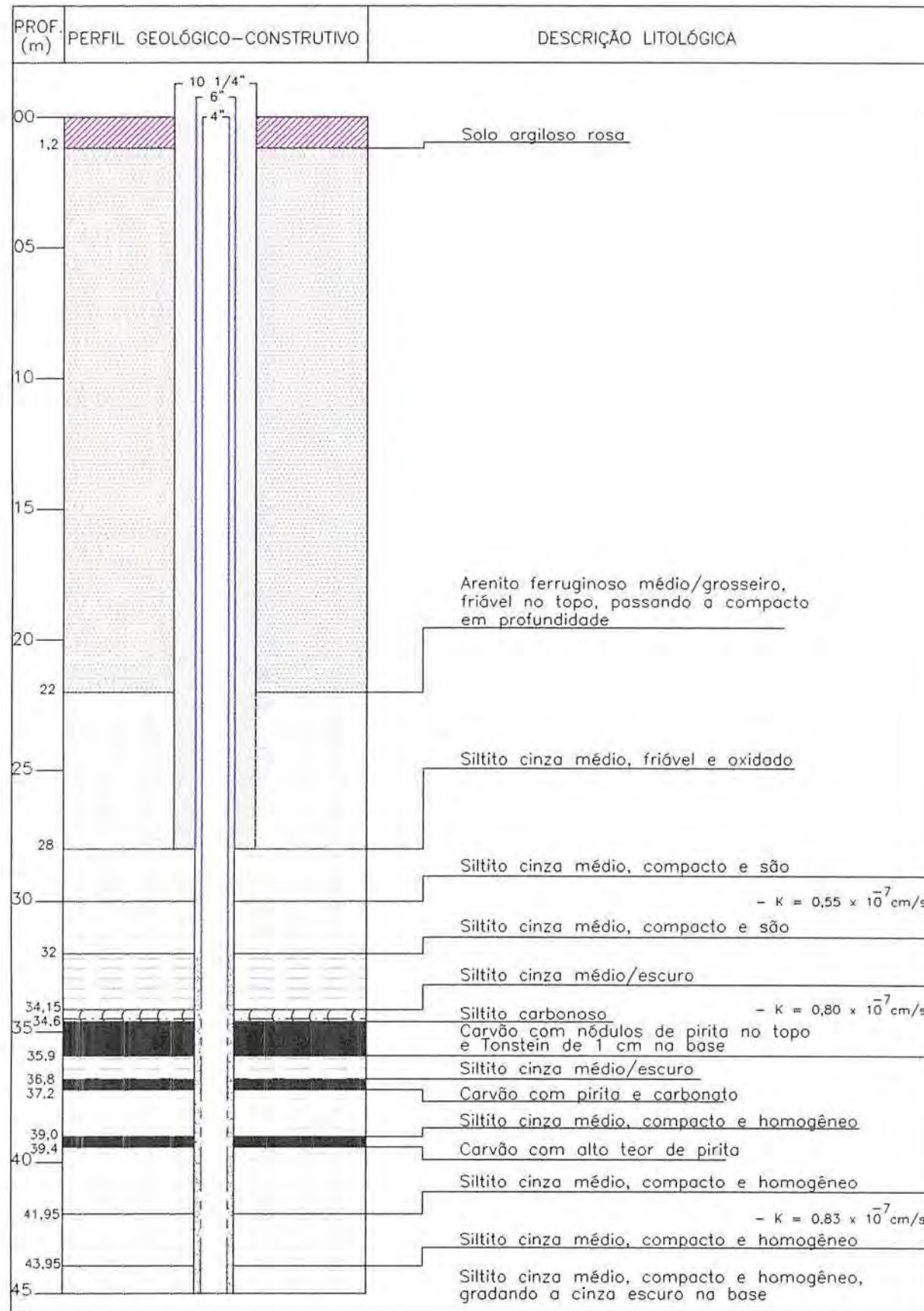
- execução do ensaio de infiltração a nível constante segundo norma (ABGE 1996), que estabelece, entre outras orientações, o prosseguimento do ensaio até que se estabeleça o regime permanente de fluxo que significa a diferença entre as medidas menor que 20%. Nesse ensaio, através da tubulação é mantida carga hidrostática constante com adição contínua de água, medindo-se o total de água adicionado por intervalo de tempo. A partir da estabilização da vazão absorvida é possível calcular o volume infiltrado em  $\text{cm}^3/\text{s}$  e por conseqüência a velocidade da água no maciço (condutividade hidráulica K).
- retirada do revestimento BW;
- prosseguimento da perfuração amostrada em diâmetro NW até o topo do intervalo seguinte de ensaio, repetindo-se o procedimento até a finalização da sondagem;
- alargamento do furo para o diâmetro de 15 cm com broca destrutiva;
- colocação de revestimentos e filtros geomecânicos (norma DIN 4925) em diâmetro de 10 cm;
- preenchimento do espaço anelar tubo-parede com pré-filtro de diâmetro de 2 a 4 milímetros;
- cimentação da porção superior do piezômetro com tamponamento e construção de base de fixação;
- esgotamento da água de perfuração existente no interior do poço com utilização de bomba submersa.

Junto a cada piezômetro profundo, foi feita a instalação de um piezômetro atravessando somente as litologias da formação Palermo seguindo a metodologia já especificada, sem a realização dos ensaios de permeabilidade já que o aterro não atingirá essa formação. Esses piezômetros objetivam o monitoramento da água subterrânea presente nessa formação. Nas áreas de bota-fora, também, foram instalados piezômetros para o monitoramento do nível do lençol freático nesse meio.

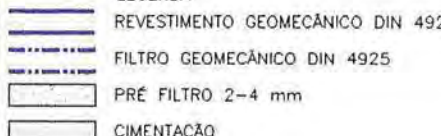
O perfil geológico-constructivo de todos os poços de monitoramento executados na área de estudo é apresentado nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25. Nessas figuras foram inseridos os resultados dos ensaios de permeabilidade executados em trechos do perfil geológico. Apresenta-se também, na Figura 4.26 o equipamento utilizado para a implantação dos poços e na Figura 4.27 sua configuração em superfície mostrando a base de fixação e caixa de proteção.

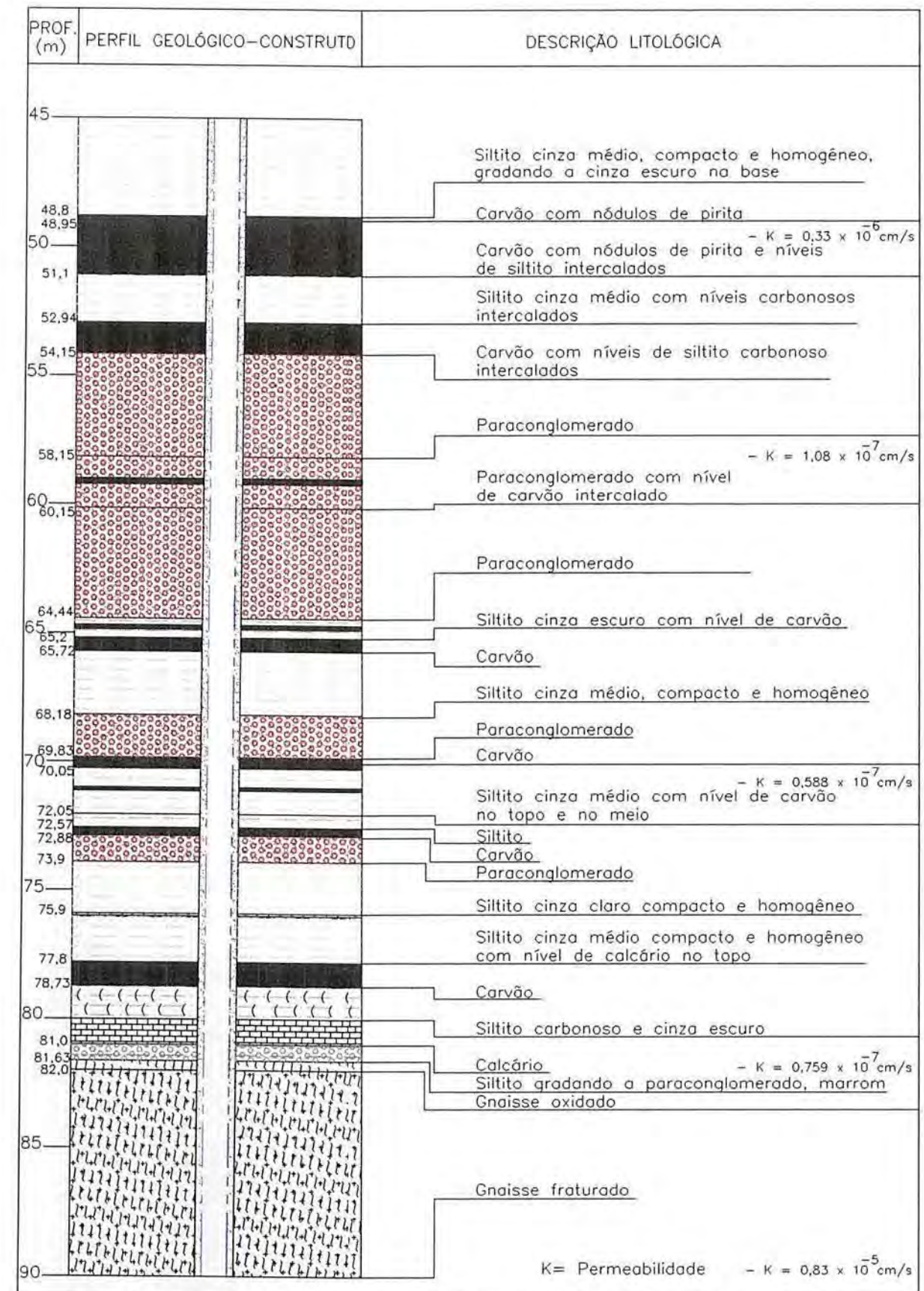


Figura 4.26: Equipamento para implantação de piezômetros com tubulação para ensaios de permeabilidade em furo de sondagem.



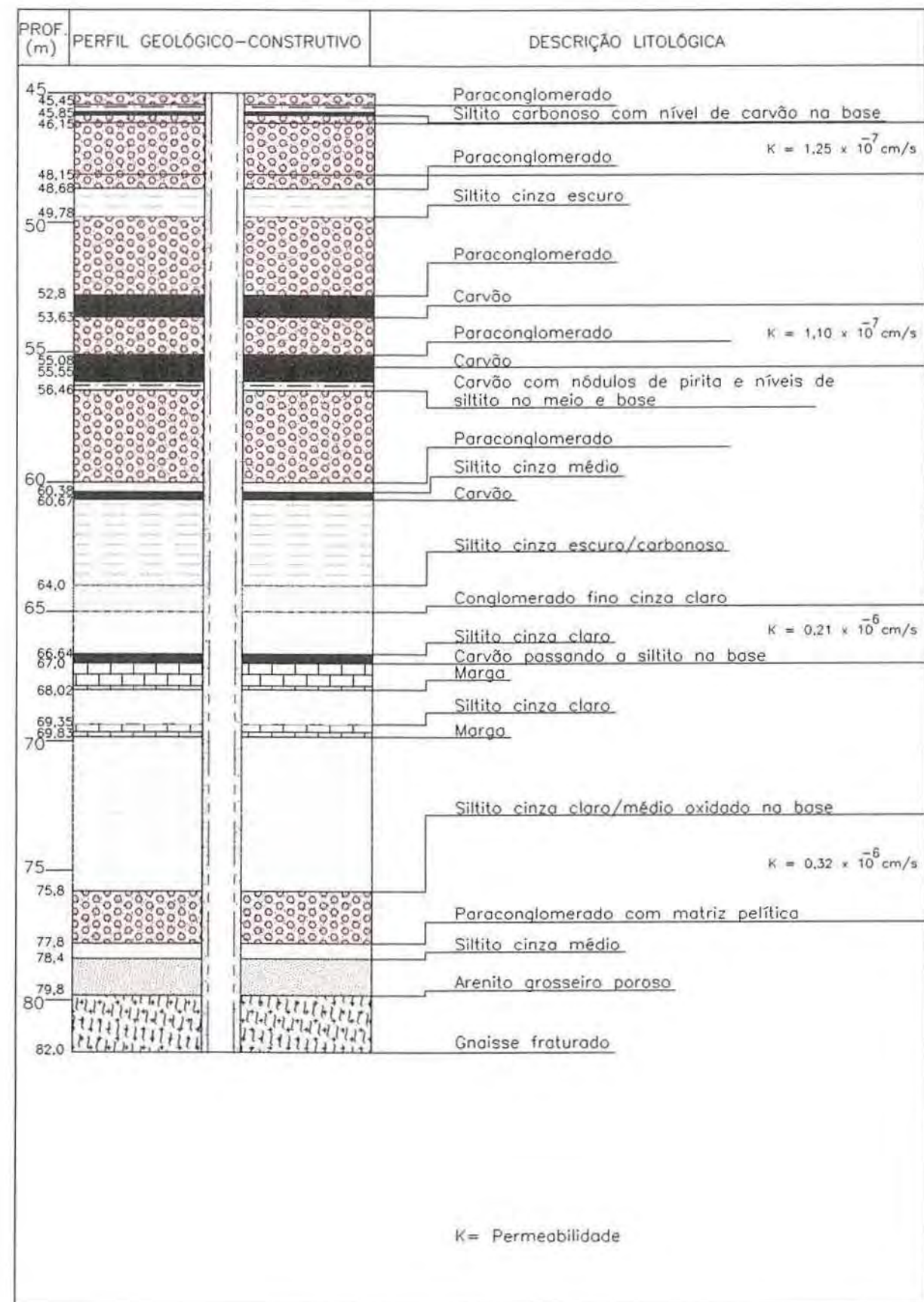
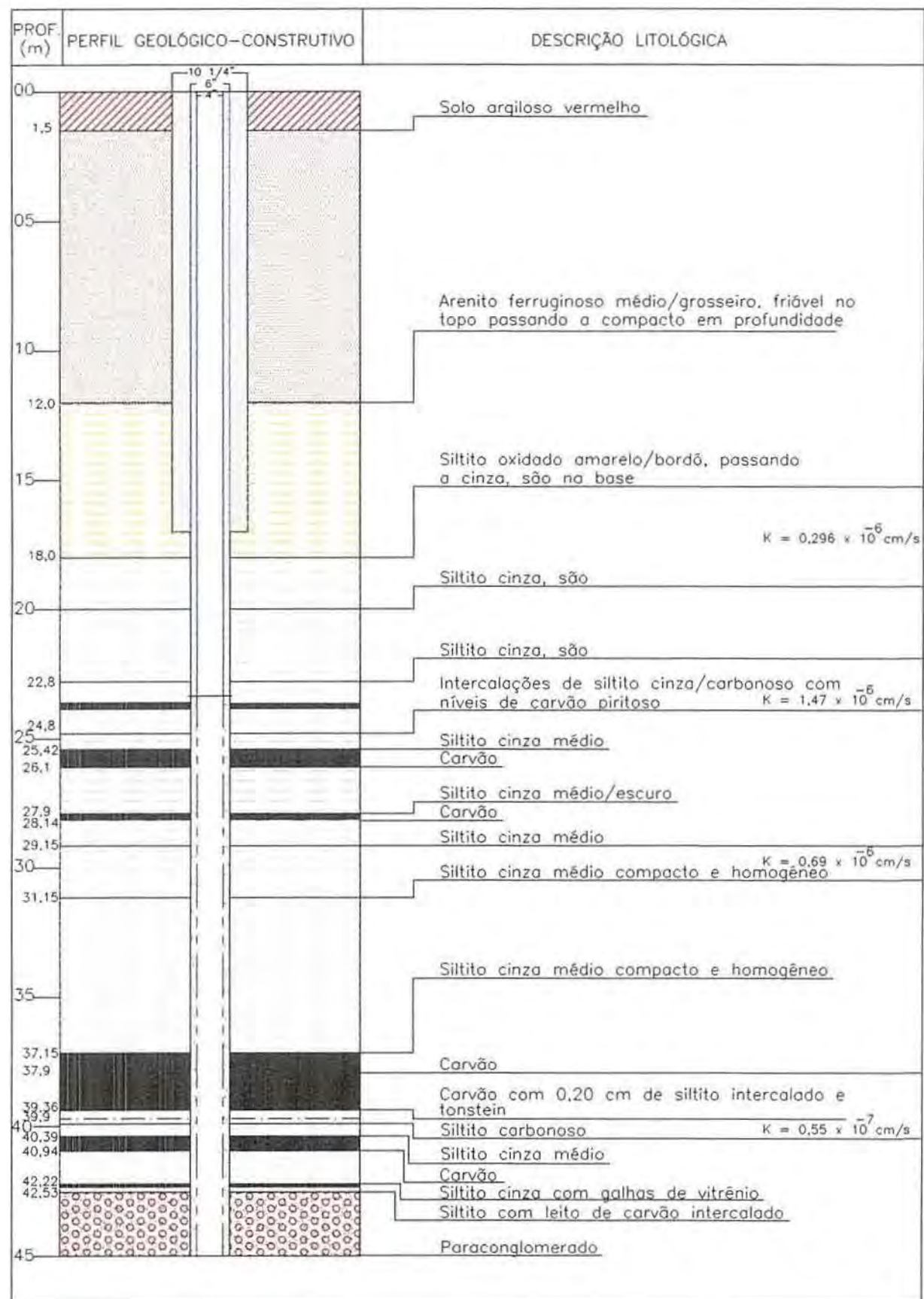
COORDENADAS: 400.948,50 m (E) INÍCIO: 24/10/98  
6.664.550,87 m (N) TÉRMINO: 10/11/98  
COTA: 112,78 m Sonda: Sullivan 22  
SONDADOR: LUIS H. F. SILVA

LEGENDA  
  
REVESTIMENTO GEOMECÂNICO DIN 4925  
FILTRO GEOMECÂNICO DIN 4925  
PRÉ FILTRO 2-4 mm  
CIMENTAÇÃO



TÍTULO DO DESENHO		
PIEZÔMETRO PZ-1P		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA	1:200	ARQUIVO C:\DISSERTACAO GUSTAVO PZ-1P
		FIGURA FIG. 4.21





COORDENADAS: 6.664.596,72 N  
401.247,83 E

INICIO: 26/11/98  
TERMINO: 04/01/99

COTA: 105,72 m  
SONDA: SULLIVAN 22

SONDADOR: LUIS H. F. SILVA

LEGENDA

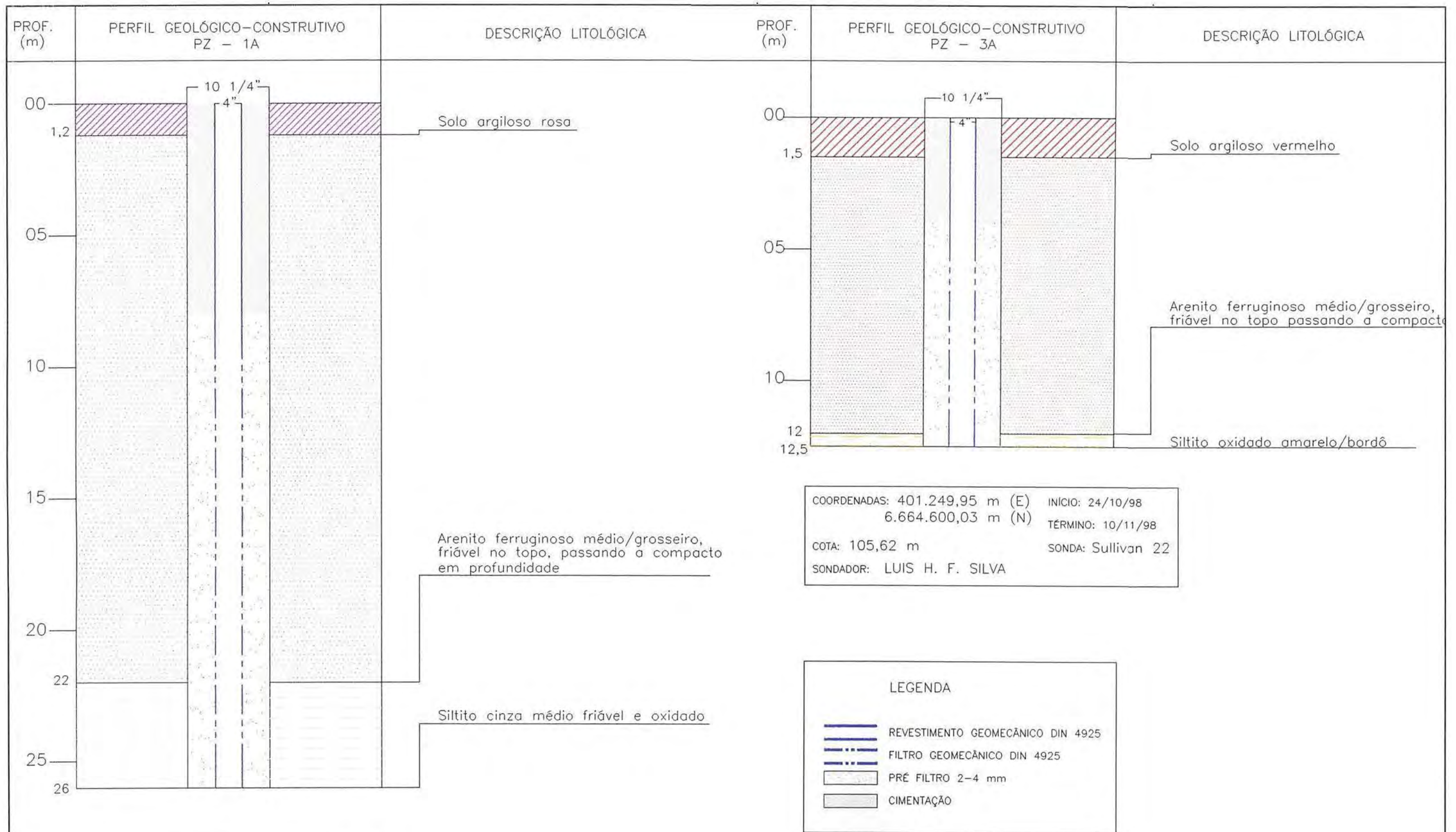
REVESTIMENTO GEOMECÂNICO DIN 4925

FILTRO GEOMECÂNICO DIN 4925

PRÉ FILTRO 2-4 mm

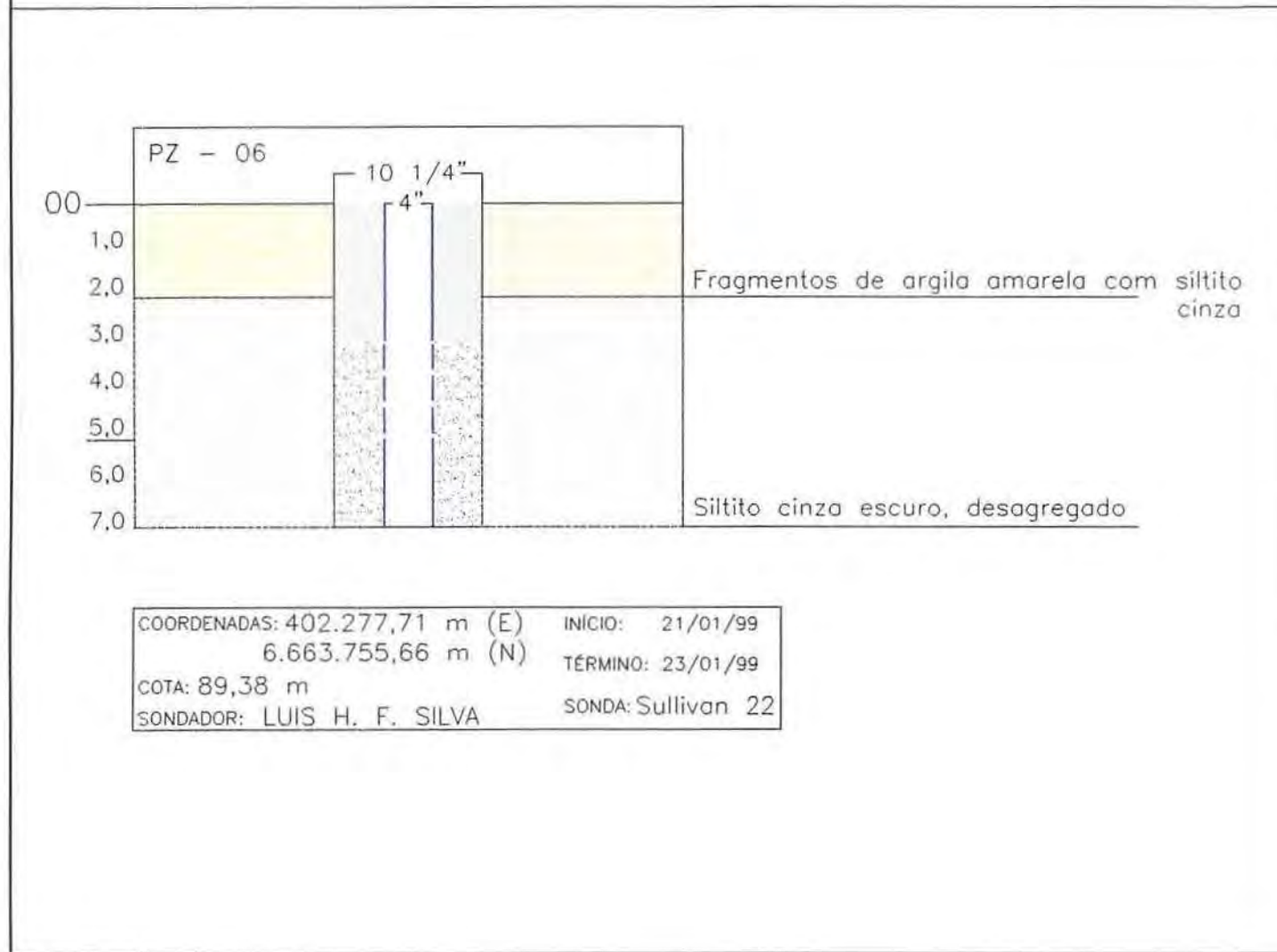
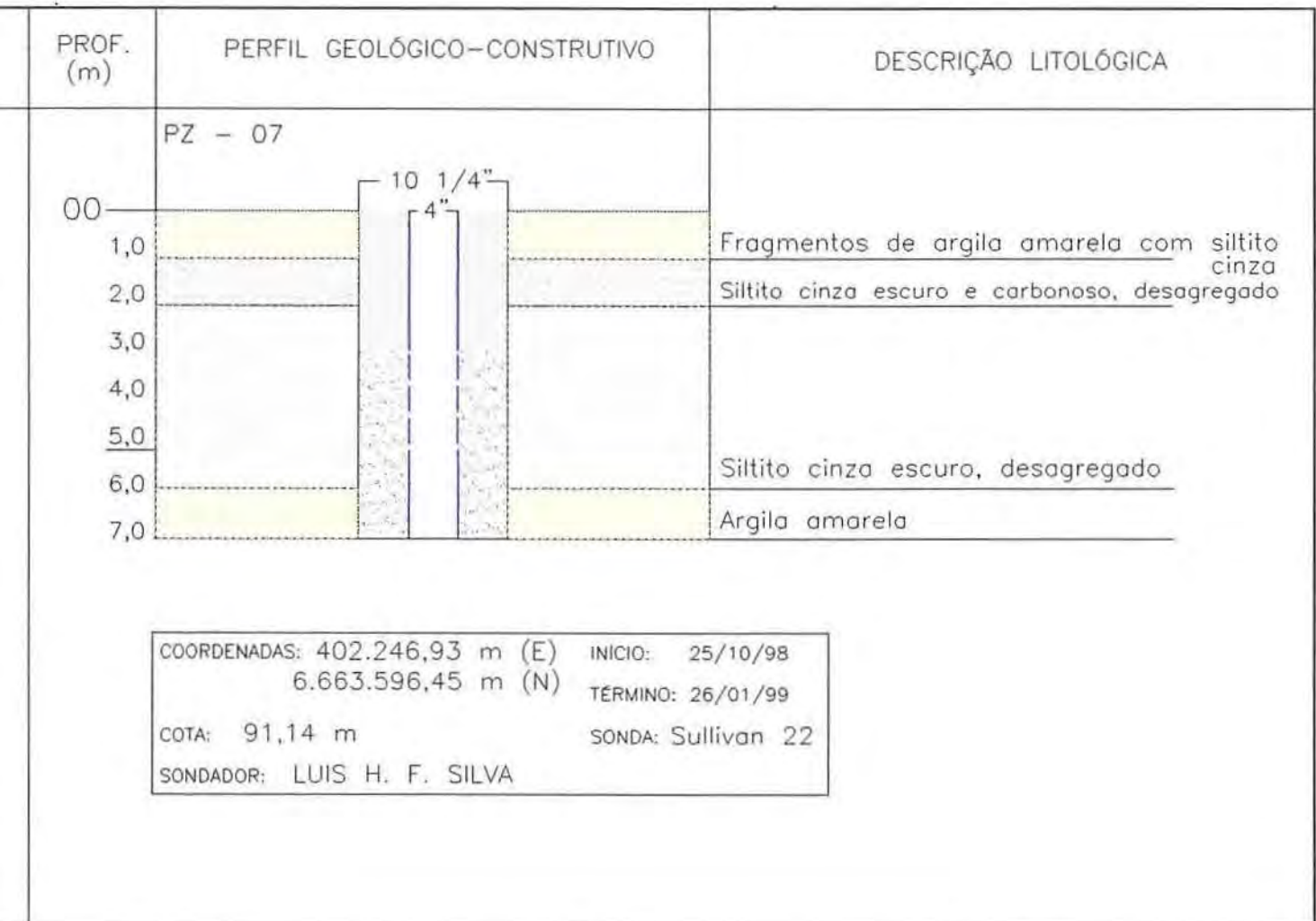
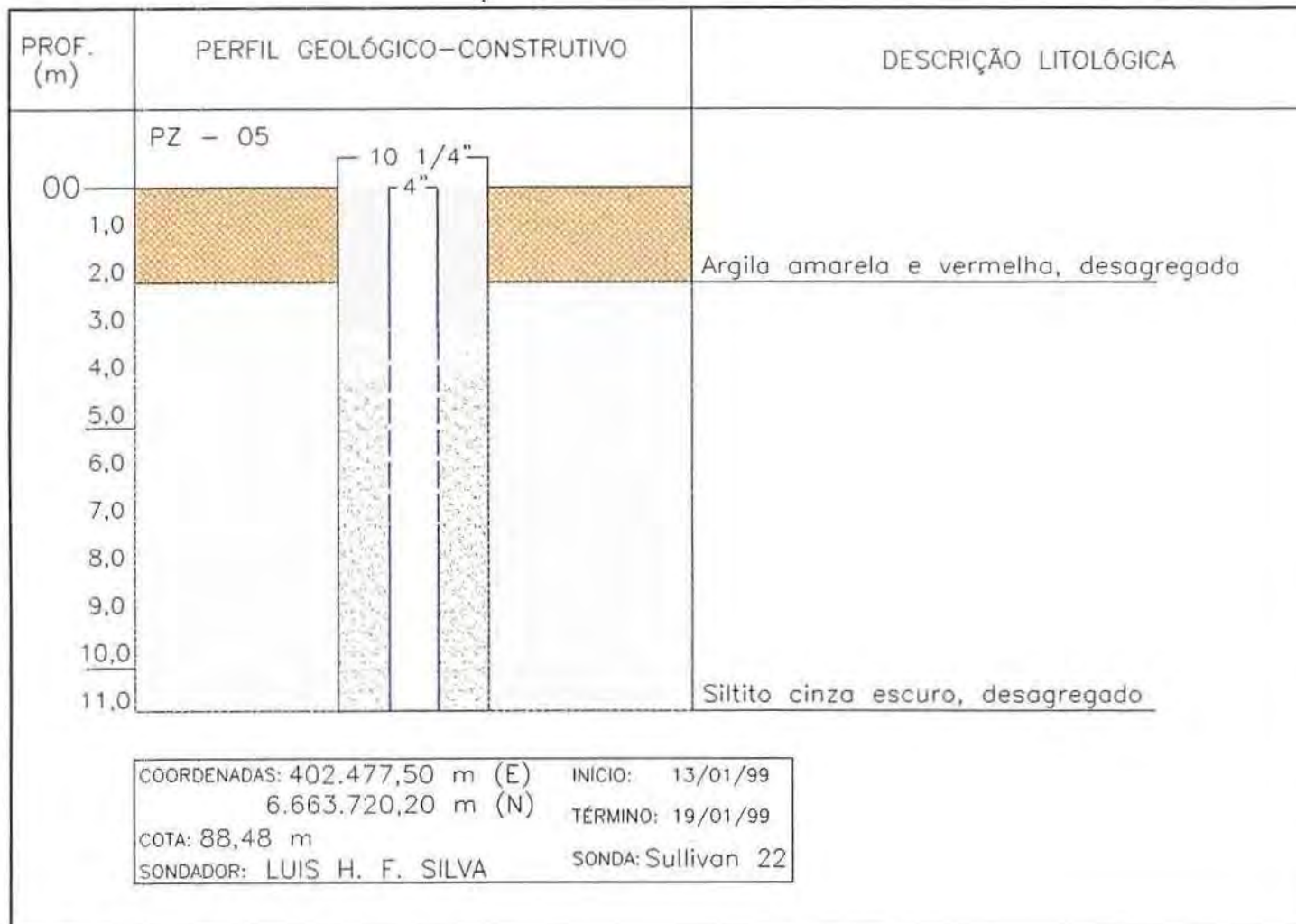
CIMENTAÇÃO

TÍTULO DO DESENHO	
PIEZÔMETRO PZ-3P	
RESPONSÁVEL	DATA
Geol Gustavo Bastiani	junho/2006
ESCALA	ARQUIVO C:\DISSERTACAO GUSTAVO
1:200	PZ-3P
FIGURA	FIGURA
	FIG. 4.22

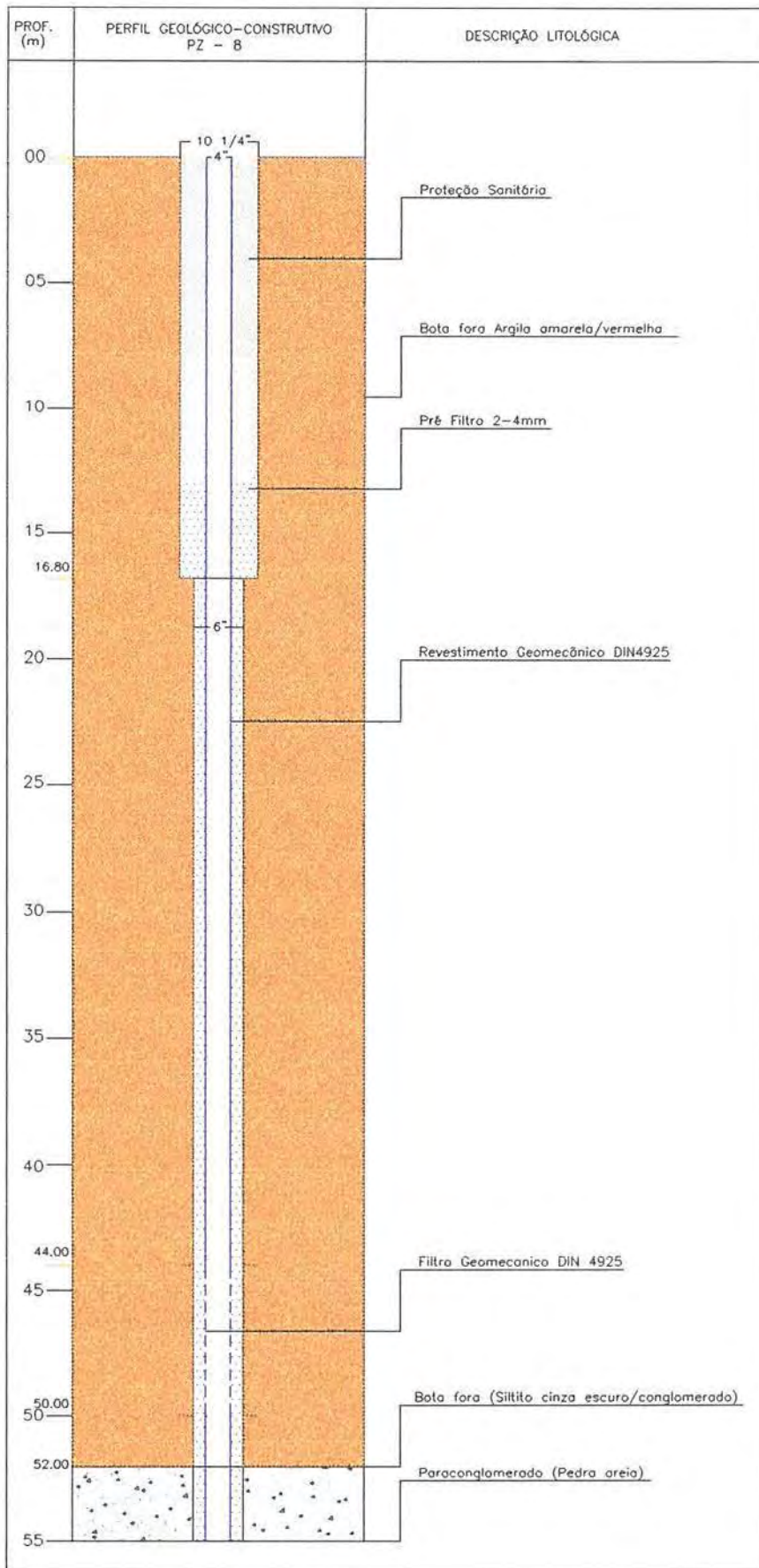


COORDENADAS: 400.946,41 m (E) INICIO: 24/10/98  
6.664.553,05 m (N) TÉRMINO: 10/11/98  
COTA: 112,67 m SONDA: Sullivan 22  
SONDADOR: LUIS H. F. SILVA

TÍTULO DO DESENHO		
PIEZÔMETRO PZ-3P		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA	1:200	ARQUIVO C:\DISSERTAÇÃO GUSTAVO PZ-1A e PZ-3A
		FIGURA FIG.4.23



TÍTULO DO DESENHO		
PIEZÔMETRO PZ-05 PZ-06 e PZ-07		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA 1:200	ARQUIVO C:\DISSERTACAO GUSTAVO PZ-05_PZ-06_PZ-07	FIGURA FIG. 4.24



COORDENADAS: 401.056,59 m (E) INICIO: 18/12/00  
 6.664.136,46 m (N) TERMINO: 12/01/01  
 COTA: 105,03 m SONDA: Sullivan 22  
 SONDADOR: LUIS H. F. SILVA

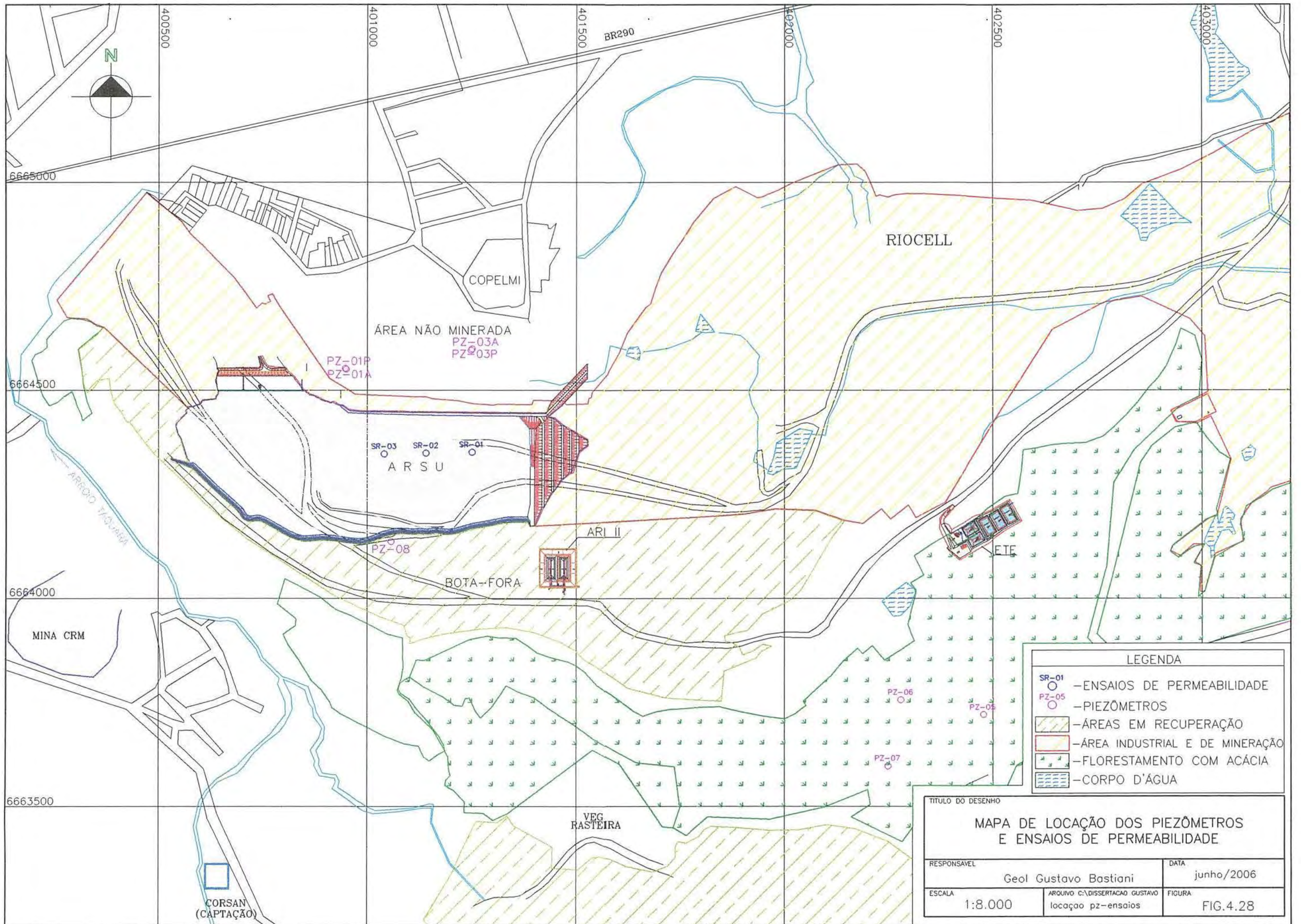
TÍTULO DO DESENHO		
PIEZÔMETRO PZ-08		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA junho/2006
ESCALA 1:75	ARQUIVO C:\DISSERTAÇÃO GUSTAVO PZ-08	FIGURA FIG. 4.25



Figura 4.27: Piezômetros de monitoramento.

Na figura 4.28 é apresentado um mapa contendo a localização de todos os piezômetros executados para a avaliação hidrogeológica e os locais de ensaios de permeabilidade in situ.

As informações apresentadas permitem a discussão dos resultados de forma a atingir os objetivos propostos, quais sejam, o diagnóstico do meio físico avaliado e sua condição para suportar a implantação do depósito de resíduos em conformidade com as normas existentes.



LEGENDA	
SR-01	- ENSAIOS DE PERMEABILIDADE
PZ-05	- PIEZÔMETROS
[Hatched Area]	- ÁREAS EM RECUPERAÇÃO
[Red Hatched Area]	- ÁREA INDUSTRIAL E DE MINERAÇÃO
[Green Hatched Area]	- FLORESTAMENTO COM ACÁCIA
[Blue Hatched Area]	- CORPO D'ÁGUA

TÍTULO DO DESENHO		
MAPA DE LOCAÇÃO DOS PIEZÔMETROS E ENSAIOS DE PERMEABILIDADE		
RESPONSÁVEL	Geol Gustavo Bastiani	DATA
ESCALA	1:8.000	junho/2006
ARQUIVO	C:\DISSERTAÇÃO GUSTAVO	FIGURA
locação pz-ensaios		FIG.4.28

# Capítulo 5

## 5 Discussão dos Resultados

A avaliação dos resultados do diagnóstico geológico, hidrogeológico e geotécnico realizado serão abordadas a seguir de forma a atingir os objetivos do presente trabalho.

### 5.1 Avaliação Geológica

A avaliação dos dados relativos à geologia da área de implantação do projeto e entorno, com base nos dados já apresentados, permite afirmar que o pacote de rochas diretamente envolvido apresenta-se homogêneo com excelente correlação entre os estratos, sem mudanças bruscas que pudessem constituir caminhos para percolação de fluidos.

Sob o ponto de vista estrutural, os falhamentos presentes são de pequeno porte, excetuando-se a falha do Leão de caráter regional que não tem influência sobre a área. Essas pequenas falhas já se encontram estabilizadas e a deformação decorrente do movimento dos blocos não gerou zonas abertas devido à plasticidade dos materiais de origem sedimentar.

Essas afirmativas podem ser feita com segurança tendo em vista a grande densidade de informações decorrentes da pesquisa geológica da área através de sondagens amostradas, em sua maioria com perfilagem geofísica e do próprio histórico da mineração.

Sinteticamente, pode-se definir que as rochas no local de implantação do aterro são siltitos e argilitos cinza com camadas de carvão intercaladas, tendo na base paraconglomerados com matriz pelítica. Outra unidade importante no contexto do projeto são os depósitos de bota-fora constituídos por siltitos e paraconglomerados intemperizados depositados a partir da descobertura das camadas de carvão, cuja caracterização baseou-se em sondagens percussivas descritas onde verifica-se um elevado grau de compactação dos materiais.

## 5.2 Avaliação Hidrogeológica

A hidrogeologia da área de implantação do projeto é governada pelas rochas pelíticas que constituem aquícludes e aquíardos, predominando o escoamento superficial. As permeabilidades calculadas nos ensaios de infiltração realizados durante a execução demonstraram valores situados entre  $10^{-6}$  e  $10^{-7}$  cm/s conforme pode ser visto nos perfis geológico-construtivos dos piezômetros PZ-1P e PZ-3P (Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24).

Os ensaios de permeabilidade realizados em sondagens rotativas no fundo da cava destinada ao aterro, evidenciaram valores em torno de  $10^{-8}$  cm/s, o que, com a espessura da ordem de 30 metros, supera as exigências normas técnicas.

A espessura desse pacote basal até os granitóides do embasamento, cujo fraturamento poderia conduzir eventuais contaminantes, situa-se em torno de 30 metros abaixo do fundo da cava, o que significa que não há risco de contaminação desse meio. Na Tabela 5.1 e Tabela 5.2 são sintetizados os resultados dos ensaios realizados nos piezômetros profundos e nas litologias presentes no fundo da cava de mineração.

Na figura 5.1 a seguir aparece em detalhe os paraconglomerados com matriz pelítica que ocorrem no fundo da cava.



Tabela 5.1: Ensaios de permeabilidade nos piezômetros profundos.

Piezômetro	Profundidade (m)	K (cm/s)	litologia
PZ 1P	30,00 - 32,00	$0,55 \times 10^{-7}$	siltitos cinza homogêneos
PZ 1P	34,15 - 36,00	$0,80 \times 10^{-7}$	carvão + siltitos cinza
PZ 1P	41,95 - 43,95	$0,83 \times 10^{-8}$	siltitos cinza homogêneos
PZ 1P	48,95 - 51,10	$0,33 \times 10^{-6}$	Carvão
PZ 1P	58,15 - 60,15	$1,08 \times 10^{-7}$	Paraconglomerados cinza
PZ 1P	70,05 - 72,05	$0,588 \times 10^{-7}$	Siltitos cinza + carvão
PZ 1P	80,00 - 82,00	$0,759 \times 10^{-7}$	Marga + siltitos
PZ 1P	89,80 - 90,00	$0,83 \times 10^{-5}$	Gnaiss fraturado
PZ 3P	18,00 - 20,00	$0,16 \times 10^{-6}$	siltitos cinza homogêneos
PZ 3P	22,80 - 24,80	$1,47 \times 10^{-6}$	siltitos cinza homogêneos
PZ 3P	29,15 - 31,15	$0,68 \times 10^{-6}$	siltitos cinza homogêneos
PZ 3P	37,90 - 39,90	$0,55 \times 10^{-7}$	Carvão
PZ 3P	46,15 - 48,15	$1,25 \times 10^{-7}$	Paraconglomerados cinza
PZ 3P	53,55 - 55,55	$1,10 \times 10^{-7}$	Paraconglomerados cinza + carvão
PZ 3P	65,00 - 67,00	$1,10 \times 10^{-7}$	siltitos cinza homogêneos
PZ 3P	75,80 - 77,80	$0,32 \times 10^{-6}$	Paraconglomerados cinza

Tabela 5.2: Ensaios de permeabilidade no fundo da cava.

Ensaio	Profundidade (m)	K (cm/s)	litologia
1	0,00 - 1,90	$0,29 \times 10^{-4}$	Paraconglomerados cinza
1	0,00 - 8,60	$0,538 \times 10^{-9}$	Paraconglomerados cinza
1	0,00 - 11,70	$0,12 \times 10^{-6}$	Paraconglomerados cinza
2	0,00 - 1,95	$0,38 \times 10^{-10}$	Paraconglomerados cinza
2	0,00 - 4,50	$0,257 \times 10^{-8}$	Paraconglomerados cinza
2	0,00 - 9,97	$0,30 \times 10^{-6}$	Paraconglomerados cinza



Figura 5.3: Paraconglomerado presente no fundo da cava de lavra avaliada.

Nos depósitos de bota-fora, as permeabilidades definidas pelos ensaios *in situ* revelaram valores entre  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$  cm/s, não havendo acúmulo de água subterrânea nesses materiais por sua constituição predominantemente pelítica e seu elevado grau de compactação. Em piezômetro executado nesse depósito (PZ 8, figura 4.25)), verificou-se que a água subterrânea acumula-se junto ao substrato rochoso da base dos depósitos que constitui uma barreira impermeável. As planilhas com todos os ensaios de permeabilidade executados são apresentadas no Anexo A.

Numa avaliação do sistema hidrogeológico existente na área minerada tem-se depósitos de bota-fora assentados sobre um substrato constituído por paraconglomerados impermeáveis com mergulho de 1 a 2° para norte. Esse sistema encontra uma barreira de direção leste-oeste de rochas impermeáveis da formação Rio Bonito representada pelo pilar de rochas pelíticas que ocorre sob a BR 290 que se assenta sobre siltitos dessa formação. Nesse modelo a água subterrânea fica confinada nos depósitos de bota-fora, cuja permeabilidade da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm/s acarreta uma saturação lenta desses materiais, predominando o escoamento superficial.

Quanto às drenagens superficiais a distância entre o empreendimento e as mesmas elimina a possibilidade de contaminação tanto do arroio Martins quanto do arroio Taquara.

### 5.3 Geotecnia

Os taludes envolvidos são representados por rochas sedimentares da formação Rio Bonito e Palermo (limite norte do depósito) e pelos depósitos de bota-fora (limite sul do depósito).

As inclinações de taludes utilizadas foram as operacionais da lavra de carvão, cuja estabilidade já foi verificada ao longo da mineração não tendo sido feita análise de estabilidade dos taludes. As inclinações médias para os taludes escavados em rochas sedimentares (talude norte) são aproximadamente 1,5V:1:00HZ o que resulta em um ângulo de inclinação em torno de 60° com bermas a cada 10 metros e drenagem. Já para os depósitos de bota-fora as inclinações que resultam em taludes estáveis são 1V:1,8 HZ, o que resulta em ângulos de aproximadamente 35°. O uso dessas inclinações tem-se mostrado suficiente para manter a estabilidade tanto no maciço quanto nos bota-foras. Pequenos escorregamentos são observados nos arenitos da Formação Palermo, os quais não apresentam riscos ao projeto do aterro.

Com respeito à presença na área de mineração de materiais aptos ao uso nas obras de impermeabilização, é importante afirmar que os solos residuais presentes nessa área são provenientes da decomposição de rochas pelíticas, o que resulta em materiais com comportamento argiloso e plasticidade média a alta.

Para a implantação de aterros de impermeabilização e formação de reservatórios para tratamento de lixiviados destacam-se, na área de mineração, as argilas arenosas vermelhas e argilas siltosas amareladas, devidamente caracterizadas nos ensaios de laboratório que incluem limites de Atterberg, análises granulométricas, ensaios de compactação e ensaios de deformação e estão no Anexo B.

Os ensaios geotécnicos de caracterização e determinação da condutividade hidráulica (coeficiente de permeabilidade) demonstraram que os solos selecionados são adequados para a construção de aterros argilosos para fins hidráulicos (impermeabilização e armazenamento de efluentes) sendo que dos citados resultados destacam-se o índice de plasticidade (IP)>10 e condutividade hidráulica dos materiais compactados  $< 1 \times 10^{-7}$  cm/s. Os ensaios de compactação por pisoteamento apresentados em anexo definiram permeabilidades entre  $4,90 \times 10^{-6}$  a  $2,39 \times 10^{-9}$  cm /s. As umidades ótimas apresentadas nos ensaios desses materiais variaram de 21 a 29% conforme pode ser visto nos gráficos das páginas 4:24, 5:24 e 6:24 do Anexo B. Sua granulometria evidenciou a predominância de materiais finos argila e silte.

Apresenta-se, na Tabela 5.3 a seguir, o resumo dos dados obtidos em laboratório referente às argilas estudadas para utilização nas obras de impermeabilização da área.

Tabela 5.3: Ensaio de laboratório das argilas existentes na Mina do Recreio.

Limites de Atterberg			
Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plast. (%)	Índice de Plast. (%)
145	44	23	21
146	73	34	39
147	64	34	30

Permeabilidade em laboratório			
Amostra	Grau de compactação (%)	K compactado (cm/s)	Umidade ótima
145	94,9	$6,21 \times 10^{-8}$	21,3
146	94,9	$2,39 \times 10^{-9}$	29,1

147	94,8	$4,90 \times 10^{-6}$	25,0
Identificação e granulometria			
145 - Argila vermelha (argila 38 %, silte 32 %, areia fina 26 %, areia média 4 %)			
146 - Argila amarela (argila 69 %, silte 21 %, areia fina 9 %, areia média %)			
147 - Argila vermelha (argila 48 %, silte 19 %, areia fina 17 %, areia média 7 %, areia grossa 6% e pedregulhos 3 %)			

Outro aspecto positivo, que ficou evidente no diagnóstico dos materiais disponíveis para a implantação do projeto, foi a homogeneidade dos horizontes geológicos, fruto da deposição sedimentar em ambiente de baixa energia, o que garante um comportamento regular das jazidas utilizadas como material de empréstimo.

A dinâmica da mineração de carvão desenvolvida paralelamente ao aproveitamento dos materiais argilosos permitiu sua utilização com umidade natural inalterada, quase sem exceção acima da umidade ótima de compactação definida nos ensaios de laboratório. Comportamento similar foi relatado na bibliografia no artigo “Composite landfill liner design with Ankara clay - Turkey (I. Met., H. Akgun - 2.005. . Segundo o mesmo autor, isso se deve ao fato que a presença da água acima da umidade ótima, mantém parte dos vazios preenchidos por bolhas de ar oclusas, o que impede a passagem da água, reduzindo, assim a permeabilidade da camada compactada. Isso implica na redução de custos, já que a aplicação desses materiais no ramo úmido da curva de compactação resulta em aterros mais homogêneos e com menor permeabilidade, objetivos esses priorizados em obras hidráulicas e aterros de resíduos.

## Capítulo 6

### 6 Conclusões, Resultados e Trabalhos Futuros

#### 6.1 Conclusões e Resultados

Os objetivos propostos pelo presente trabalho de avaliar a utilização de uma cava de mineração de carvão mineral na mina do Recreio, localizada em Minas do Leão RS, como local de disposição final de resíduos sólidos urbanos sem impactos no solo, água superficial e subterrânea em concordância com as normas ambientais foram plenamente atingidos. Esse estudo permitiu que fosse estabelecido o seguinte:

(i) a cava de mineração da Mina do Recreio e entorno demonstraram características relativas à geologia, hidrogeologia e geotecnia que possibilitam sua utilização como depósito de resíduos sólidos urbanos sem impactar os meios naturais, atendendo plenamente às normas técnicas que dispõem sobre área para disposição de resíduos sólidos;

(ii) A utilização de áreas mineradas para a implantação de aterros de resíduos é uma boa alternativa ambiental. O preenchimento de cavas de mineração com resíduos evita a degradação de novas áreas, além de permitir a recuperação das mesmas. Essas áreas normalmente possuem uma detalhada avaliação geológica proveniente dos estudos de viabilidade das jazidas, dados que são utilizados no diagnóstico geológico e hidrogeológico;

(iii) A utilização de cavas originadas da mineração de carvão no RS para a implantação de aterros de resíduos sólidos é uma opção positiva que pode ser aplicada em outras áreas.

A partir do presente estudo não é possível a generalização de que qualquer cava de mineração de carvão no estado do RS pode ser utilizada para a implantação de aterros de resíduos adotando-se o modelo da mina do Recreio, apesar de todas as minas estarem situadas na formação Rio Bonito. Essa afirmativa considera que as jazidas situadas no leste do estado, passíveis de lavra a céu aberto que são: Butiá-leão, Charqueadas (Bloco Guaíba) Arroio dos Ratos, Gravataí, Faxinal, Água Boa e Sul do Leão, localizam-se no chamado rio bonito Pelítico, no qual inexistem arenitos intercalados no pacote de lavra e que constituem aquíferos. As jazidas do Iruí, Capané e Candiota (para citar as mais expressivas da porção oeste do estado)) possuem camadas de arenitos intercalados no pacote carbonoso, os quais, por sua elevada permeabilidade armazenam e transmitem água subterrânea, constituindo caminhos para eventuais contaminantes. Dessa forma para a utilização dessas áreas para a implantação de aterros de resíduos, os cuidados com a impermeabilização das cavas devem ser maiores, os aquíferos devem ser localizados e monitorados priorizando-se os itens relativos à água subterrânea.

A interconexão dos depósitos de resíduos com as formações geológicas sotopostas, normalmente o embasamento cristalino, poderá causar danos a esse aquífero fraturado, muitas vezes utilizado em regiões de mineração de carvão para o abastecimento humano.

Outra contribuição desse trabalho é a de considerar a utilização de materiais de empréstimo (impermeabilização, regularização e cobertura de resíduos) obtidos da própria zona de mineração, evitando a degradação de novas áreas.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Com base no exposto nesse trabalho podem ser desenvolvidos estudos futuros relativos à implantação de aterros de resíduos em áreas de mineração, especialmente de carvão. Esses estudos podem focar outros aspectos relevantes, como por exemplo, a interação geoquímica entre chorume e drenagem ácida das minas e os efeitos de sua codisposição em cavas exauridas.

Outro campo de estudos refere-se a ensaios geotécnicos com siltitos da formação Rio Bonito, que são os materiais mais abundantes nas minas de carvão, visando sua aplicação como material de impermeabilização tendo em vista a escassez de argilas vermelhas nas jazidas.

Outro estudo que pode ser realizado com base no presente trabalho, é o diagnóstico das minas de carvão localizadas em fácies da formação Rio Bonito contendo arenitos, especialmente nas bacias do Iruí Capané e Candiota para a implantação de aterros de resíduos. Essas regiões poderiam ser opções para que municípios situados no entorno dessas áreas pudessem utilizar essa alternativa para seus resíduos.



## Referências Bibliográficas

- ABNT, 1995, Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos: NBR 8419, São Paulo, SP.
- ABNT, 1997, Fixa Condições Mínimas Exigíveis para Implantação e Operação de Resíduos Sólidos Não Perigosos: NBR 13896, São Paulo, SP.
- ABNT, 1997, Aterros de Resíduos não Perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação: NBR 13896, São Paulo, SP.
- ABNT, 1997, Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem: NBR 13895, São Paulo, SP.
- ABNT, 1984, Solo - Determinação do Limite de Liquidez: NBR 6459, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT, 1984, Solo - Determinação do Limite de Plasticidade: NBR 7180, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT, 1984, Solo - Análise Granulométrica: NBR 7181, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT, 1986, Amostras de Solo Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização: NBR 6457, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT, 1986, Solo - Ensaio de Compactação: NBR 7182, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT, 1987, Resíduos Sólidos- Classificação: NBR 10004, Rio de Janeiro, RJ.

- AHMED, A.M. SULAIMAN, W.N. 2001. **Evaluation of Groundwater and Soil Pollution in a Landfill Area Using Electrical Resistivity Imaging Survey.** *Environmental Management*, Vol. 28, No. 5, pp. 655-663.
- AKGUN, H. MET, I. 2005. **Composite Landfill Liner Design with Ankara Clay, Turkey.** *Environmental Geology* 47, Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, pp. 795 - 803.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1996, **Ensaio de Permeabilidade em Solos - Orientação para sua Execução no Campo**, Boletim 04 3ª Edição, São Paulo pp 01-17.
- Bear, J., 1979 - **Hydraulics of groundwater:** New York, Mac Graw-Hill Book Company, 569 p.
- CARRARO, C.; GAMERMANN, N.; EINCK, N.C.; BORTOLUZZI, C.A.; JOST, H. & PINTO, J.F. 1974. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul: Mapa nº 8.** Escala 1:1.000.000. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- CHAI, J.C. MIURA, N. 2002. **Comparing the Performance of Landfill Liner Systems.** *J. Mater Cycles Waste Managment* 4, Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, pp 135 - 142.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS NATURAIS, 1986, **Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná.** Integração Geológica e Avaliação Econômica, Vol. 1, Relatório Final.
- CORRÊA DA SILVA, Z.C. 1987. **Jazidas de Carvão no RS, Brasil.** *Anais do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, Curitiba, PR. Vol. 2, pp. 677 - 687.

- CORREA, K.C.R. 2000. **Aplicação de Caracterização Geotécnica e Geomecânica à Solução de Problemas Mineiros**.pp 49-50
- CORSON, W. H. 1993. **Manual Global de Ecologia**. Câmara Brasileira de Livros, São Paulo, SP, 330 .
- DAVIS, T. 1996. **State of New Mexico Waste Landfill Regulations**. Em: [www.weather.nmsu.edu/Teachinf\\_Material/SOIL470/landfill.html](http://www.weather.nmsu.edu/Teachinf_Material/SOIL470/landfill.html),.
- DEMIRER, G.N. YALÇIN, F. 2002. **Performance Evaluation of Landfills with the HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model: Izmit Case Study**. *Environmental Geology* 42, Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, pp. 793 - 799.
- EKPO, B.O., IBOK, U.J. & UMOH, N.D. 2000. **Geochemical Evaluation of Suitability of Sites for Hazardous Waste Disposal: A Case Study of Recent and old Waste - Disposal Sites in Calabar Municipality, SE Nigeria**. *Environmental Geology* 38 (11), Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, 9 pg.
- FATTA, D., PAPADOPOULOS, A. LOIZIDOU, M. 1999. **A Study on the Landfill Leachate and its Impact on the Groundwater Quality of the Greater Área**. *Environmental Monitoring and Assessment* 21, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 175 - 190.
- HAR Engenharia e Meio Ambiente Ltda. 1993. **Estudo Ambiental da Mina do Recreio, Minas do Leão/RS**. Vol. 1 e 2, Porto Alegre, RS. Inédito
- HAR Engenharia e Meio Ambiente Ltda. 1996. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental - EIA/RIMA da Disposição de Resíduos Urbanos na Mina do Recreio, Minas do Leão/RS**, Porto Alegre, RS. Inédito
- HOGLAND, W., MARQUES, M. NIMMERMARK, S. 2004. **Landfill Mining and Waste Characterization: A Strategy for Remediation of Contaminated Areas**. J.

- Maters Cycles Waste Management 6, Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, pp. 119 - 124.
- HUDAK, P.F. 1999. **A Method for Designing Upgradient Groundwater Monitoring Networks**. *Environmental Monitoring and Assessment* 57, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 149 - 155.
- HUDAK, P. F. 2001. **Monitoring Groundwater at Landfills Equipped with Leachate Collection Systems**. *Bulletin of Environmental, Contamination and Toxixology* 66, Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, pp. 156 - 161.
- IBE, K.M., NWANKWOR, G.I. ONYEKURU, S.O. 1999. **Assessment of Ground Water Vulnerability and its Application to the Development of Protection Strategy for the Water Supply Aquifer in Owerri, Southeastern Nigeria**. *Environmental Monitoring and Assessment* 67, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 323 -360.
- ISRADE-ALCANTARA, I.; DELGADO, O.B. CHAVEZ, A.C. 2005. **Geological Characterization and Environmental Implications of the Placement os the Morelia Dump, Michoacan, central México**. *Journal of the Air & Waste Management Association*, México.
- KARANI, P. JEWASIKIEWITZ, S.M. 2005. **Waste Management and Sustainable Development in South Africa**. *Environment, Development and Sustainability*, Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, 23 pg.
- LEE, K.K., KIM, Y.Y., CHANG, H.W. CHUNG, S.Y. 1997. **Hydrogeological Studies on the Mechanical Behavior of Landfill Gases and Leachate of the Nanjido Landfill in Seul, Korea**. *Environmental Geology* 31 (3/4), Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, 14 pg.
- LIMA, L. M. R. 1995 **Tratamento e Biorremediação**, Hemus Editora Ltda., São Paulo, SP, 265 pg.

- PEREYRA, F. RIMOLDI, H. 2003. **Geological and Enviromental Aspects of the Development of Megacities: The Case of Buenos Aires Metropolitan Area (AMBA), Argentina.** Bulletin of Enviromental, Contamination and Toxixology 62, Springer - Verlag New York Inc., New York, EUA, pp. 341 - 351.

## Anexo A: Ensaio de Permeabilidade

**ANEXO 01**  
ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

**PIEZÔMETRO PZ-1P**





















**PIEZÔMETRO PZ-3P**











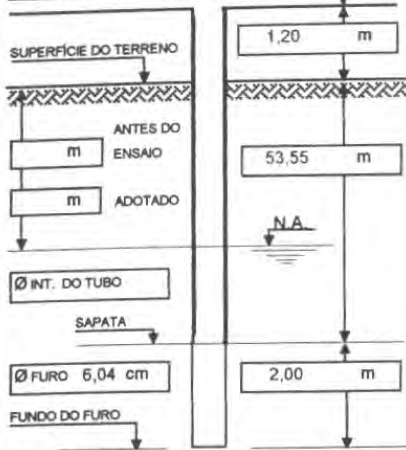


COPELMI MINERAÇÃO LTDA.

## ENSAIO DE PERMEABILIDADE

### ENSAIOS EM SONDAGEM

BOCA DO REVESTIMENTO



OBRA: PIEZÔMETROS MINA DO RECREIO

TRECHO ENSAIADO 53,55 m a 55,55 m DATA 15/12/98

#### ENSAIO REALIZADO

ABAIXO DO N.A.   
 ACIMA DO N.A.   
 COM ARTESIANISMO

#### TIPO DE ENSAIO

INFILTRAÇÃO   
 BOMBEAMENTO   
 RECUPERAÇÃO   
 REBAIXAMENTO

#### CONDIÇÕES DE MEDIDAS

REBAIXAMENTO   
 TAMBOR \_\_\_\_\_ cm  
 (Ø = \_\_\_\_\_ cm)  
 REVESTIMENTO \_\_\_\_\_ cm  
 HIDRÔMETRO \_\_\_\_\_ cm  
 PROVETA

HORA (min)	TEMPO ACUMULADO (min)	VARIAÇÃO DO N.A. (ml)	VOLUME ACUMULADO (ml)
5	5	60	60
5	10	60	120
10	20	110	230
10	30	110	340
20	50	230	570
20	70	230	800

#### CÁLCULO DE K

$$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{cu \cdot r}$$

$$Q = \frac{800 \text{ cm}^3}{70 \text{ min}} = 11,42 \text{ cm}^3/\text{min} = 0,19 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$h = 5,675 \text{ cm}$$

$$K = \frac{0,19 \text{ cm}^3/\text{s}}{5,675 \text{ cm}} \cdot \frac{1}{100 \cdot 3,02 \text{ cm}}$$

$$K = 1,10 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$$

L = 200 cm  
 r = 3,02 cm  
 h/r = 1,879  
 L/h = 0,035

COLUNA D'ÁGUA		VAZÃO	ABSORÇÃO	PE	FATOR DE CORREÇÃO	K
m	kg/cm <sup>2</sup>	(l/min)	(l / m x min)	(l / m x min x kg / cm <sup>2</sup> )		(cm / s)
						1,10 x 10 <sup>-7</sup>
OBSERVAÇÕES:				COORDENADAS: 6.664.596,72 N 401.247,83 E	ENSAIO N° 6	FURO N° PZ3 - P
Fisc.:		Resp.: Geól. Gustavo Bastiani		COTA: 105,72 m		







**ANEXO 02**

ENSAIOS DE PERMEABILIDADE NO PISO DA CAVA E BOTA-FORA















**Anexo B: Análises Granulométricas, Ensaio de Compactação e Ensaio de Deformação**

**ANEXO 03**  
ENSAIOS GEOTÉCNICOS

**ENSAIOS GEOTÉCNICOS**  
**1995**



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

PROCESSO Nº

041222

1/24

## ENSAIOS EM AMOSTRAS DE SOLO

**Cliente:** COMPEQUI - SOCIEDADE DE ENGENHARIA E  
PESQUISAS GEOLÓGICAS.

Av. Américo Baldino, 181  
96750-000 - BUTIÁ- RS

**Material ensaiado:** três amostras deformadas de solo coletadas e entregues pelo cliente, declaradas como procedentes de Minas do Recreio Butiá - RS. As amostras foram registradas no Departamento de Recursos Minerais como segue:

Identificação das Amostras	
CIENTEC	CLIENTE
145/95	Amostra 01
146/95	Amostra 02
147/95	Amostra 03

**Solicitação do Cliente:** três ensaios de permeabilidade a carga constante, três ensaios de limites de Atterberg, três ensaios de compactação na energia normal, três análises granulométricas, três ensaios de compressão triaxial (UU).

**Período de realização dos ensaios:** de 13/05/95 a 24/07/95

## RESULTADOS

### Ensaio de permeabilidade (carga constante)

Procedimento de ensaio: (baseado no trabalho de Bjerrum L. e Huder J. "Measurement of the Permeability of Compacted Clays", Proceedings of the Fourth International conf. on Soil Mec. and Found. Engineering - 1957).

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE A(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

PROCESSO Nº

041222

2/24

Os corpos-de-prova foram moldados por pisoteamento. As condições de compactação na moldagem e os resultados dos coeficientes de permeabilidade foram os seguintes:

Amostras n°	* Grau de compactação (%)	Desvio de umidade em relação à umidade ótima (%)	$K_{20^{\circ}C}$ (cm/s)
145/95	94,9	+ 0,2	$6,21 \times 10^{-8}$
146/95	94,9	+ 0,3	$2,39 \times 10^{-9}$
147/95	94,8	+ 0,3	$4,90 \times 10^{-6}$

Obs:  $K_{20^{\circ}C}$  = coeficiente de permeabilidade a 20 graus Celsius.

\*Relação entre a massa específica aparente seca ( $\gamma_s$ ) do corpo-de-prova de ensaio e massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s$  máx.) do ensaio de compactação.

#### Ensaio de limites de Atterberg

Normas utilizadas: NBR 6459/84 (limite de liquidez)

NBR 7180/84 (limite de plasticidade)

Amostra n°	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
145/95	44	23	21
146/95	73	34	39
147/95	64	34	30

Obs: as amostras foram preparadas com secagem prévia ao ar.

#### Ensaio de Compactação

Norma utilizada: NBR 7182/86 - energia normal e sem reuso de material.

As curvas de compactação obtidas e os correspondentes resultados de massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s$  máx) e umidade ótima ( $w_{ót}$ ) estão apresentados nas folhas 4/24 a 6/24.

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

PROCESSO Nº

041222

3/24

**Análises granulométricas:**

Norma utilizada: NBR 7181/84

As curvas e correspondentes composições granulométricas obtidas, bem como os resultados de massa específica dos grãos (norma NBR 6508/84), estão apresentados nas folhas 7/24 a 9/24.

**Ensaio de compressão triaxial não adensado-não drenado (UU):**

Norma utilizada: ASTM D 2850/82

São apresentados nas folhas 10/24 a 14/24 (amostra nº 145/95), 15/24 a 19/24 (amostra nº 146/95) e 20/24 a 24/24 (amostra nº 147/95), os croquis dos C.P. na ruptura, incluindo os índices físicos de ensaio, os quadros contendo as tensões confinantes ( $\sigma_3$ ) e as suas correspondentes tensão desviatória ( $\sigma_d$ ), deformação axial específica ( $\epsilon$ ) e pressão neutra ( $\mu$ ) na ruptura, bem como os parâmetros de resistência total ( $\phi$  e  $C$ ), e os gráficos representativos do comportamento do material, sob os títulos abaixo relacionados:

- Tensão Desviatória x Deformação Axial Específica ( $\sigma_d$  x  $\epsilon$ )
- Trajetórias de Tensões Totais ( $p$  x  $q$ )
- Envoltória de Pressão Total ( $\tau$  x  $\sigma$ ).

Obs: os corpos-de-prova foram saturados por contra-pressão.

Porto Alegre, - 9.7.95

Geól. Luiz Zorzi  
Gerente do Departamento de  
Recursos Minerais

Eng. Civil José Eduardo C. Mallmann  
Cart. nº 4449-D/CREA-PA-AP  
CREA-RS VISTO nº 84001  
Técnico Responsável

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



ENSAIO:

COMPACTAÇÃO

153013

AMOSTRANº

145/95

TÉCNICO RESPONSÁVEL:

DATA:

Jun/95

PROCESSO Nº

041222

4/24

Massa Específica Apparente Seca (kg/m<sup>3</sup>)

1620  
1600  
1580  
1560  
1540  
1520  
1500

17 19 21 23 25 27

UMIDADE (%)

$\rho_{s\max} = 1610 \text{ kg/m}^3$   
 $w_{opt} = 24.3\%$



COMPACTAÇÃO  
TÉCNICO RESPONSÁVEL:

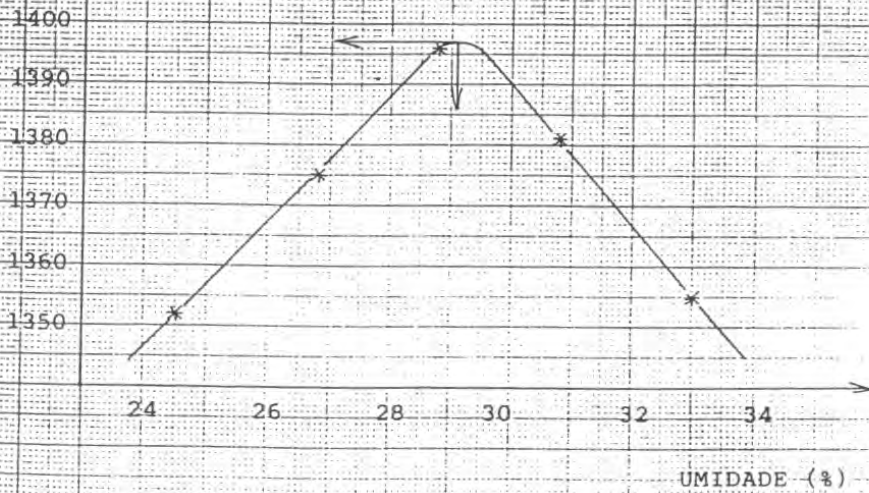
153013

DATA:  
Jun/95

AMOSTRANº  
146/95  
PROCESSIONº  
41222

5/24

Massa Específica Aparente Seda (kg/m<sup>3</sup>)



*[Handwritten signature]*





COMPACTAÇÃO  
TÉCNICO RESPONSÁVEL:

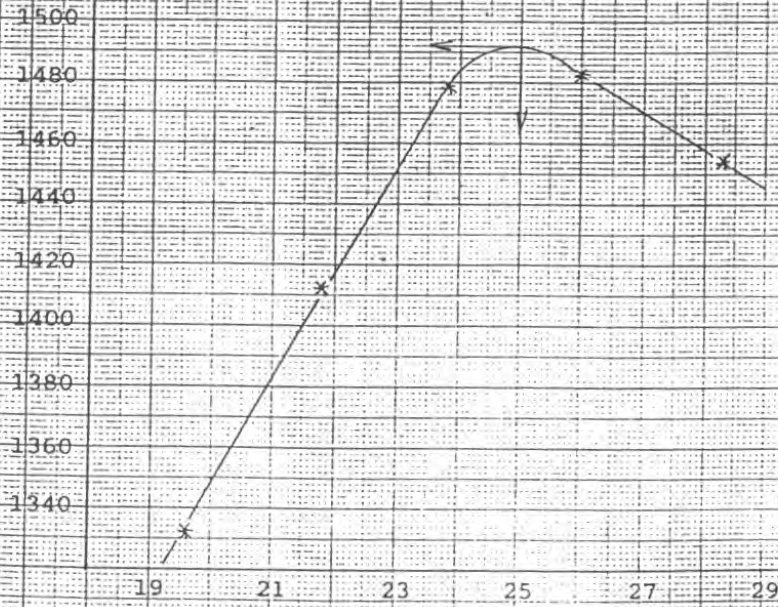
153013

DATA: Jun/95

AMOSTRA Nº  
147/95  
PROCESSO Nº  
041222

6/24

Massa Específica Aparente Seca ( $\text{kg/m}^3$ )



UMIDADE (%)



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

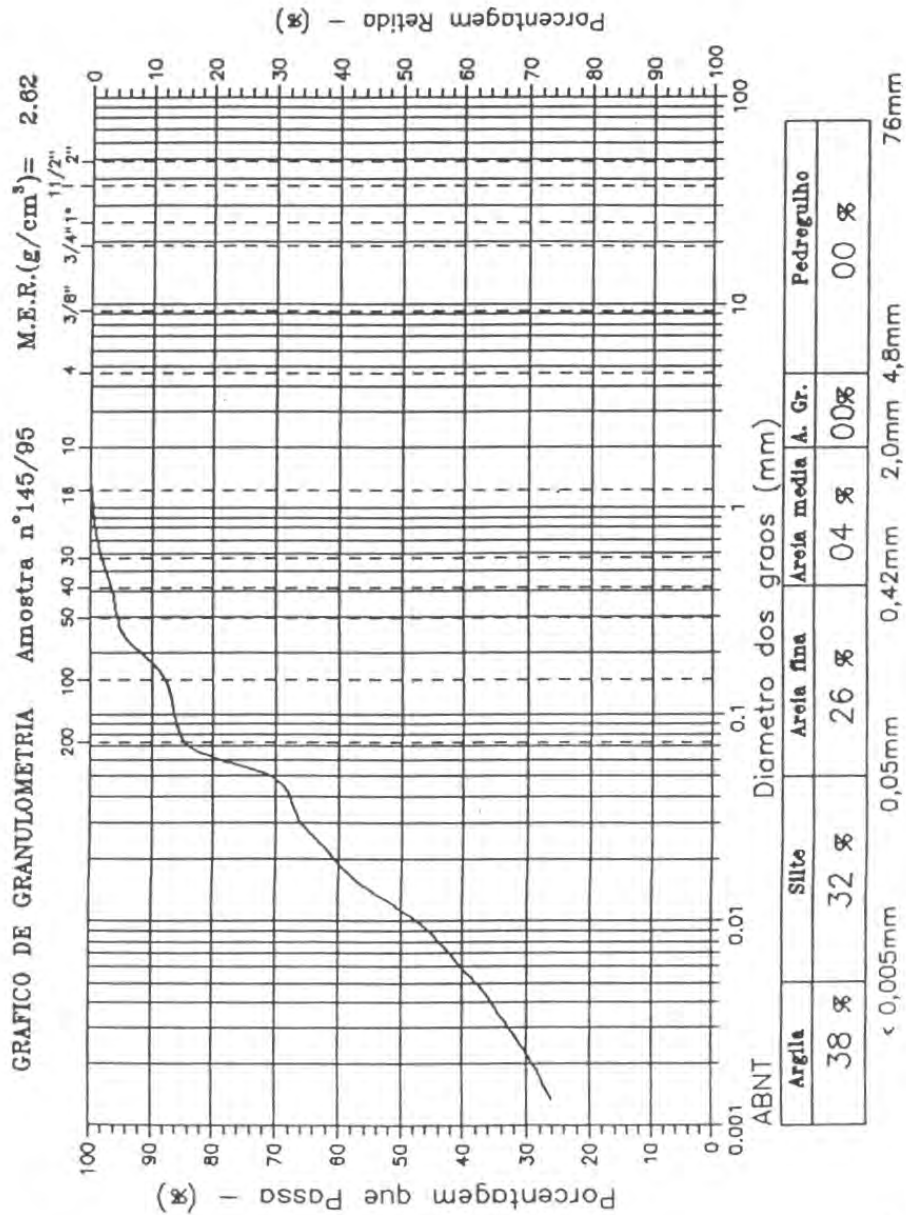
NÚMERO

153013

PROCESSO N.

041222

7/24

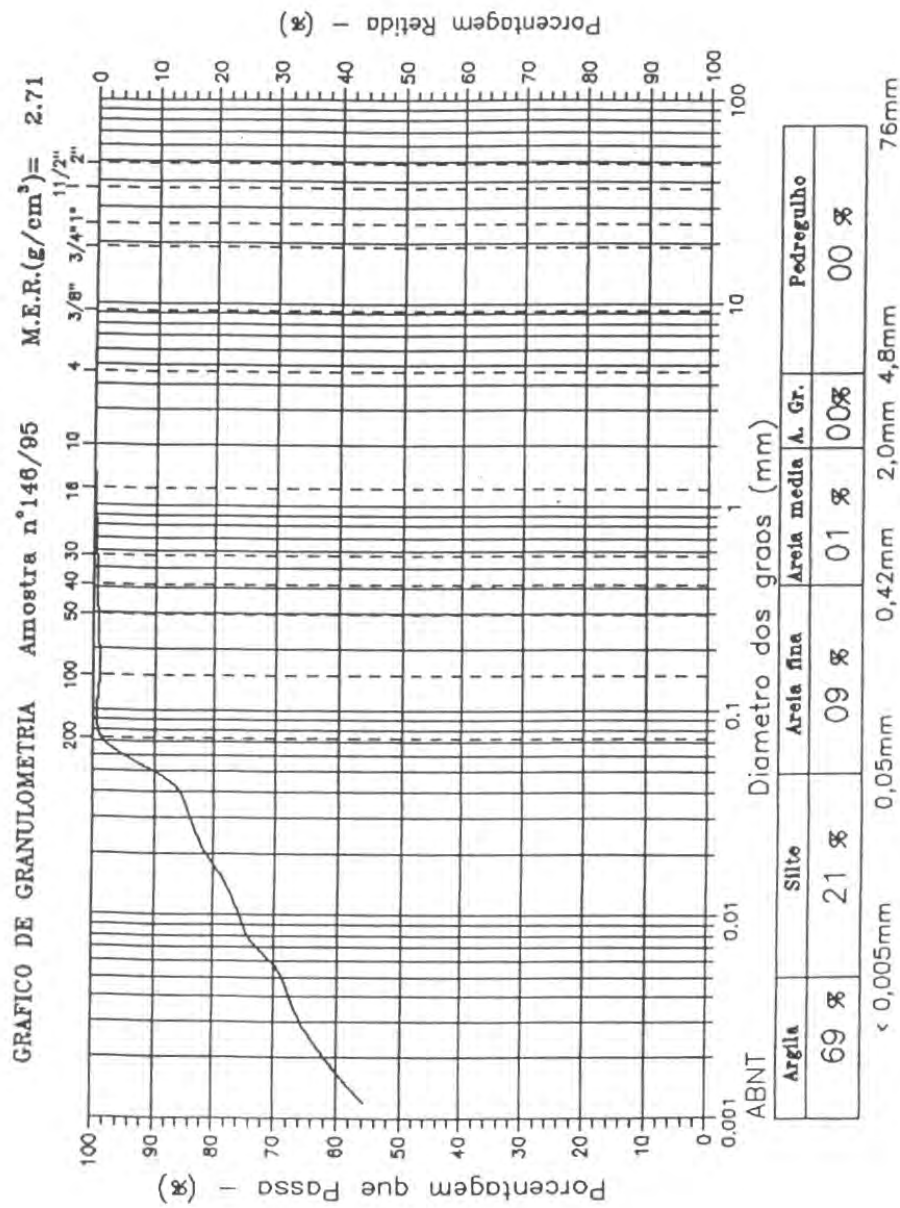


*Handwritten signature*

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE A(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



8/24



OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

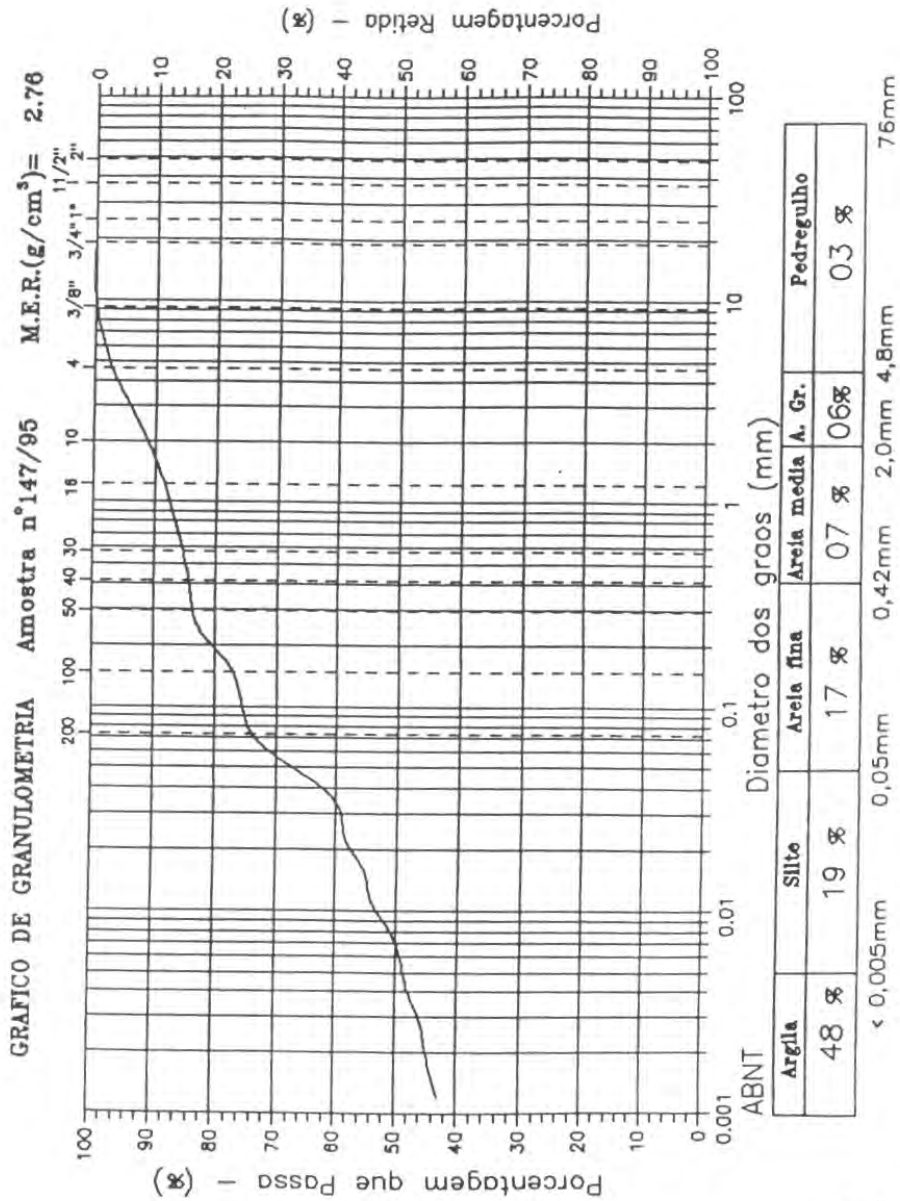
NÚMERO

153013

PROCESSO N.

041222

9/24



OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE A(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO	NÚMERO	PROCESSO Nº
RELATÓRIO	153013	041222

10/24

AMOSTRA Nº 145/95

CROQUI APÓS A RUPTURA E ÍNDICES FÍSICOS DOS CORPOS-DE-PROVA  
ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL NÃO ADENSADO-NÃO DRENADO (UU)

<p>C.P. 01 <math>\Rightarrow \sigma_3 = 0,5 \text{ kgf/cm}^2</math> ÍNDICES FÍSICOS</p> <p>h = 21,1 %      e = 0,71  <math>\Delta h = -0,2 \%</math>      S = 78,0 %  <math>\gamma_s = 1,533 \text{ g/cm}^3</math>      <math>h_{sat} = 26,9 \%</math>  GC = 95,2 %      <math>S_{sat} = 99,3 \%</math>  <math>\delta = 2,62 \text{ g/cm}^3</math></p>	
<p>C.P. 02 <math>\Rightarrow \sigma_3 = 1,0 \text{ kgf/cm}^2</math> ÍNDICES FÍSICOS</p> <p>h = 21,0 %      e = 0,71  <math>\Delta h = -0,3 \%</math>      S = 77,6  <math>\gamma_s = 1,533 \text{ g/cm}^3</math>      <math>h_{sat} = 27,5 \%</math>  GC = 95,2 %      <math>S_{sat} = 100 \%</math>  <math>\delta = 2,62 \text{ g/cm}^3</math></p>	
<p>C.P. 03 <math>\Rightarrow \sigma_3 = 2,0 \text{ kgf/cm}^2</math> ÍNDICES FÍSICOS</p> <p>h = 21,1 %      e = 0,71  <math>\Delta h = -0,2 \%</math>      S = 78,0 %  <math>\gamma_s = 1,533 \text{ g/cm}^3</math>      <math>h_{sat} = 26,8 \%</math>  GC = 95,2 %      <math>S_{sat} = 98,8 \%</math>  <math>\delta = 2,62 \text{ g/cm}^3</math></p>	
<p>--- CROQUI DO C.P. APÓS MOLDAGEM  — CROQUI DO C.P. APÓS RUPTURA</p>	

*Handwritten signature*

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

PROCESSO Nº

041222

11/24

AMOSTRA Nº 145/95

T. CONFINANTE ( $\sigma_3$ ) kN/m <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	T. DESVIATÓRIA MÁXIMA ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) = $\sigma_d$ kN/m <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	DEF. AXIAL ESPEC. NA RUPTURA $\epsilon$ (%)
50,0 (0,50)	86,1 (0,86)	11,22
100,0 (1,00)	96,0 (0,96)	9,94
200,0 (2,00)	113,3 (1,13)	7,69

1 kgf/cm<sup>2</sup> = 100 kN/m<sup>2</sup>

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA TOTAL AO  
CISALHAMENTO

ÂNGULO DE ATRITO INTERNO = 4,7 graus

COESÃO = 36,0 KN/m<sup>2</sup> (0,36 Kgf/cm<sup>2</sup>)

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.





TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

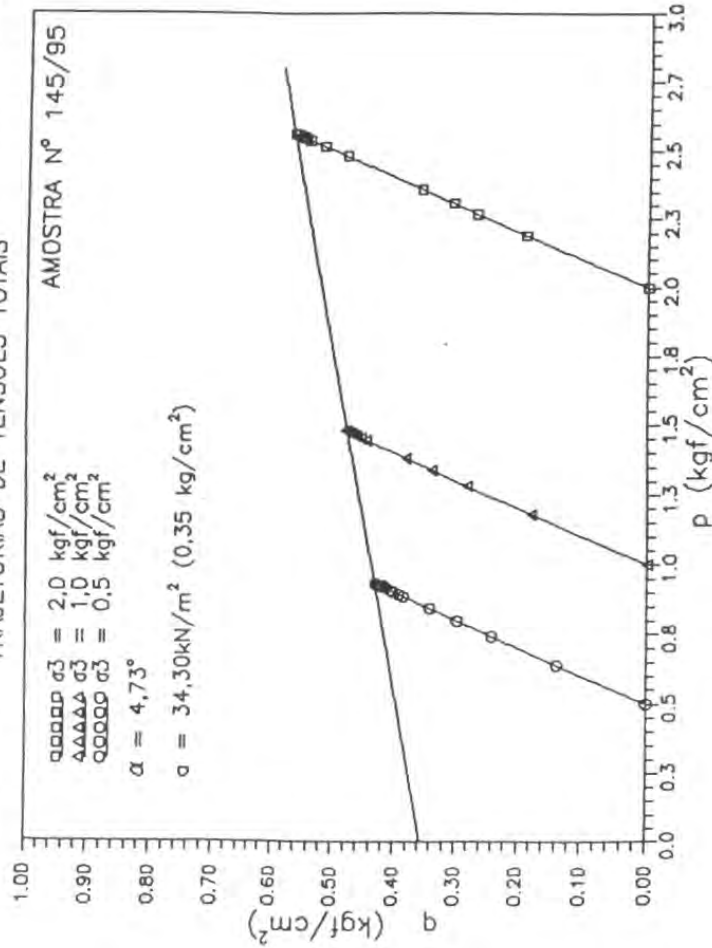
PROCESSO N.

041222

13/24

### ENSAIO TRIAXIAL NAO ADENSADO-NAO DRENADO (UU)

TRAJETORIAS DE TENSOES TOTAIS



OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.





TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

PROCESSO N.

041222

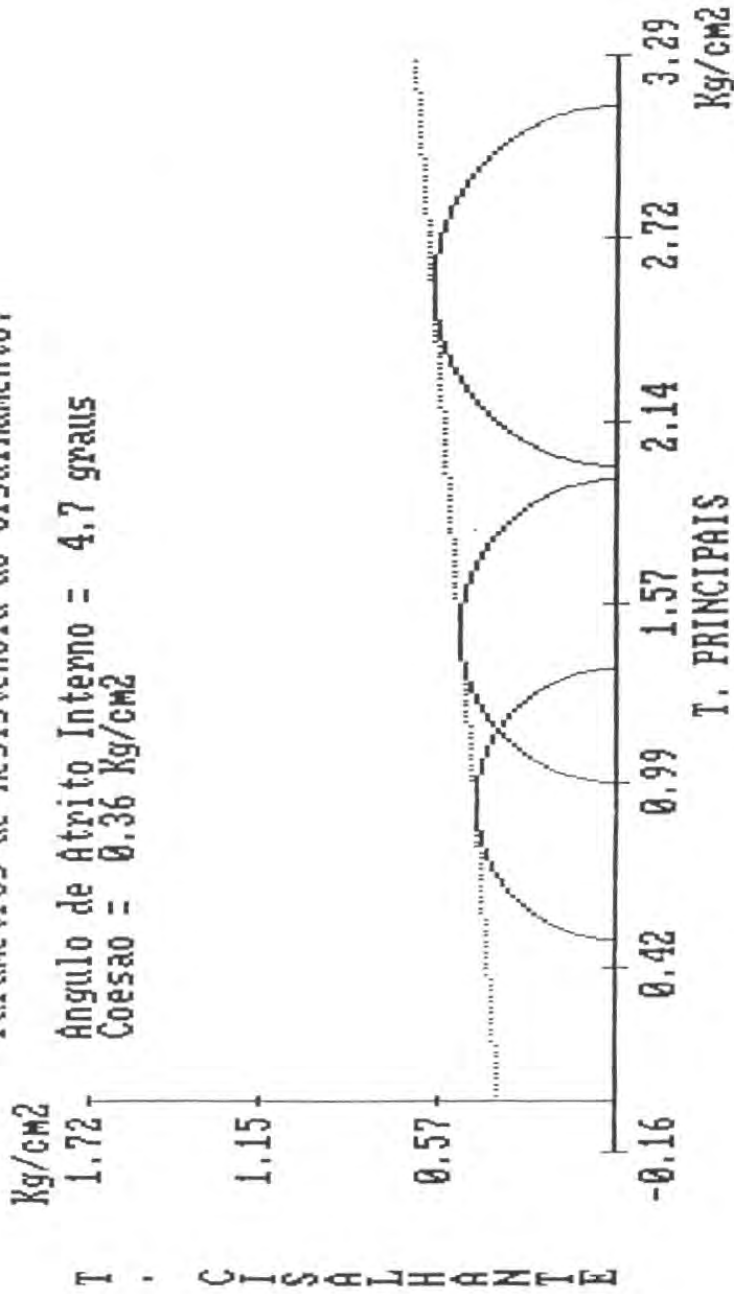
14/24

TENSOES TOTAIS AMOSTRA 145/95

Parametros de Resistencia ao Cisalhamento:

Angulo de Atrito Interno = 4,7 graus

Coesao = 0.36 Kg/cm<sup>2</sup>



*[Handwritten signature]*

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE A(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO <b>RELATÓRIO</b>	NÚMERO <b>153013</b>	PROCESSO Nº <b>041222</b>
---------------------------------------	-------------------------	------------------------------

15/24

AMOSTRA Nº 146/95

CROQUI APÓS A RUPTURA E ÍNDICES FÍSICOS DOS CORPOS-DE-PROVA  
ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL NÃO ADENSADO-NÃO DRENADO (UU)

<p>C.P. 01 ⇔ <math>\sigma_3 = 0,5 \text{ kgf/cm}^2</math> ÍNDICES FÍSICOS</p> <p>h = 28,8 %      e = 1,04  <math>\Delta h = -0,3 \%</math>      S = 75,0 %  <math>\gamma_s = 1,329 \text{ g/cm}^3</math>      <math>h_{sat} = 44,5 \%</math>  GC = 95,1 %      <math>S_{sat} = 100 \%</math>  <math>\delta = 2,71 \text{ g/cm}^3</math></p>	
<p>C.P. 02 ⇔ <math>\sigma_3 = 1,0 \text{ kgf/cm}^2</math> ÍNDICES FÍSICOS</p> <p>h = 29,0 %      e = 1,04  <math>\Delta h = -0,1 \%</math>      S = 75,6 %  <math>\gamma_s = 1,329 \text{ g/cm}^3</math>      <math>h_{sat} = 44,5</math>  GC = 95,1 %      <math>S_{sat} = 100 \%</math>  <math>\delta = 2,71 \text{ g/cm}^3</math></p>	
<p>C.P. 03 ⇔ <math>\sigma_3 = 2,0 \text{ kgf/cm}^2</math> ÍNDICES FÍSICOS</p> <p>h = 29,0 %      e = 1,04  <math>\Delta h = -0,1 \%</math>      S = 75,6 %  <math>\gamma_s = 1,328 \text{ g/cm}^3</math>      <math>h_{sat} = 44,5</math>  GC = 95,0 %      <math>S_{sat} = 100\%</math>  <math>\delta = 2,71 \text{ g/cm}^3</math></p>	
<p>--- CROQUI DO C.P. APÓS MOLDAGEM  — CROQUI DO C.P. APÓS RUPTURA</p>	

*[Handwritten signature]*

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.

Rua Washington Luiz, 675 - Caixa Postal 1254 - CEP 90010-460 - Porto Alegre/RS - Brasil - Fone (051) 221-4688 - Fax (051) 226 0207 - CGC - MF 92816685 0001.67



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

PROCESSO N.º

041222

16/24

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL (UU)

AMOSTRA N.º 146/95

T. CONFINANTE ( $\sigma_3$ ) kN/m <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	T. DESVIATÓRIA MÁXIMA ( $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_d$ ) KN/m <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	DEF. AXIAL ESPEC. NA RUPTURA $\epsilon$ (%)
50,0 (0,50)	33,7 (0,34)	13,78
100,0 (1,00)	44,2 (0,44)	11,86
200,0 (2,00)	54,5 (0,54)	11,22

1 kgf/cm<sup>2</sup> = 100 kN/m<sup>2</sup>

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA TOTAL AO  
CISALHAMENTO

ÂNGULO DE ATRITO INTERNO = 2,9 graus

COESÃO = 16,0 KN/m<sup>2</sup> (0,16 kgf/cm<sup>2</sup>)

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

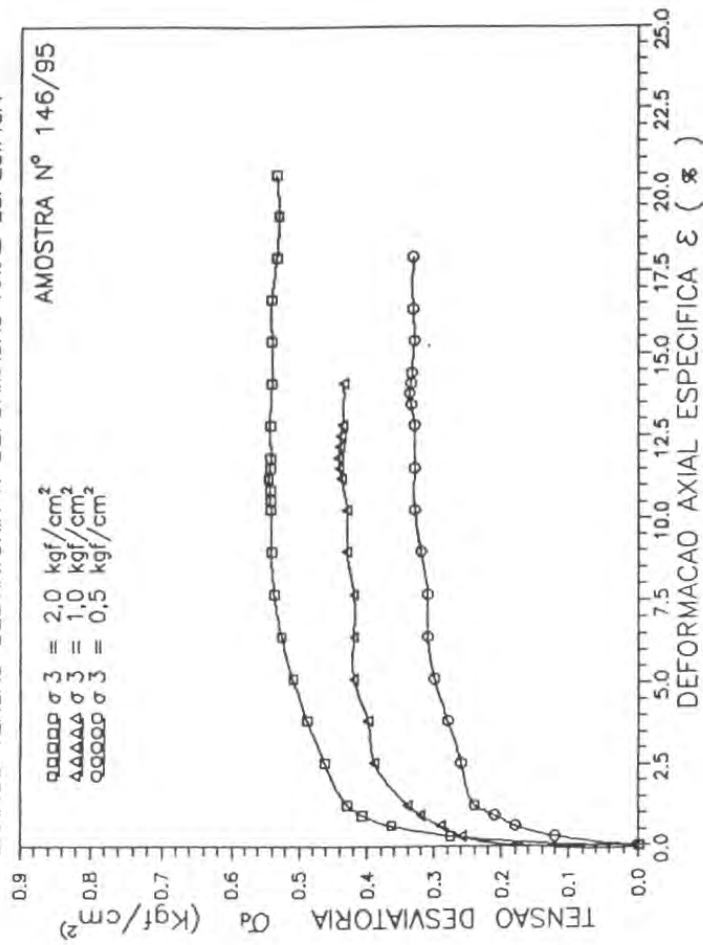
PROCESSO N.

041222

17/24

ENSAIO TRIAXIAL NÃO ADENSADO-NÃO DRENADO (UU)

GRÁFICO TENSÃO DESVIATORIA X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA



*[Handwritten signature]*

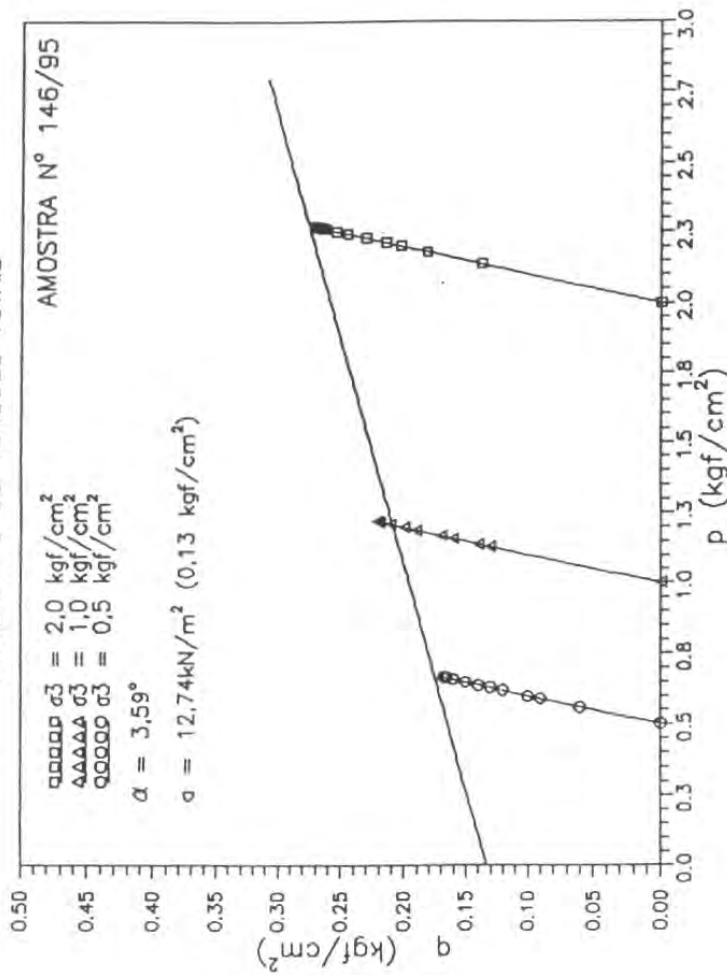
OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO	NÚMERO	PROCESSO N.º
RELATÓRIO	153013	041222

18/24

ENSAIO TRIAXIAL NÃO ADENSADO-NÃO DRENADO (UU)  
TRAJETÓRIAS DE TENSOES TOTAIS



*Handwritten signature*

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE A(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S). E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS EM ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

PROCESSO N.

041222

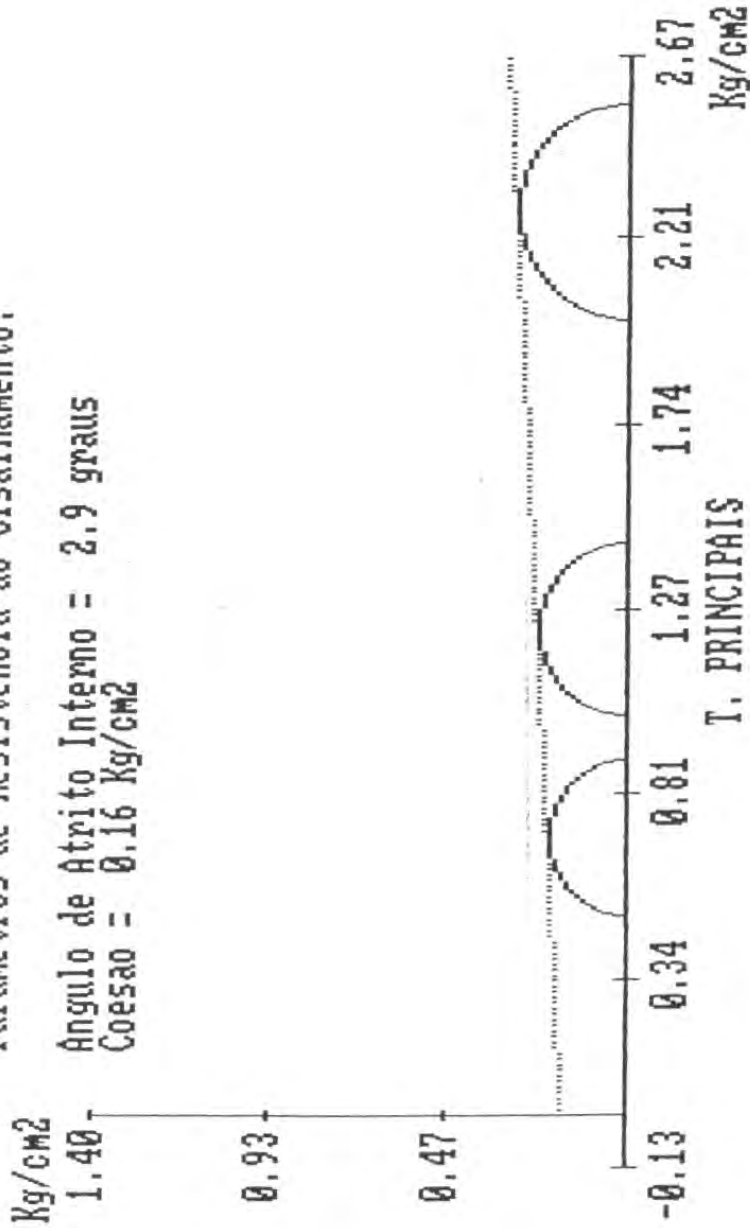
19/24

TENSOES TOTAIS AMOSTRA 146/95

Parametros de Resistencia ao Cisalhamento:

Angulo de Atrito Interno = 2.9 graus

Coesao = 0.16 Kg/cm<sup>2</sup>



T - CISALHANTE

*[Handwritten signature]*



TIPO DE DOCUMENTO	NÚMERO	PROCESSO Nº
RELATÓRIO	153013	041222

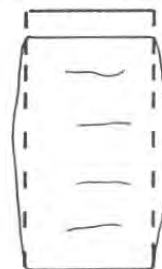
20/24

AMOSTRA Nº 147/95

CROQUI APÓS A RUPTURA E ÍNDICES FÍSICOS DOS CORPOS-DE-PROVA  
ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL NÃO ADENSADO-NÃO DRENADO (UU)

C.P. 01  $\Rightarrow \sigma_3 = 0,5 \text{ kgf/cm}^2$   
ÍNDICES FÍSICOS

$h = 24,9 \%$        $e = 0,95$   
 $\Delta h = -0,1 \%$        $S = 72,7 \%$   
 $\gamma_s = 1,419 \text{ g/cm}^3$        $h_{sat} = 33,9 \%$   
 $GC = 95,1 \%$        $S_{sat} = 98,5 \%$   
 $\delta = 2,76 \text{ g/cm}^3$



C.P. 02  $\Rightarrow \sigma_3 = 1,0 \text{ kgf/cm}^2$   
ÍNDICES FÍSICOS

$h = 25,2 \%$        $e = 0,95$   
 $\Delta h = +0,2 \text{ g/cm}^3$        $S = 73,1 \%$   
 $\gamma_s = 1,414 \text{ g/cm}^3$        $h_{sat} = 34,2$   
 $GC = 94,8 \%$        $S_{sat} = 99,4$   
 $\delta = 2,76 \text{ g/cm}^3$



C.P. 03  $\Rightarrow \sigma_3 = 2,0 \text{ kgf/cm}^2$   
ÍNDICES FÍSICOS

$h = 25,3 \%$        $e = 0,95$   
 $\Delta h = +0,3 \%$        $S = 73,2 \%$   
 $\gamma_s = 1,412 \text{ g/cm}^3$        $h_{sat} = 34,2 \%$   
 $GC = 94,7 \%$        $S_{sat} = 99,4 \%$   
 $\delta = 2,76 \text{ g/cm}^3$



--- CROQUI DO C.P. APÓS MOLDAGEM

— CROQUI DO C.P. APÓS RUPTURA

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO	RELATÓRIO	NÚMERO	153013	PROCESSO Nº	041222
-------------------	-----------	--------	--------	-------------	--------

21/24

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL (UU)

AMOSTRA Nº 147/95

T. CONFINANTE ( $\sigma_3$ ) kN/m <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	T. DESVIATÓRIA MÁXIMA ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) = $\sigma_d$ kN/m <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	DEF. AXIAL ESPEC. NA RUPTURA $\epsilon$ (%)
50,0 (0,5)	82,6 (0,83)	10,26
100,0 (1,0)	95,8 (0,96)	8,01
200,0 (2,0)	110,1 (1,10)	10,26

1 kgf/cm<sup>2</sup> = 100 kN/m<sup>2</sup>

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA TOTAL AO  
CISALHAMENTO

ÂNGULO DE ATRITO INTERNO = 4,7 graus

COESÃO = 35,0 kN/m<sup>2</sup> (0,35 kgf/cm<sup>2</sup>)

OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.





TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

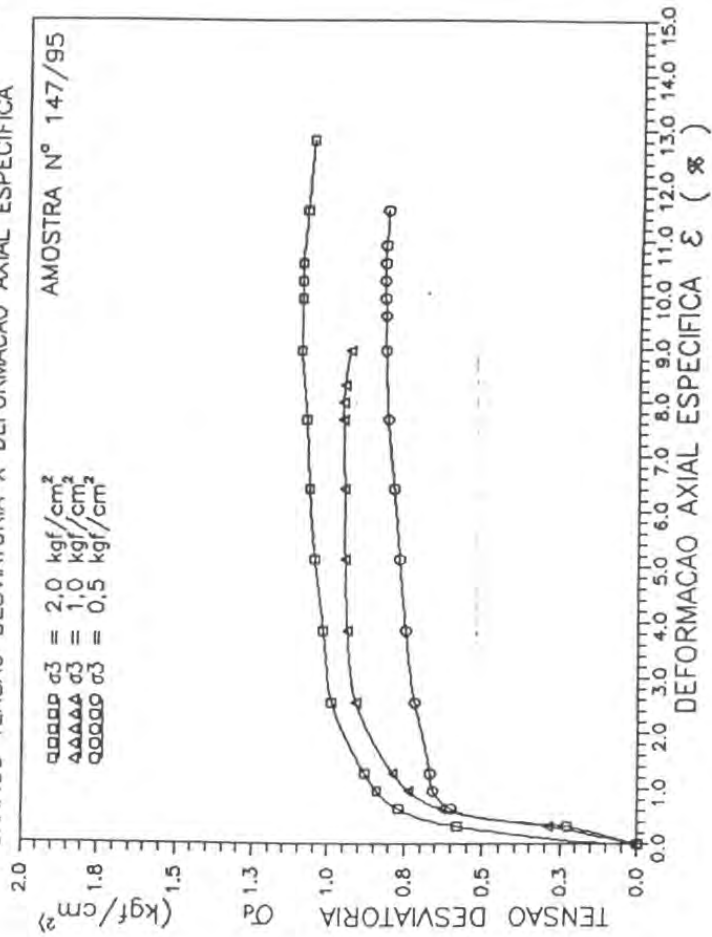
PROCESSO N.

041222

22/24

### ENSAIO TRIAXIAL NÃO ADENSADO - NÃO DRENADO (UU)

GRÁFICO TENSÃO DESVIATORIA X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA



OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO

RELATÓRIO

NÚMERO

153013

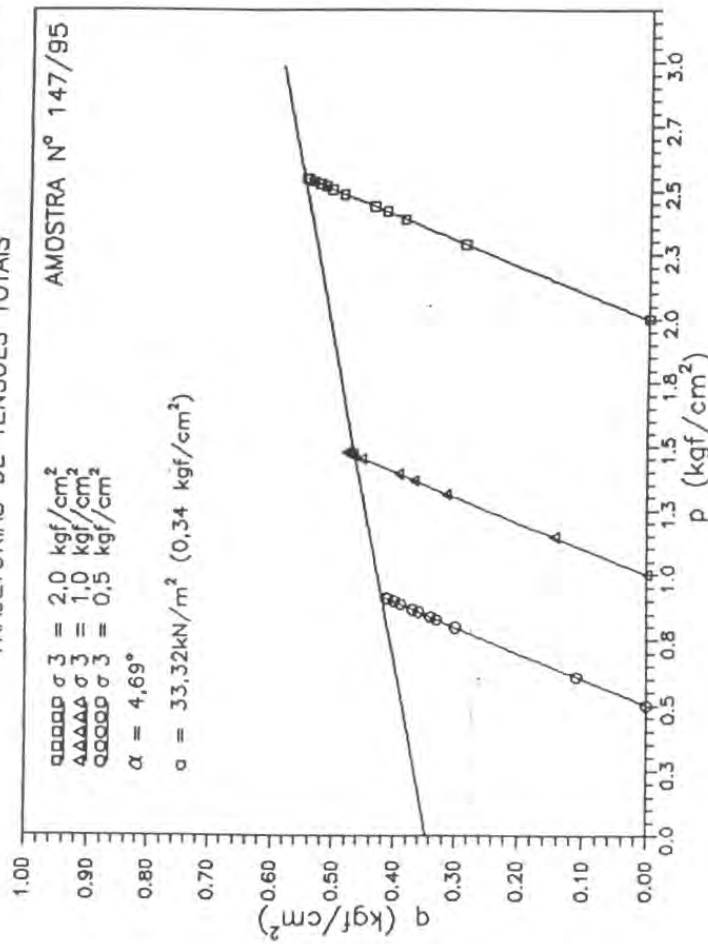
PROCESSO N.

041222

23/24

### ENSAIO TRIAXIAL NÃO ADENSADO-NÃO DRENADO (UU)

TRAJETÓRIAS DE TENSOES TOTAIS



OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE À(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.



TIPO DE DOCUMENTO <b>RELATÓRIO</b>	NÚMERO <b>153013</b>	PROCESSO N. <b>041222</b>
---------------------------------------	-------------------------	------------------------------

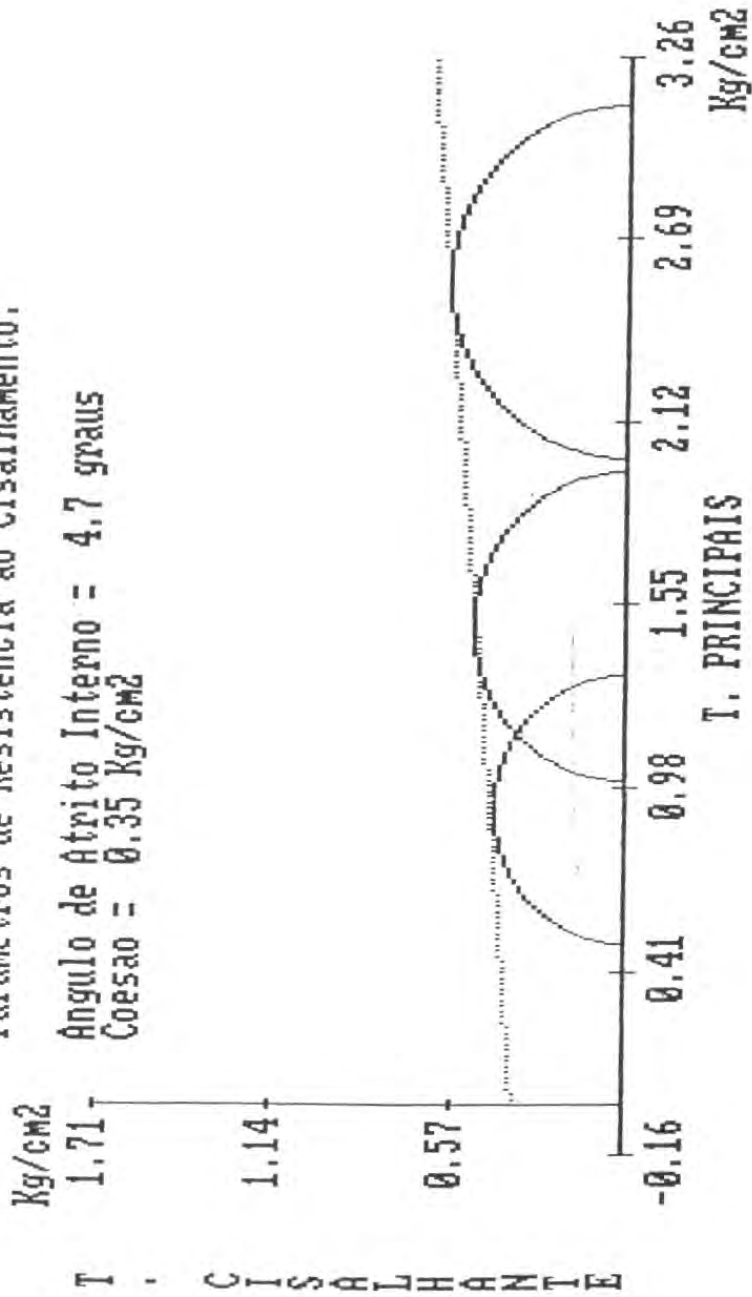
24/24

**TENSOES TOTAIS AMOSTRA 147/95**

Parametros de Resistencia ao Cisalhamento:

Angulo de Atrito Interno = 4.7 graus

Coesao = 0.35 Kg/cm<sup>2</sup>



OS RESULTADOS CONTIDOS NESTE DOCUMENTO TÊM SIGNIFICAÇÃO RESTRITA E SE APLICAM EXCLUSIVAMENTE A(S) AMOSTRA(S) ENSAIADA(S) E SOMENTE PODERÃO SER PUBLICADOS NA ÍNTEGRA.