

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELAÇÃO MATEMÁTICA TRIDIMENSIONAL DE UM
AQÜÍFERO EM UMA ÁREA URBANA DA BACIA DE
TAUBATÉ**

Pedro Henrique de Aquino Corrêa

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata
Co-orientador: Dr. Reginaldo A. Bertolo

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2003/43)

SÃO PAULO
2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



MODELAÇÃO MATEMÁTICA TRIDIMENSIONAL DE UM
AQÜÍFERO EM UMA ÁREA URBANA DA BACIA DE
TAUBATÉ

Pedro Henrique de Aquino Corrêa

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata
Co-Orientador: Dr. Reginaldo A. Bertolo

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2003/43)

SÃO PAULO
2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900014500



**MODELAÇÃO MATEMÁTICA TRIDIMENSIONAL DE
UM AQÜÍFERO EM UMA ÁREA URBANA DA BACIA
DE TAUBATÉ**

PEDRO HENRIQUE DE AQUINO CORREA

Monografia de Trabalho de Formatura

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata 
Prof. Dr. Paulo Roberto dos Santos 
Prof. Dr. Ian McReath 

São Paulo
2003

TF
C824
PHA.m



AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer, antes de tudo, aos meus pais e irmão, estes que, desde o começo, me apoiaram e acreditaram na minha capacidade. Espero que vocês sintam por mim, o mesmo orgulho que eu sinto por vocês.

Agradeço também aquela que, apesar de não saber absolutamente nada de geologia, esteve sempre comigo, me dando forças, me entendendo, me aturando, enfim, sendo a pessoa maravilhosa que ela é! Cá, minha namorada, muito obrigado!

Aos meus amigos de sempre, meus irmãos geológicos, 5 minutos (Douglas), desde o trote meu companheiro de baladas, de campo, de trabalho, enfim, da Geo; Mortis (Sérgio), se eu sou o Timon você com certeza é o Pumba; Shanty, meu irmão mais velho e você sabe porquê. Vocês sabem que certas amizades foram feitas para durar para sempre...

Ao Prof. Dr. Ricardo C. A. Hirata pela sua orientação e ao Dr. Reginaldo Bertolo, meu chefe e amigo, pela sua paciência, apoio e orientação.

A toda a galera da Geo, que estudou comigo todos esses anos, em especial ao Valentino, Boi, Eva, Camila, Mexinha, Klein, Débora, Kollah, Topera, Karni, Xiuaua, 101, Geni, Perdido, Felícia, Konrado, Mike, Piolho, Xupa, Micoze, Lêndea, 2-D, Pagão, Keith, Sodinha, Regininha, Passivo, Feith, Scroto (Xará), Bisteka, Márcia, Mimosa, Urtiga, Empata, Buça, Gabi e Fernanda.

A toda a galera da ERM, em especial ao Vermeio, Geraldo, Juliana, Enrico (cara, valeu pela paciência!), Rodrigo, Koskinha, Carolzinha, Kellão, Nandinho, Alaine, Sasha, Sander, Renatinho, Fábio e Gleyce.

A Prof^a Beth, pelo seu apoio, aos meus amigos Kalú e Leda e aos meus primos, Alexandre, Olga Helena, Silvia e Edu, por toda força que me deram.

Por fim, eu gostaria de dedicar este trabalho a duas pessoas. Uma delas é a minha amiga Fabíola, por tudo o que fez por mim até hoje, pois com certeza se hoje estou onde estou, eu devo muito a você! A outra pessoa é o meu amigo, meu mestre, Luiz Ferrari, pela sua orientação, seu apoio, sua paciência e, se eu consegui fazer este trabalho, eu devo muito a você também!

A todos vocês MUITO OBRIGADO!!!

RESUMO

O presente Trabalho de Formatura teve como objetivo principal avaliar a extensão, comportamento e prognósticos de uma pluma contaminante em um aquífero localizado em uma área urbana da Bacia de Taubaté. Isto foi realizado através de uma modelagem matemática tridimensional de fluxo advectivo de água subterrânea, para uma distribuição estacionária de cargas hidráulicas. Esta avaliação é aproximada, pois não foram considerados os fenômenos de dispersão, retardação e degradação dos contaminantes.

Para que a modelagem tivesse sucesso foram realizadas as seguintes etapas: pesquisa bibliográfica; campanhas de campo, nas quais foram instalados 25 poços multiníveis num total de 52 poços; definição de um modelo hidrogeológico conceitual de 6 camadas, com condutividades hidráulicas variando entre 10^{-4} a 10^{-9} m/s; e a modelação matemática seguida do seu processo de calibração, subdividindo o modelo conceitual em 10 camadas matemáticas.

Com o modelo devidamente calibrado, foram feitas diversas simulações de trajetória de partículas, a partir da área fonte, onde observou-se que: o fluxo advectivo da água subterrânea é predominantemente vertical e lento (0,44 a 14,51 m/ano); a pluma simulada não se encontra muito extensa (50 m de diâmetro) e encontra-se dentro da propriedade da indústria, além de ainda não ter atingido as camadas profundas do modelo.

Por fim foi proposto e elaborado um sistema de remediação do tipo "Pump & Treat", com a simulação de uma barreira hidráulica composta por cinco poços, instalados em linha, distantes 10 m entre si, com uma vazão de $2 \text{ m}^3/\text{dia}$ cada um. Tal sistema mostrou-se eficiente na contenção da pluma.

ABSTRACT

The main goal of this project was to evaluate the extension, behavior and prognostics of a contaminant plume of an aquifer located in an urban area of Taubaté Basin. This was made through a mathematical modeling of groundwater's advective flow for a steady state system. It can be assumed that this is an approach evaluation since the effects of dispersion, retardation and degradation of the contaminants weren't considered.

In order to achieve success in the modeling, several steps were taken, like: bibliographic research; field works, where 25 in a total of 52 multilevel wells were installed; definition of a conceptual hydrogeological model of 6 layers, with the hydraulic conductivity values ranging from 10^{-4} to 10^{-9} m/sec; and the mathematical modeling followed by its calibration process, where the conceptual model was divided into 10 mathematical layers.

When the model was ready and calibrated, many trajectory particles' simulations were made from the source area, and it was observed that the advective flow of the groundwater is mainly vertical and slow (0,44 a 14,51 m/year), the simulated plume isn't too wide (50 m diameter) and it's located inside the industry's property, not reaching the lowest layers of the model.

Finally it was proposed and established a "Pump & Treat" remediation system, with the simulation of a hydraulic barrier composed by 5 wells, installed in line, distant 10 m from each other with a flow rate of 2 m³/day each. The system proved to be efficient when containing the plume.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Metas e Objetivos	2
3	Levantamento Bibliográfico.....	2
3.1	Modelos Matemáticos	2
3.2	Geologia Regional da Área	8
3.3	Hidrogeologia Regional da Área.....	14
4	Materiais e Métodos.....	16
4.1	Análise Bibliográfica	16
4.2	Caracterização Detalhada da Hidrogeologia	16
4.3	Determinação do Modelo Conceitual de Circulação.....	17
4.4	Modelação Matemática do Aquífero em Três Dimensões.....	17
4.5	Simulação de Cenários.....	20
4.6	Interpretação e Discussão dos Resultados Obtidos	20
5	Desenvolvimento do Trabalho	21
6	Resultados Obtidos.....	22
6.1	Histórico da Área de Estudos	22
6.2	Geologia Local da Área de Estudos.....	26
6.3	Hidrogeologia Local da Área de Estudos.....	32
6.4	Modelo Matemático de Fluxo de Água Subterrânea.....	36
6.4.1	Abordagem	36
6.4.2	Área Definida para o Modelo	36
6.4.3	Modelo Digital da Topografia	36
6.4.4	Hidrologia.....	38
6.4.5	Configuração do Modelo Matemático	38
6.4.6	Calibração do Modelo Matemático.....	41
6.4.7	Análise de Sensibilidade	44
6.4.8	Simulação de Cenários de Bombeamento	45
7	Discussão dos Resultados.....	48
8	Conclusões.....	49
9	Referências Bibliográficas	50
Anexos		
Anexo 01 – Figuras		
Anexo 02 – Tabela Resumo das Informações dos Poços		
Anexo 03 – Perfil Construtivo dos Poços Instalados em Janeiro e em Agosto de 2003		
Anexo 04 – Planilhas dos Ensaios de Condutividade Hidráulica		

1 INTRODUÇÃO

A preocupação a respeito da poluição das águas subterrâneas é relativamente recente em nosso país (Hirata, 1993). Tem-se observado um considerável crescimento no número de estudos hidrogeológicos na última década a fim de solucionar os diversos impactos ambientais causados pela atividade antrópica. Este fato pode ser evidenciado pelo surgimento de diversas empresas de consultoria e gerenciamento ambiental, no intuito de atender a crescente demanda, principalmente na região dos grandes centros urbanos.

O planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, assim como a proteção e descontaminação de aquíferos, dependem principalmente da competência e habilidade em se quantificar os fenômenos de fluxo e transporte de contaminantes nas águas subterrâneas. Esta quantificação pode ser realizada de diversas maneiras, dentre elas medidas de campo e modelagem matemática (Cleary, 1989).

A princípio, pode-se dizer que as medidas de campo, por serem resultados diretos, são a melhor abordagem para um dado problema. No entanto, existem certas dificuldades em sua obtenção que, normalmente, decorre de limitações de ordem técnica, de custos e de prazos. Além disso, somente com medidas de campo, previsões relacionadas ao fluxo e transporte de contaminantes nas águas subterrâneas, normalmente, não são muito precisas.

Sendo assim, atualmente, a modelagem matemática vem sendo muito utilizada por diversos hidrogeólogos e pode ser assumida como uma ferramenta bastante favorável no gerenciamento de sistemas aquíferos. Visto que, apesar de também utilizar medidas de campo, um modelo bem feito é capaz de simular diversos cenários e fazer previsões precisas relacionadas ao fluxo e transporte de contaminantes.

A modelagem matemática, tanto de fluxo como de transporte, apresenta muitas aplicações na solução de problemas relacionados com as águas subterrâneas. Dentre estas aplicações, os modelos podem ser utilizados, por exemplo, como ferramenta para auxiliar na seleção de possíveis alternativas para a implantação de um sistema de remediação de um aquífero contaminado. Este projeto foi desenvolvido junto a uma indústria localizada no interior do Estado de São Paulo, na região do Vale do Paraíba, em conjunto com a ERM Brasil Ltda. Tal área foi selecionada devido a um histórico de contaminação por solventes clorados.

Desta forma, este Trabalho de Formatura é relevante uma vez que o autor foi capaz de realizar todas as etapas necessárias para elaboração de uma modelagem matemática, provando sua aplicabilidade na solução de um problema ambiental real, pois com o auxílio do modelo numérico é possível se obter uma melhor compreensão e visualização das características hidrodinâmicas de um sistema aquífero. Características estas que poderão ser utilizadas para

diversos propósitos, como por exemplo na otimização de um sistema de remediação para o aquífero em questão.

2 METAS E OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto foi avaliar a extensão, comportamento e prognósticos de uma pluma contaminante em um aquífero localizado em uma área urbana da bacia de Taubaté, com o intuito de se prever os possíveis impactos ambientais a serem causados pela mesma. Isto foi realizado através de uma modelagem matemática tridimensional de fluxo advectivo de água subterrânea, para uma distribuição estacionária de cargas hidráulicas. Esta avaliação foi aproximada, pois não foram considerados os fenômenos de dispersão, retardação e degradação dos contaminantes.

Foram objetivos específicos do projeto:

- Organização dos dados geológicos, hidrogeológicos e hidrodinâmicos da região em questão.
- Construção de um modelo conceitual de circulação para o aquífero.
- Modelação matemática do aquífero em três dimensões, com auxílio do programa MODFLOW®.
- Simulação envolvendo cenários de exposição de receptores humanos e ambientais à contaminação.
- Discussão e interpretação dos resultados obtidos.

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1 MODELOS MATEMÁTICOS

Um modelo é uma ferramenta designada para representar uma versão simplificada da realidade (Wang & Anderson, 1982). Esta é apenas uma dentre as diversas definições que existem para modelo na literatura. No entanto, todas elas convergem para um ponto comum: simular a realidade de maneira simplificada. Outro exemplo seria: um modelo pode ser definido como uma versão simplificada de um sistema real (no caso um sistema aquífero) que simula aproximadamente as relações relevantes de excitação e resposta de um sistema real (Bear *et al.*, 1992).

De acordo com Anderson & Woessner (1992), um modelo matemático simula o fluxo das águas subterrâneas indiretamente, através da equação que se pensa melhor representar os processos físicos que ocorrem no sistema, juntamente com equações que descrevem cargas ou fluxo ao longo das fronteiras do modelo (condições de contorno).

Os modelos para a hidrogeologia podem ser divididos em três grandes categorias, segundo Prickett (1975, apud Wang & Anderson, 1982): os modelos de caixa de areia, modelos analógicos (incluindo modelos de fluidos viscosos ou de placas paralelas e modelos elétricos) e modelos matemáticos (modelos analíticos e numéricos). Um modelo matemático consiste num conjunto de equações diferenciais que governam o fluxo das águas subterrâneas. Os modelos matemáticos têm sido usados desde o fim do século passado e a confiabilidade da previsão feita por um modelo depende do quanto o mesmo se aproxima da realidade (Wang & Anderson, 1982). No entanto, simplificações podem ser feitas para a construção do modelo já que as situações de campo podem ser muito complexas para serem reproduzidas com exatidão.

A equação diferencial que governa o fluxo de água no aquífero pode ser obtida aplicando-se o princípio da conservação de massa e da lei de Darcy a um volume elementar representativo do aquífero (Cleary, 1989). Esta equação pode ser representada da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[K_{xx} \frac{\partial H}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[K_{yy} \frac{\partial H}{\partial Y} \right] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[K_{zz} \frac{\partial H}{\partial Z} \right] + W(X,Y,Z,t) = S_s \frac{\partial H}{\partial t}$$

Onde:

H = carga hidráulica total;

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} = componentes principais do tensor da condutividade hidráulica ao longo das coordenadas X, Y e Z;

S_s = coeficiente de armazenamento específico;

t = tempo;

W = fontes ou sumidouros de água dentro do aquífero, inclusive recarga e evapotranspiração.

Um aquífero é constituído por uma mistura de matriz e poros. No entanto, a lei de Darcy considera que o aquífero é representado por um material de condutividade hidráulica K e não como uma mistura de matriz e poros. Sendo assim, na verdade a lei de Darcy não modela o aquífero, mas sim um material equivalente que atua como um aquífero. O volume elementar representativo é o menor volume onde ainda vale essa equivalência. Para volumes menores torna-se impossível considerar uma mistura de matriz e poros como um único material

Outra definição para volume elementar representativo de um aquífero, no qual se aplica a equação supracitada, seria que este é igual a $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$, devendo ser pequeno o bastante para que não ocorra variações significativas na carga hidráulica e, ao mesmo tempo, grande o bastante para representar as propriedades do meio. Uma representação do volume elementar representativo está apresentada na figura 3.1.

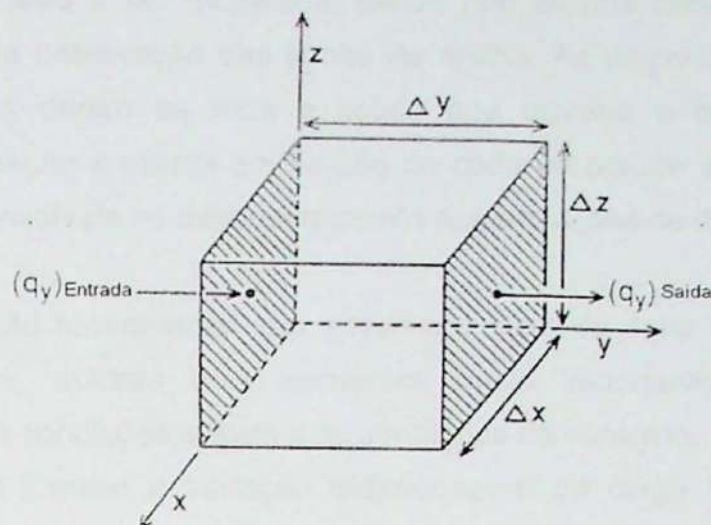


Figura 3.1: Representação do volume elementar representativo de um aquífero, usado na derivação da equação que governa o fluxo. Os componentes do fluxo estão mostrados ao longo do eixo de coordenada y. Traduzido de Anderson & Woessner (1992).

Dentre os modelos matemáticos existem basicamente duas formas de resolução para a equação fundamental que governa o fluxo de água subterrânea: analítica e a numérica. No entanto, só é possível se resolver a equação de forma analítica em situações mais simples em que existam homogeneidade e isotropia em uma ou mais direções. Tal situação normalmente não ocorre em sistemas reais o que faz com que os métodos numéricos de resolução sejam os mais usados devido a sua versatilidade e sua capacidade de resolver problemas com diversas variáveis, sendo que, desde os anos 60, com os avanços na área da computação, tais modelos têm sido o tipo preferido para a hidrogeologia.

Os métodos numéricos mais usados são o método de diferenças finitas (MDF) e o método de elementos finitos (MEF). Enquanto o MDF é conceitualmente simples, o MEF é considerado abstrato (Cleary, 1989). Em ambos os casos, a equação diferencial parcial é discretizada nas variáveis de espaço X, Y e Z, ao passo que o MDF se trata de uma representação discretizada sobre um ponto e o MEF sobre uma área.

Pode-se dizer que dos métodos citados, provavelmente, o mais utilizado é o MDF (utilizado no presente trabalho), devido principalmente a existência de muito mais programas de computação para esse método e por ser muito mais fácil de ser usado pelos hidrogeólogos. No entanto para os casos em que existam muitas áreas anisotrópicas e as direções principais da condutividade hidráulica variam em todo o aquífero, não sendo paralelas aos eixos das coordenadas, a única escolha recai sobre o MEF (Cleary, 1989).

O MDF, como já dito, é uma representação discretizada em um ponto, ou seja, os valores de carga são calculados para certos pontos, estes que são chamados de nós. Este método tem a grade ou malha do modelo definida por linhas e colunas, apresentando um ajuste não tão

refinado ao formato da área a ser modelada, sendo que os nós podem estar posicionados dentro das células ou na intersecção das linhas da malha. As propriedades do aquífero são consideradas constantes dentro de toda a célula que envolve o nó. Não importando a representação, uma equação é escrita em função de cada nó porque a área que circunda os nós não é diretamente envolvida no desenvolvimento das equações de diferenças finitas (Wang & Anderson, 1982).

Para que a equação fundamental que governa o fluxo de água subterrânea possa ser resolvida para a carga, existem dois elementos muito importantes a serem definidos previamente. São eles as condições iniciais e as condições de contorno.

A condição inicial fornece a variação tridimensional da carga hidráulica presente no aquífero modelado, quando, na simulação, o tempo for igual a zero. A condição inicial tem a seguinte forma:

$$H = H(X, Y, Z, t) \quad \text{com} \quad t = 0$$

Apesar de muito importante para se iniciar uma simulação, a condição inicial de carga, normalmente, é desconhecida. Isto faz com que, na prática, muitos modeladores utilizem uma carga constante média para todo o modelo.

As condições de contorno podem ser definidas basicamente como as fronteiras hidráulicas que delimitam o domínio do modelo, sendo que elas podem ser de três tipos (Anderson & Woessner, 1992):

- **Tipo 1 ou Dirichlet:** corresponde a uma carga hidráulica conhecida no tempo e espaço (exemplos: lago, rios e mares);
- **Tipo 2 ou Neuman:** diz respeito a uma fronteira onde o fluxo é conhecido no tempo e espaço. Um exemplo comum é a condição de fluxo zero, representando uma barreira impermeável ou um divisor de água subterrânea;
- **Tipo 3 ou Cauchy:** é uma condição mista, onde o fluxo é dependente da carga hidráulica, e normalmente associada a rios e drenos.

As condições de contorno, apesar de se mostrarem como sendo as bordas da área definida para o modelo, podem também ser utilizadas em regiões internas ao modelo em que se pretenda simular alguma característica hidrogeológica natural relevantes para o sistema, tais como: rios, drenos, lagos, entre outros. A Figura 3.2 apresenta um exemplo dos três tipos de condições de contorno.

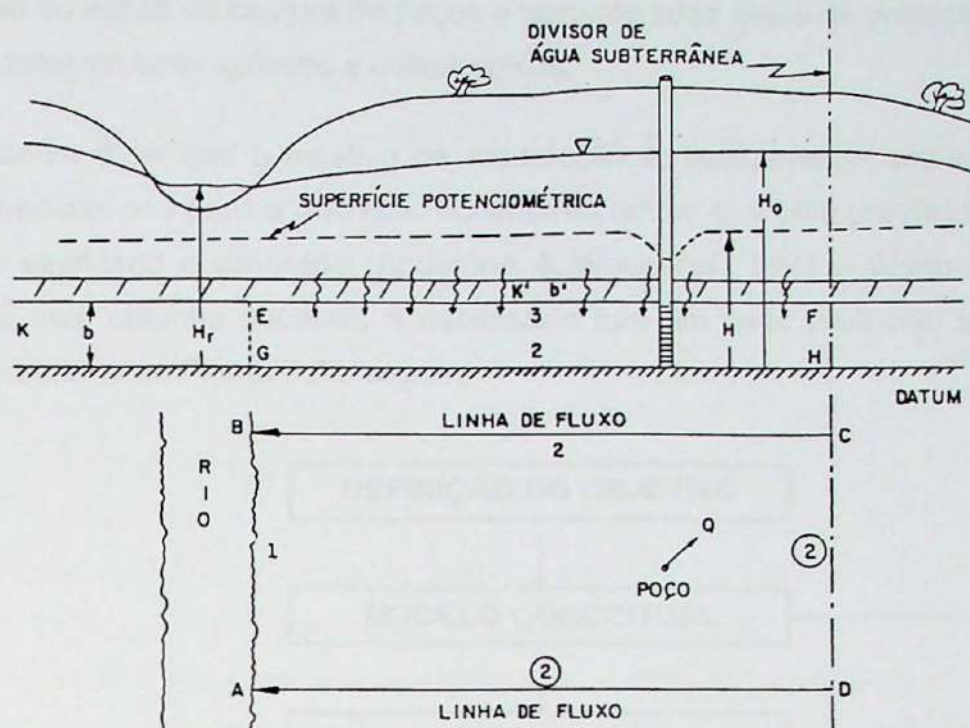


Figura 3.2: Exemplo dos três tipos de condição de contorno. Tipo 1: AB – carga constante para o aquífero freático. Tipo2: BC, CD e AD – não-fluxo para ambos os aquíferos. Tipo 3: EF – drenança do aquífero freático superior para o aquífero confinado inferior (Cleary, 1989).

Existem ainda duas formas possíveis para utilização do modelo: estado estacionário ou transiente. No primeiro caso, as características são independentes de tempo, ou seja, não sofrem variações ao longo dele mantendo-se sempre as condições iniciais. Neste caso a distribuição espacial das cargas hidráulicas no interior do aquífero se mantém inalteradas ao longo do tempo. No estado transiente, pode-se considerar valores que se alteram ao longo do tempo como a recarga (períodos de seca e de chuvas), diferentes vazões ao longo de um rio ou até mesmo na vazão de bombeamento de poços presentes na área modelada.

Tendo em vista de como se dá, basicamente, o processo de modelação matemática, pode-se dizer que, na área da hidrogeologia, diversas são as aplicações dos modelos, como por exemplo:

- A avaliação e otimização de diferentes alternativas de sistemas de remediação de águas subterrâneas;
- Visualização e compreensão dos fenômenos de fluxo e de transporte em sistemas aquíferos heterogêneos e anisotrópicos, com intuito de se prever tais fenômenos, principalmente quando se trata de contaminantes presentes na água subterrânea;
- Investigação de possíveis alternativas para a locação de poços de abastecimento no intuito de se otimizar a utilização dos recursos hídricos.

- Definição de zonas de captura de poços e portanto suas áreas de proteção, em meios geologicamente heterogêneos e anisotrópicos;

Por fim pode-se dizer que o objetivo da modelação é, basicamente, prever o valor de variáveis desconhecidas nos pontos dos nós. No entanto, antes que uma previsão seja feita, o modelo deve ser verificado e calibrado (Anderson & Woessner, 1992 e Wang & Anderson, 1982) e para que este obtenha sucesso, é necessário que um certo protocolo seja seguido, como ilustra o fluxograma da Figura 3.3 a seguir.



Figura 3.3: Fluxograma para aplicação de modelos. Traduzido e modificado de Anderson & Woessner (1992).

3.2 GEOLOGIA REGIONAL DA ÁREA

Segundo Riccomini (1989), o Rift Continental do Brasil possui uma direção ENE e estende-se desde o Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Paraná. As diversas depressões que foram formadas deram origem a inúmeras bacias sedimentares, tendo sido preenchidas por seqüências vulcano-sedimentares. Estas bacias continentais de idade cenozóica, no Estado de São Paulo, são denominadas de Bacia de Taubaté e Bacia de São Paulo (Figura 3.4).

A área onde será desenvolvido o estudo localiza-se no Vale do Paraíba, na região leste do Estado de São Paulo. O Vale do Paraíba forma um corredor retilíneo orientado segundo NE e é preenchido por sedimentos terciários que compõem a chamada Bacia de Taubaté (DAEE, 1977).

O embasamento cristalino desta bacia constitui-se essencialmente de rochas gnáissicas para ou ortoderivadas por vezes migmatizadas, intrudidas por rochas granitóides mais jovens.

Os principais domínios litológicos em contato com a face norte e a face sul da Bacia de Taubaté são os Complexos Paraíba do Sul e Embu respectivamente (IPT, 1990). O Complexo Paraíba do Sul agrupa rochas predominantemente gnáissicas e migmatíticas bastante deformadas. O Complexo Embú possui rochas metamórficas de médio a alto grau, compostas por xistos diversos associados a gnaisses e a migmatitos, ocorrendo, subordinadamente, corpos de anfibolitos. O Complexo Paraíba do Sul é considerado o embasamento do Complexo Embú e o contato entre eles é em geral discordante ou tectônico.

Os sedimentos terciários que preenchem a Bacia de Taubaté eram, até alguns anos atrás, segundo a classificação adotada por Hasui & Ponçano (1978) referidos como Grupo Taubaté, subdividido em duas formações, Tremembé e Caçapava. A estratigrafia do Grupo Taubaté passou nestes últimos anos por uma revisão profunda, sendo por fim introduzidos os termos da estratigrafia genética em que Riccomini (1989) propôs uma nova classificação litoestratigráfica única para as bacias sedimentares de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, pertencentes ao Rift Continental do Sudeste do Brasil, baseando-se na caracterização dos sistemas deposicionais. A Figura 3.5 (IPT, 1990) resume a evolução da coluna estratigráfica da Bacia de Taubaté. A Figura 3.6 (DAEE, 1977) apresenta um esboço da distribuição das fácies sedimentares predominantes na Bacia de Taubaté, o que possibilita uma visualização simplificada geologia presente na mesma.

RICCOMINI (1989)	<div> <div>FORMAÇÃO PINDAMONHANGABA</div> <div>FORMAÇÃO ITAQUAQUECETUBA</div> <div>FORMAÇÃO SÃO PAULO</div> <div>FORMAÇÃO TREMEMBÉ</div> <div>FORMAÇÃO RESENDE</div> <div>GRUPO TAUBATÉ</div> </div>
VESPUCCI (1984)	<div>GRUPO TAUBATÉ</div> <div>FORMAÇÃO JACAREÍ</div> <div>FORMAÇÃO CAÇAPAVA</div> <div>FORMAÇÃO TREMEMBÉ</div>
HASUI & POISSON (1978)	<div>GRUPO TAUBATÉ</div> <div>FORMAÇÃO CAÇAPAVA</div> <div>FORMAÇÃO TREMEMBÉ</div>
CARNEIRO et al. (1976)	<div>FORMAÇÃO CAÇAPAVA</div> <div>—</div>
AB'SABER (1969)	<div>GRUPO PARAÍBA DO SUL</div> <div>FORMAÇÃO PARATEÍ DO MEIO</div> <div>FORMAÇÃO SÃO JOSÉ DOS CAMPOS</div> <div>FORMAÇÃO TREMEMBÉ</div>
MEZZA-LIRA (1967/1968)	<div>GRUPO TAUBATÉ</div> <div>FORMAÇÃO SÃO PAULO</div> <div>FORMAÇÃO TREMEMBÉ</div>
AB'SABER (1966)	<div>FORMAÇÃO TAUBATÉ</div> <div>—</div>
BETZER (1966-1968)	<div>UNIDADE SUPERIOR QUATERNÁRIA</div> <div>UNIDADE INFERIOR TERCIÁRIA</div>
ALMEIDA (1955)	<div>FORMAÇÃO SÃO PAULO</div> <div>FORMAÇÃO TREMEMBÉ</div>
MORAES REGO (1933)	<div>CAMADAS SÃO PAULO</div> <div>CAMADAS PARAÍBA DO SUL</div>
WASH-BURNE (1930)	<div>SEÇÃO SUPERIOR (FLUVIAL E ARENOSA)</div> <div>SEÇÃO INFERIOR (LACUSTRINA E PELÍTICA)</div>
FLORENCE & PACHECO (1928)	<div>CAMADAS PARAÍBA DO SUL</div>
MISSIS (1942)	<div>SEDIMENTOS PLIOCÊNICOS NO VALE DO PARAÍBA</div>

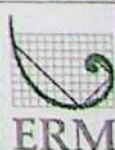
Fonte: IPT (1990)

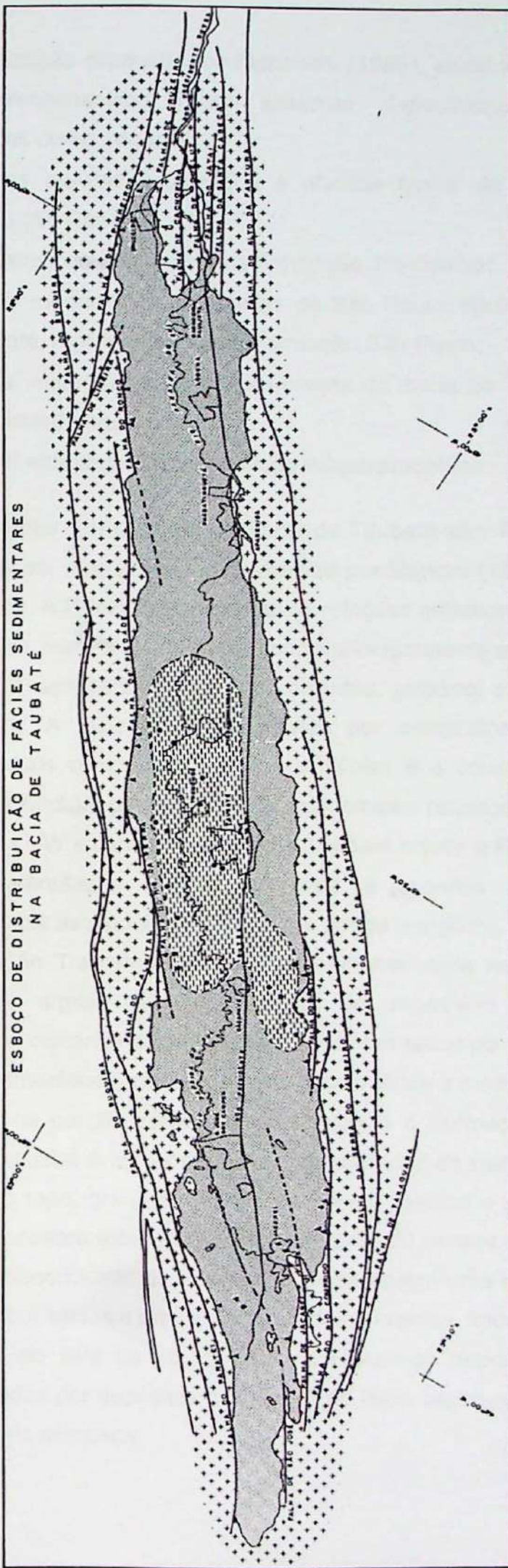
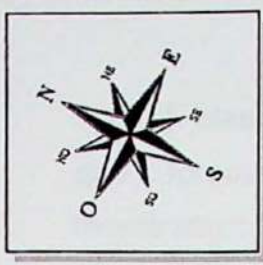
Evolução da Coluna Estratigráfica da Bacia de Taubaté

Figura 3.5

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP





Fonte: DAEE (1977)

LEGENDA

- Facies fluvial predominante
- Facies lacustre predominante com cobertura menor que 20 metros da facies fluvial
- Complexo cristalino
- Local de ocorrência de brechas sedimentares e conglomerados
- Local de ocorrência de folhelhas
- Contatos geológicos
- Folhas normais cenozóicas, tracejadas quando dobradas
- Folhas normais cenozóicas encobertas
- Folhas transcorrentes antigas, reativadas no cenozóico, preenchidas quando encobertas
- Cidade

	Figura 3.6
	ESBOÇO DE DISTRIBUIÇÃO DE FÁCIES SEDIMENTARES NA BACIA DE TAUBATÉ
TRABALHO DE FORMATURA Instituto de Geodécias	

A classificação proposta por Riccomini (1989), atualmente, é a classificação aceita, em que foram reconhecidos cinco sistemas deposicionais, relacionados às unidades litoestratigráficas como segue:

- Leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados, associados à Formação Resende;
- Lacustre, representado pela Formação Tremembé;
- Fluvial meandrante das bacias de São Paulo, Resende e porção oeste da Bacia de Taubaté, representado pela Formação São Paulo;
- Fluvial meandrante da porção central da Bacia de Taubaté, definido como Formação Pindamonhangaba; e
- Fluvial entrelaçado da Formação Itaquaquecetuba.

As formações que ocorrem na Bacia de Taubaté são: Resende, Tremembé, São Paulo e Pindamonhangaba, esta última foi subdividida por Mancini (1995), nos membros Pararangaba e Presidente Dutra. A Figura 3.7 apresenta as relações estratigráficas da Bacia de Taubaté.

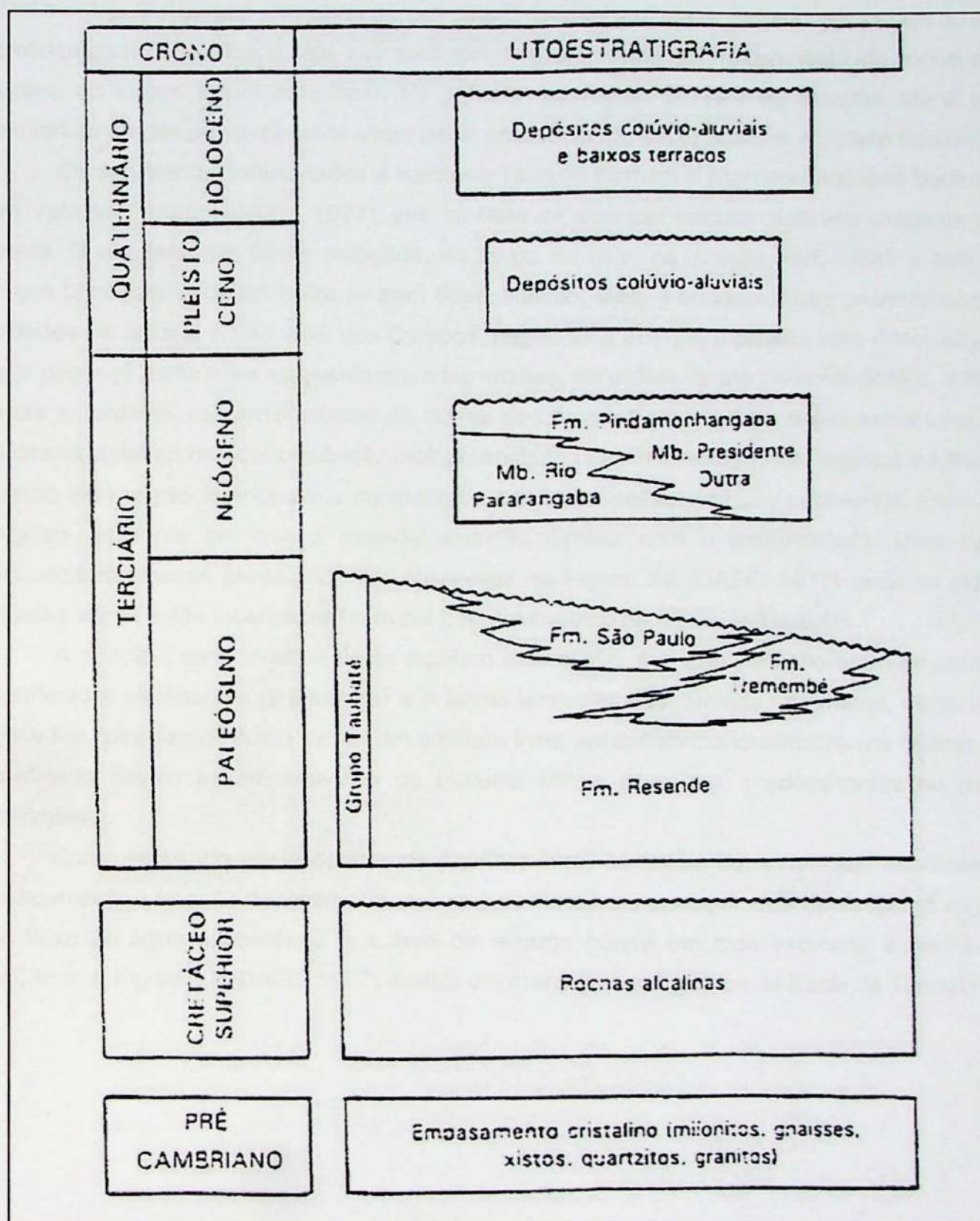
Nas bordas norte e sul da bacia ocorre principalmente a Formação Resende que segundo Riccomini (1989) apresenta duas fácies distintas, proximal e distal chamadas de fácies A e B respectivamente. A fácies A é constituída por diamictitos e conglomerados com seixos, matacões e blocos com matriz lamítica. A fácies B é constituída principalmente por lamitos arenosos com interdigitações de arenitos com crostas calcíticas associadas.

Na porção NW e central da Bacia de Taubaté ocorre a Formação São Paulo composta por arenitos de granulação média a grossa e arenitos grossos, conglomeráticos, com granodecrescência ascendente, chegando a siltitos e argilitos.

A Formação Tremembé ocorre predominantemente na porção central da bacia, sendo constituída por argilas verdes, maciças, de espessura métrica, com associações ou intercalações de calcários dolomíticos e ritmitos formados por folhelhos e margas, e de arenitos grossos, conglomeráticos, com espessura dessimétrica a métrica.

Também na porção central da bacia ocorre a Formação Pindamonhangaba em que o Membro Pararangaba é composto por conglomerados de matriz arenosa média a grossa. Esta unidade, para o topo, grada para arenitos finos a médios e siltitos, ricos em matriz argilosa e possui uma espessura total de aproximadamente 30 metros (Mancini, 1995). O outro membro desta unidade denominado de Presidente Dutra possui uma espessura estimada de 40 metros e é constituída por siltitos e argilitos associados a arenitos finos e lamitos.

Ao longo do vale do rio Paraíba encontram-se depositados sedimentos quaternários, recentes, formados por depósitos coluviais e de tálus, argilo-arenosos ou conglomeráticos e por depósitos aluviais arenosos.



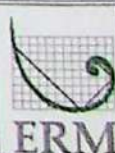
Fonte: Mancini (1995)

Relações Estratigráficas da Bacia de Taubaté

Figura
3.7

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP



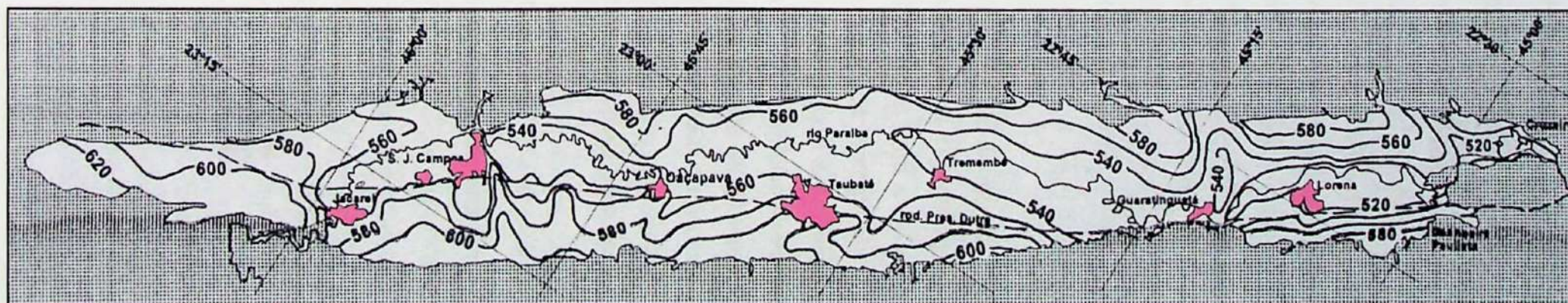
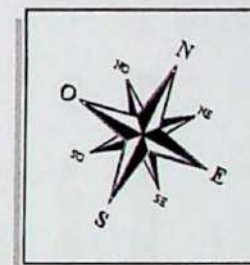
3.3 HIDROGEOLOGIA REGIONAL DA ÁREA

Na região da Bacia de Taubaté ocorrem basicamente dois aquíferos: um Cristalino e um Sedimentar. O Aquífero Cristalino possui uma extensão regional e é composto pelas rochas do embasamento cristalino e tem sua produtividade associada ao fraturamento da rocha e, por vezes, ao manto de intemperismo. No entanto, na região do Vale do Paraíba, ele é pouco explorado devido provavelmente a sua baixa produtividade em relação ao Aquífero Sedimentar.

Os sedimentos relacionados à Bacia de Taubaté formam o chamado Aquífero Sedimentar do Vale do Paraíba (DAEE, 1977), que se trata da principal unidade aquífera existente nesta bacia. O aquífero tem forma alongada, ao longo do vale, na direção ENE-WSW e tem duas áreas principais onde encontra-se bem desenvolvido. Uma a sudoeste, nas proximidades das cidades de Jacareí e São José dos Campos, região esta em que o projeto será desenvolvido e que poços já perfurados apresentaram altas vazões, da ordem de até 250m³/h (DAEE, 1977), e outra a nordeste, nas proximidades da cidade de Lorena. Entre as duas áreas existe uma zona bastante extensa na qual o subsolo está preenchido por sedimentos finos, argilitos e folhelhos, sendo esta região intermediária considerada como um aquífero pouco permeável, entre duas regiões aquíferas em que o material arenoso diminui com a profundidade. Uma melhor visualização dessas áreas pode ser observada na Figura 3.8 (DAEE, 1977) onde as cidades citadas acima estão localizadas no mapa potenciométrico da Bacia de Taubaté.





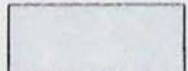

A principal característica deste aquífero sedimentar é a interdigitação entre as camadas aquíferas e confinantes (aquitardes) e a forma lenticular das camadas aquíferas, desta forma pode ser considerado como sendo um aquífero livre, apresentando localmente um caráter semi confinado devido às intercalações de material fino e grosseiro, predominantes no pacote sedimentar.

Como resultado deste caráter de aquífero livre, as linhas equipotenciais acompanham basicamente o traçado da topografia, sendo o rio Paraíba a principal área de descarga regional do fluxo de água subterrânea e a área de recarga ocorre em toda extensão superficial do aquífero. A Figura 3.8 (DAEE, 1977) mostra um mapa potenciométrico da Bacia de Taubaté.



Fonte: DAEE 1977

LEGENDA

-  linhas equipotenciais (msnm)
-  rio Paraíba
-  rod. Presidente Dutra
-  área urbana
-  Sistema Aquífero Sedimentar
-  Embasamento Cristalino

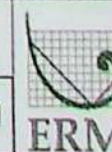
0 7 14 21 28km
ESCALA APROXIMADA

Potenciometria da Bacia de Taubaté

Figura
3.8

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP



4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Foi realizada uma busca bibliográfica nas principais publicações de trabalhos correlatos, em que, especial atenção foi dada para estudos em temas básicos de hidráulica da zona saturada. Nesta fase também foram procurados trabalhos sobre a área, incluindo cartas topográficas, geológicas e hidrogeológicas.

A pesquisa bibliográfica incluiu a busca e leitura de trabalhos relacionados aos dois principais assuntos enfocados neste trabalho: a geologia e hidrogeologia regional da área e a modelação matemática aplicada à hidrogeologia. Dentre estes trabalhos encontram-se: DAEE (1977), Riccomini (1989), Hasui & Ponçano (1978), Mancini (1995), IPT (1981) e IPT (1990), Anderson & Woessner (1992), Wang & Anderson (1982), Pinder & Gray (1977), Bramlett & Borden (1990), Hamdan & Mukhopadhyay (1991), Phillips & Belitz (1991), Bair & Roadcap (1992).

No Brasil a utilização de modelamento matemático ainda é recente, remetendo à década de 1990. Alguns trabalhos realizados no Brasil são os de Montenegro (1990), que realizou o modelamento matemático para a cidade de Ribeirão Preto; Hirata (1994), que utilizou modelo para definir estratégias de proteção de aquíferos; Iritani (1998) e Marcelino (1999), que fizeram uso desta ferramenta para a delimitação de zonas de proteção de água subterrânea; Rossato (1999), que usou a modelação matemática como uma das ferramentas para definição de zonas de captura de poço; Varnier (2001), que simulou, com o auxílio do modelamento matemático, o deslocamento dos tubos de fluxo relacionado às variações na recarga e na heterogeneidade do meio; e Tavares (2002) que, com auxílio de um modelo de caixa de areia, discutiu a aplicação de modelos matemáticos para fluxo de água subterrânea.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DETALHADA DA HIDROGEOLOGIA

Para que se pudesse ser feita uma caracterização detalhada da hidrogeologia da área, foi feito um cadastro dos poços tubulares e cacimbas da área de estudo, a partir de dados existentes e de campanhas de campo realizadas.

As campanhas de campo realizadas na área de estudo ocorreram basicamente em dois períodos, sendo a primeira entre os dias 7 e 21 de janeiro de 2003, onde foram instalados doze poços de monitoramento e a segunda entre os dias 6 e 22 de agosto de 2003, onde foram instalados mais treze poços de monitoramento.

Todos os dados obtidos relevantes para elaboração do projeto, ou seja, caracterização geológica dos perfis dos poços instalados, medidas de profundidade de nível d'água, entre

outros, foram organizados em meio digital, constituindo um banco de dados e lançados em mapa.

Os ensaios de condutividade hidráulica conduzidos nos poços instalados foram reinterpretados com uso do aplicativo Aquifer Test (WHI).

4.3 DETERMINAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL DE CIRCULAÇÃO

A partir do cadastro de poços, análise dos estudos geológicos e hidrogeológicos, dados climatológicos e geomorfológicos, e principalmente pelas campanhas de campo, um modelo de circulação conceitual do sistema aquífero foi definido. Este que serviu de base para que a modelagem pudesse ser feita, pois a partir dele se descreveram as entradas e saídas do aquífero e sua relação com as águas superficiais.

O mapa topográfico, os perfis descritivos dos poços de monitoramento e as seções geológicas construídas foram utilizados na determinação das unidades hidroestratigráficas existentes. A condutividade hidráulica (K), quando possível, foi obtida a partir dos valores definidos nos testes de condutividade hidráulica realizados nos poços de monitoramento da área.

Parâmetros hidrológicos como as características dos rios e valores tais como de recarga e evapotranspiração foram obtidos a partir de dados bibliográficos (Iritani, 1998) e em estudos do DAEE (1977).

O fluxo da água subterrânea foi determinado pela construção de mapas potenciométricos, levando em consideração a cota dos níveis d'água nos poços de monitoramento existentes e instalados na área.

4.4 MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO AQUÍFERO EM TRÊS DIMENSÕES

Para a modelação matemática foi escolhido o aplicativo MODFLOW[®] (McDonald & Harbaugh 1988). Este programa resolve equações de fluxo em 3D, através do método de diferenças finitas e é considerado o programa mais popular da atualidade no mundo todo.

O MODFLOW[®] é um programa desenvolvido pelo Serviço Geológico Americano (USGS) e as formas de entrada e saída de dados são complexas. O Visual MODFLOW[®], programa utilizado neste trabalho, é apenas um dos pré e pós-processadores possíveis existentes para o programa. O aplicativo auxilia a entrada de dados e também as formas de saída após o modelo ter sido processado.

O MODFLOW[®] enxerga um modelo tridimensional como uma seqüência de camadas de material poroso. A grade, ou malha, horizontal é gerada da maneira usual, especificando-se as dimensões nas direções x e y. Como em todos os modelos de diferenças finitas, a grade

horizontal deve ser a mesma para todas as camadas (Anderson & Woessner, 1992). Neste caso, a grade foi definida de acordo com o tamanho da área e pela densidade de dados (maior número de células onde havia mais dados).

A princípio, o modelo se limitava a quatro camadas matemáticas, definidas a partir dos dados fornecidos pelo modelo hidrogeológico conceitual prévio da área. Este que apesar de possuir cinco camadas hidrogeológicas foi inserido no modelo matemático com apenas quatro matemáticas. Isto foi feito, devido ao comportamento hidrogeológico muito semelhante das duas primeiras camadas hidrogeológicas que foram, portanto, unidas em uma única camada matemática.

No entanto com a conclusão da segunda campanha de campo, novos poços foram instalados e, conseqüentemente, novas informações foram geradas. Este fato fez com que o modelo conceitual fosse reavaliado e o que antes eram cinco camadas hidrogeológicas e quatro matemáticas, agora são seis camadas hidrogeológicas e dez matemáticas, sendo que cada uma delas diferem basicamente devido as suas características hidrogeológicas.

Desta forma o modelo que já se encontrava definido quanto a sua área de extensão, sua malha (divisão de células) e seu número de camadas (no caso dez), encontrava-se pronto para que fosse feita a entrada de dados. Esta, que para ao modelo prévio (de quatro camadas) já havia sido feita no mês de junho, teve de ser refeita devido, obviamente, às modificações no modelo hidrogeológico conceitual e ocorreu no período entre o final do mês de agosto e início do mês de setembro.

A entrada de dados no modelo ocorreu da seguinte forma: a princípio foram inseridos todos os poços de monitoramento e de bombeamento pertinentes a área, em seguida foram estabelecidos valores iniciais de condutividade hidráulica para cada uma das camadas segundo os ensaios de condutividade hidráulica e a geologia das mesmas. Também foram estabelecidos valores de recarga e de evapotranspiração.

As condições de contorno inseridas nos limites da área foram definidas como sendo do tipo 1, ou seja, condições de contorno de carga hidráulica constante. Para isso utilizou-se os valores de carga hidráulica que foram calculados com base nos mapas potenciométricos, na topografia e nos níveis d'água médios por camada.

Os rios dentro do modelo foram adicionados como drenos, para que se evitasse a possibilidade de inversão do fluxo, visto que isso não ocorre na área de estudos. A principal diferença entre o rio e o dreno é que no rio a água entra dele ou sai dele na medida da necessidade da área e de sua condutância, já o dreno só permite a entrada de água, também na medida da necessidade da área e da condutância, e nunca a saída.

Desta forma, quando o aquífero é explorado e os níveis d'água são rebaixados, dependendo do caso, o rio pode ceder água para o aquífero, invertendo o sentido do fluxo. No

entanto, esta situação não é verificada na área e para que isso continuasse existindo também no modelo, foram utilizados os drenos, que podem ter sua carga alterada pelas variações do nível d'água, porém não vão ceder água para o aquífero. Os valores de condutância utilizados foram calculados segundo McDonald & Harbaugh, (1988).

Para que o modelo fosse processado e conseqüentemente calibrado foi necessário definir qual a melhor solução numérica que se aplica ao modelo. O programa Visual MODFLOW® possui quatro diferentes pacotes de "solver", ou seja, quatro diferentes formas para as soluções numéricas. Cada um deles possui características próprias, por exemplo, quanto a quantidade de memória necessária, rapidez de processamento, como pode ser observado a seguir (WHB, 1998):

"Solver" SSOR (Successive Slice Overrelaxation)

- Requer memória grande, solução lenta;
- Numericamente não robusto, acaba em problema mais complicado;
- Somente vantajoso em modelos de seção vertical.

"Solver" SIP (Strongly Implicit Method)

- Requer memória pequena;
- Lento;
- Robusto mas pode gerar resultados enganosos, devendo sempre se checar o balanço de massa.

"Solver" PCG2 (Preconditioned-Conjugate Gradient)

- Requer mesma memória que o SIP;
- Mais rápido que o SIP e SSOR;
- Numericamente robusto, porém recai em sistemas muito complexos.

"Solver" WHS Solver (Preconditioned-Conjugate Gradient Stabilized Method – PCGStab)

- Extremamente robusto;
- Mais do que dez vezes mais rápido do que PCG;
- Requer aproximadamente três vezes mais memória do que PCG.

Tendo em vista essas características o pacote de "solver" escolhido para o processamento do modelo foi o WHS Solver.

A calibração do modelo foi realizada com base no modelo hidrogeológico conceitual e ocorreu no período entre os dias 15 de setembro e 5 de outubro de 2003. Para tanto, o procedimento adotado foi o de "tentativa e erro", em que foram feitas sucessivas simulações variando-se os valores de condutividade hidráulica, recarga e as condições de contorno,

sempre comparando-os aos dados reais, de forma a se manter as características geologicamente coerentes e plausíveis. Sendo válido ressaltar que poços perfurados em diferentes épocas foram utilizados para calibração do modelo.

Para que o modelo fosse considerado calibrado e representativo do sistema real, foram usados critérios qualitativos e quantitativos de calibração. O critério qualitativo usado foi a comparação entre os mapas potenciométricos elaborados pelo o autor com os mapas gerados a partir das simulações.

Os critérios quantitativos de calibração utilizados foram: o erro no balanço de massa, este que deve ser menor que 1%, e a diferença média normalizada entre as cargas medidas em campo e as calculadas pelo modelo, inferior a 10 %.

Por fim, com o modelo devidamente calibrado, foi feita a sua análise de sensibilidade.

4.5 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Depois do modelo matemático ter sido adequadamente calibrado, foram realizadas algumas simulações envolvendo cenários de exposição de receptores humanos e ambientais à contaminação. Sendo também simuladas possíveis alternativas para minimização e eliminação do risco, tais como barreiras hidráulicas e sistemas de bombeamento.

É válido ressaltar que por não se tratar de um modelo de transporte de contaminantes, para as simulações de cenários de contaminação será utilizado o programa Modpath. Este que faz parte do programa Visual MODFLOW®, desenha o caminhamento de partículas sujeitas apenas ao fluxo advectivo de água subterrânea. Não foram consideradas, portanto, a dispersão, a degradação e a retardação do contaminante.

4.6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A partir da compreensão da hidrodinâmica do sistema aquífero e com a visualização das simulações de possíveis cenários de contaminação, foi feita uma interpretação e discussão crítica desses resultados no intuito de se avaliar as possíveis aplicações para o modelo em questão.

5 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O presente Trabalho de Formatura, como visto no item 4 Materiais e Métodos, passou por várias etapas para que pudesse ser concluído. Isto porque, como mostra a Figura 3.3, para uma modelagem ser bem sucedida esta deve ser feita cuidadosamente passo a passo, pois cada um deles é dependente do anterior e portanto se um erro é cometido em algum deles todos os outros consequentemente estarão errados.

Em relação às atividades do cronograma inicialmente proposto, pode-se dizer que estas vinham sendo cumpridas de maneira eficaz e condizente com o sugerido até o momento em que o autor concluiu a sua segunda etapa de campo, que ocorreu entre os dias 6 e 22 do mês de agosto. A partir disso novas informações foram adquiridas, pois dos treze novos poços de monitoramento instalados, seis deles são de maior profundidade que os demais, fornecendo, portanto, valiosos dados referentes a geologia local da área, o que levou a uma reavaliação do modelo hidrogeológico conceitual inicialmente proposto.

A principal mudança no modelo hidrogeológico conceitual foi a definição de uma nova camada hidrogeológica, o que fez com que este passasse a possuir seis camadas e não mais cinco. Este fato levou a uma pequena mudança no cronograma proposto pois foi necessário refazer as entradas de dados no modelo matemático e portanto diminuindo o período que seria utilizado para calibração do mesmo.

Sendo assim, o cronograma das atividades efetivamente realizadas pode ser visualizado a seguir na Figura 5.1.

ATIVIDADES	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
1. Projeto Inicial									
2. Análise Bibliográfica									
3. Organização dos dados geológicos, hidrogeológicos da área									
4. Modelo Conceitual de Circulação									
5. Modelação matemática em três dimensões									
6. Relatório de Progresso									
7. Etapa de Campo									
8. Reavaliação do Modelo Conceitual e conseqüente mudança na entrada de dados no Modelo Matemático									
9. Calibração do modelo matemático									
10. Simulação de cenários									
11. Relatório Final									
12. Apresentação									

Figura 5.1: Cronograma das atividades efetivamente realizadas.

6 RESULTADOS OBTIDOS

6.1 HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDOS

A indústria em que o presente Trabalho de Formatura foi desenvolvido entrou em operação em 1974. Os dados históricos aos quais o autor teve acesso indicam que o primeiro relato ligado à questão ambiental foi a descoberta em meados de 1978 da presença de trincas nos tanques de armazenamento da ETE das águas residuais da galvanização. A primeira medida preventiva foi o reparo imediato dos tanques e remoção das soluções infiltradas.

Em 1991 foram instalados quatro poços rasos de monitoramento (PZ-1, PZ-2, PZ-3 e PZ-4), e um poço de bombeamento (PC – Poço Clean-up) cuja vazão era de 120 m³/dia. Os parâmetros de controle durante o bombeamento eram pH e condutividade elétrica específica. Atualmente, o poço PC não está em operação.

Em julho de 1999, a ERM executou os primeiros trabalhos ambientais na área com o objetivo de identificar a possível presença de passivos ambientais associados ao problema acontecido em 1978. Para tal fim, foram instalados dois poços adicionais de monitoramento e coletadas amostras de solo e de água subterrânea rasa e profunda.

Existem três poços profundos destinados ao fornecimento d'água para a produção: os poços PP-01, PP-02 e PP-03. Atualmente, só os poços PP-02 e PP-03 estão em operação, sendo que o PP-03 só opera em épocas de estiagem quando o PP-02 não consegue suportar a demanda de água. A bomba do poço PP-01 continua instalada porém permanece desligada.

A ERM continuou os trabalhos de investigação na área e em setembro de 2001, quando foram instalados dez poços de monitoramento (PM-01 a PM-08, PZ-05 e 06) tanto para coleta de água subterrânea como de solo. Os resultados desta investigação mostraram que a água subterrânea superficial estava impactada por compostos orgânicos voláteis. As amostras coletadas nos poços profundos PP-02 e PP-03 indicaram que, para os parâmetros de análise em questão, o aquífero profundo não se encontrava impactado.

Em maio de 2002, a ERM realizou um trabalho de complementação de investigação de solo e água subterrânea, em que foram instalados treze poços de monitoramento (PM-09 a PM-21) e dois poços profundos (PMP-01 e PMP-02). Foram também realizados ensaios de condutividade hidráulica do aquífero. Neste trabalho concluiu-se que os únicos compostos de interesse são os solventes clorados presentes no solo e água subterrânea, além de se definir uma única área fonte localizada na porção sudeste do prédio B. A Figura 6.1 apresenta um "layout" geral da fábrica em que se pode visualizar os diversos prédios inclusive o prédio B.

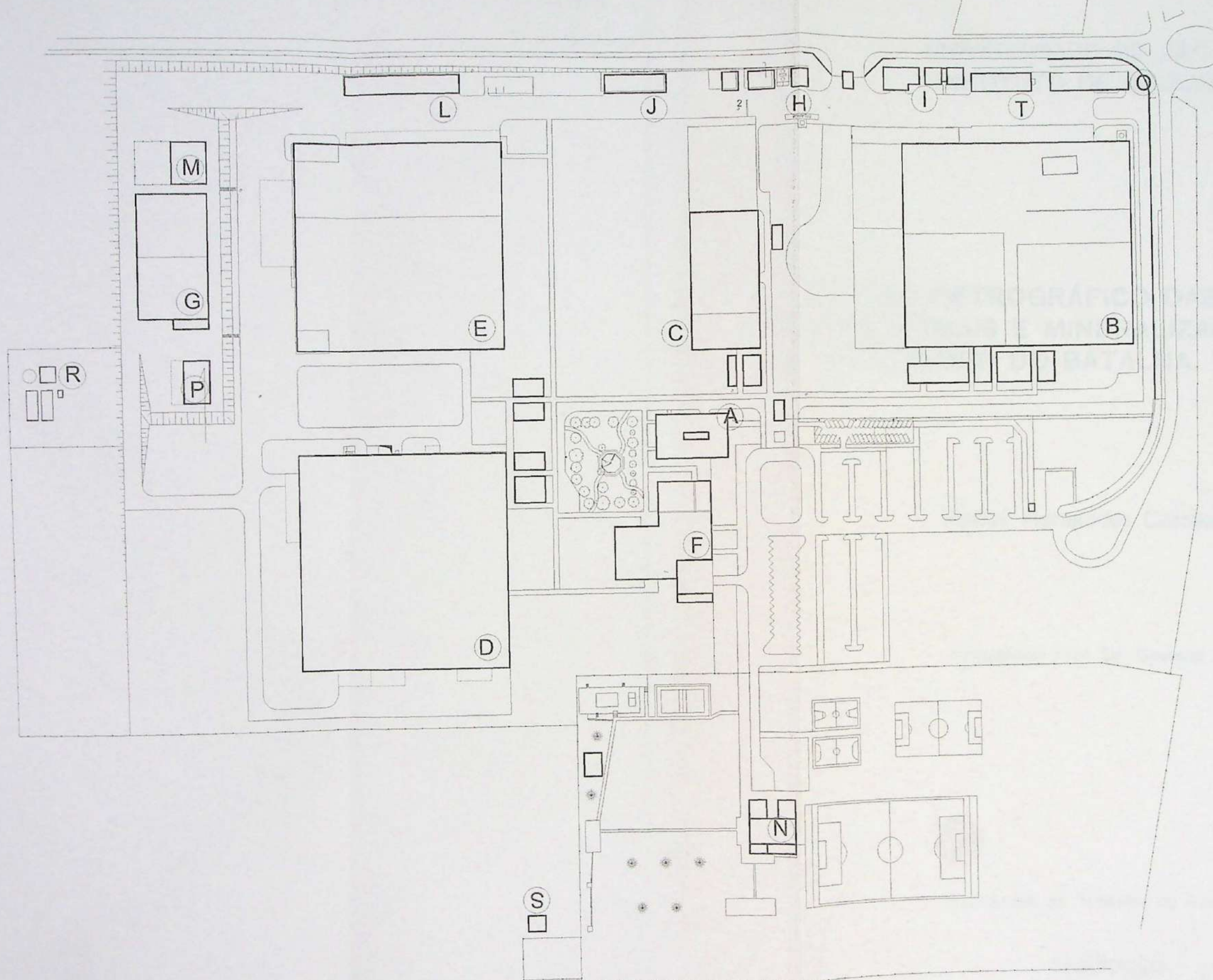
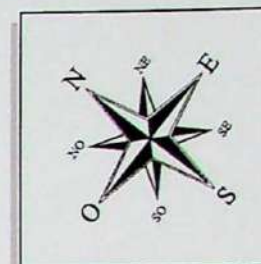
No ano de 2003, a ERM continuou seus trabalhos de complementação de investigação na área, sendo que nesse período o autor esteve presente realizando seu Trabalho de Formatura concomitante aos trabalhos de investigação.

A investigação complementar realizada na área teve o intuito de delimitar a pluma de contaminação sendo que os trabalhos de campo ocorreram em basicamente duas etapas. A primeira delas entre os dias 7 e 21 de janeiro de 2003, em que foram instalados doze poços de monitoramento (PM-22 a PM-31, PB-02 e PB-03).

A segunda etapa de campo ocorreu entre os dias 6 e 22 de agosto de 2003, onde foram instalados mais treze poços de monitoramento, sendo que sete deles (PM-32 a PM-38) são considerados rasos pois foram instalados em profundidade semelhante aos demais poços de monitoramento instalados na área, e seis deles (PMP-03 a PMP-08) são considerados profundos.

Esta última etapa de campo não se limitou à área interna da indústria, sendo a maioria dos poços de monitoramento instalados em área externa. Desta forma, a área de detalhamento da geologia foi ampliada, o que auxiliou na definição do modelo hidrogeológico conceitual.

A Figura 6.2 apresenta a localização dos diversos poços da área de estudo e no Anexo 03 encontram-se os perfis litológicos e construtivos dos poços instalados durante as duas últimas etapas de campo (de janeiro e de agosto de 2003).



LEGENDA

B IDENTIFICAÇÃO DOS PRÉDIOS DA FÁBRICA

0 1250 2500 3750 5000m
ESCALA 1:2500

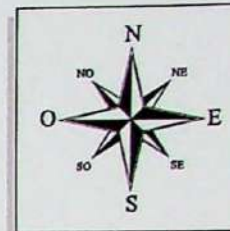
Layout Geral da Fábrica

Figura
6.1

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP





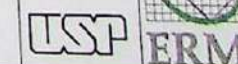
- LEGENDA**
- + PMP-1 POÇO DE MONITORAMENTO - CAMADA 04
 - + PMA-01 POÇO DE MONITORAMENTO - CAMADA 01
 - + PP-01 POÇO DE PRODUÇÃO (BOMBEAMENTO) - CAMADA 6
 - CÔRREGO

0 12.5 25 37.5 50 62.5 75m
ESCALA 1:2500

Mapa de Localização dos Poços Instalados na Área

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Figura
6.2



6.2 GEOLOGIA LOCAL DA ÁREA DE ESTUDOS

A caracterização da geologia local foi baseada principalmente nas descrições obtidas durante as duas etapas de campo e também nos resultados de trabalhos anteriores. A Figura 6.3 apresenta o mapa de localização dos poços de monitoramento e de bombeamento, assim como as orientações das seções geológicas. As Figuras 6.4 a 6.7 apresentam as seções geológicas elaboradas pelo autor, estas que auxiliam na compreensão das camadas descritas abaixo.

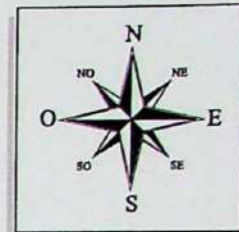
Na área do Prédio B e entorno, os perfis de sondagens dos poços instalados são muito semelhantes. De modo geral, a camada abaixo do nível de concreto até a profundidade média de 4 metros foi descrita como sendo argilo-siltosa, marrom-avermelhada, gradando para areia média-grossa, provavelmente relativo ao processo de formação de solo ("stone line"). Abaixo desta, ocorre um pacote argilo-siltoso a argiloso, muito compactado, de coloração cinza esverdeado, até a profundidade máxima de 16,5 metros (Camada 1).

Após este pacote argiloso, ocorre um pacote de areia fina a grossa, arcossiana, muito friável, até a profundidade máxima de 20 metros (Camada 2). Na base desta volta a ocorrer uma camada argilo-siltoso a argiloso, muito compactado, de coloração cinza esverdeado, até a profundidade máxima de 22 metros (Camada 3).

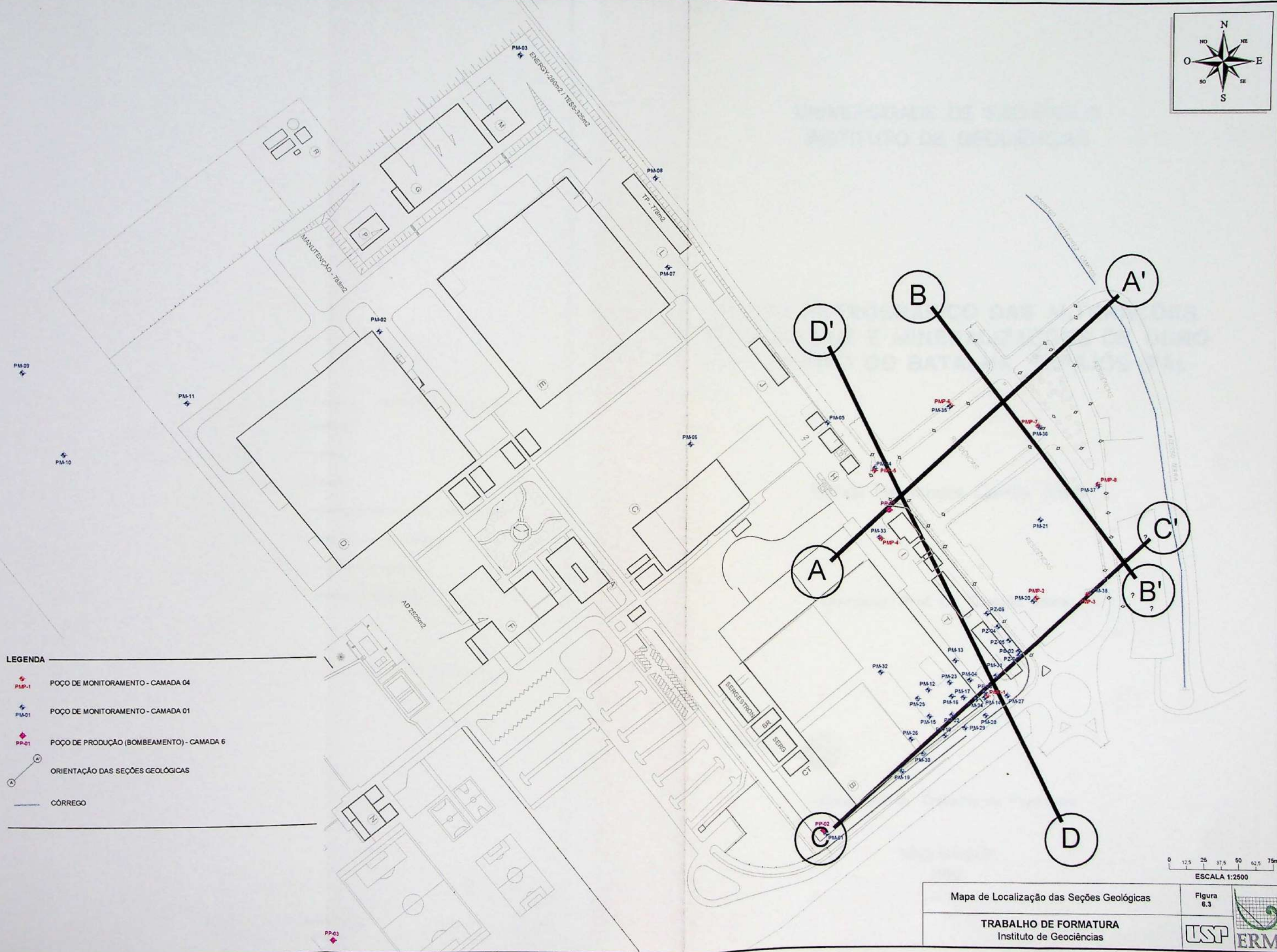
Após este pacote argiloso, ocorre uma intercalação de camada de areias fina a grossas, por vezes freáveis, com camadas argilosas subordinadas, até a profundidade máxima de 29,5 metros (Camada 4).

Em seguida, ocorrem intercalações argilosas e arenosas (com predomínio das camadas argilosas) até a profundidade aproximada de 60 metros (Camada 5). Esta é seguida de camadas arenosas intercaladas com camadas argilosas subordinadas, até profundidade superior a 150 metros (Camada 6).

Tal estratigrafia acima mencionada apresenta uma razoável continuidade horizontal. As camadas 2, 3 e 4 apresentam variações na espessura (sobretudo da camada 3), com aumento de uma em detrimento da outra. Nota-se ainda aumento da fração argilosa na camada 4 a nordeste.



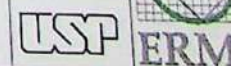
- LEGENDA**
- POÇO DE MONITORAMENTO - CAMADA 04
 - POÇO DE MONITORAMENTO - CAMADA 01
 - POÇO DE PRODUÇÃO (BOMBEAMENTO) - CAMADA 6
 - ORIENTAÇÃO DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS
 - CÔRREGO



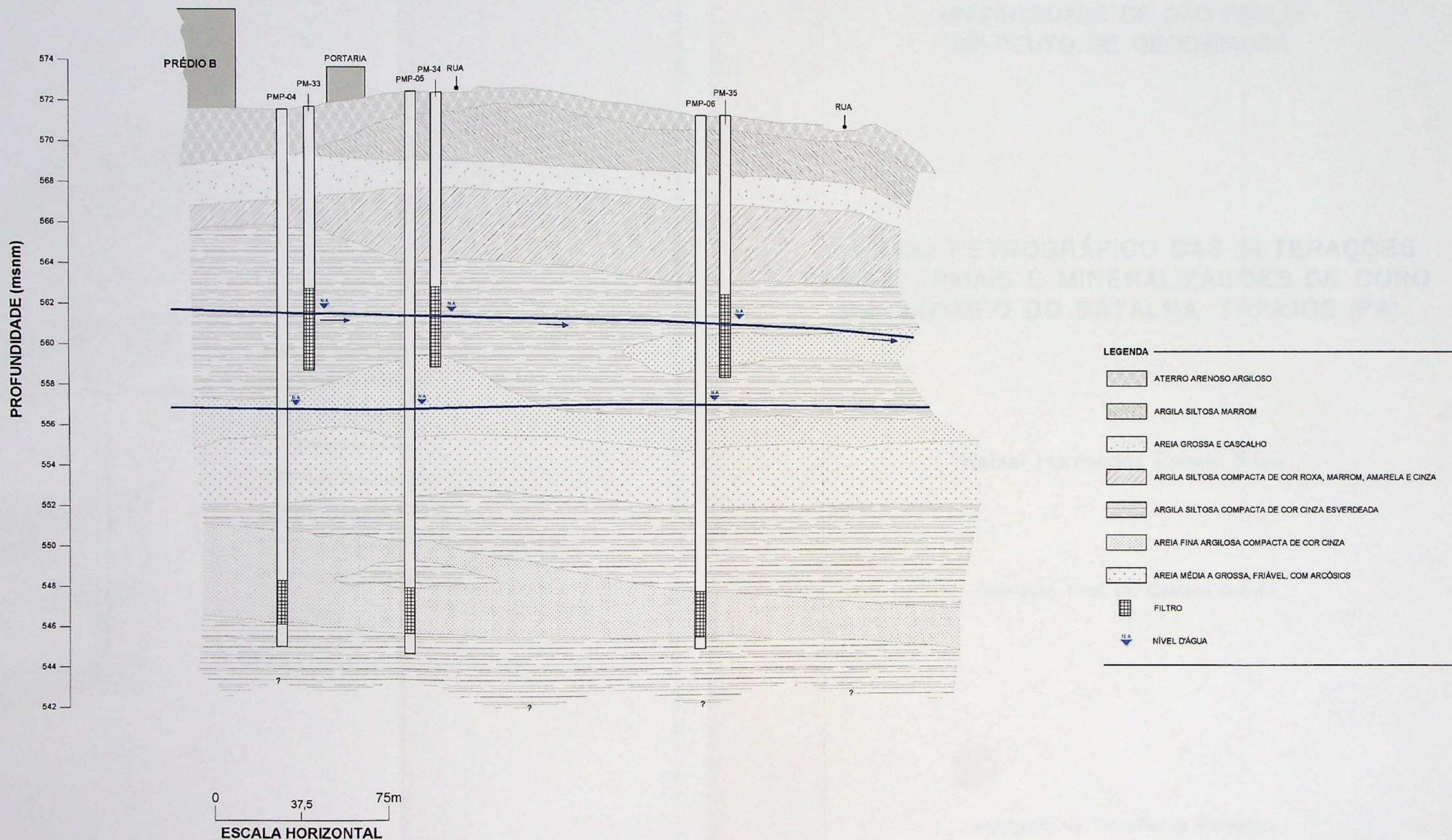
Mapa de Localização das Seções Geológicas

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Figura
6.3



SEÇÃO GEOLÓGICA A-A'



Seção Geológica A - A'

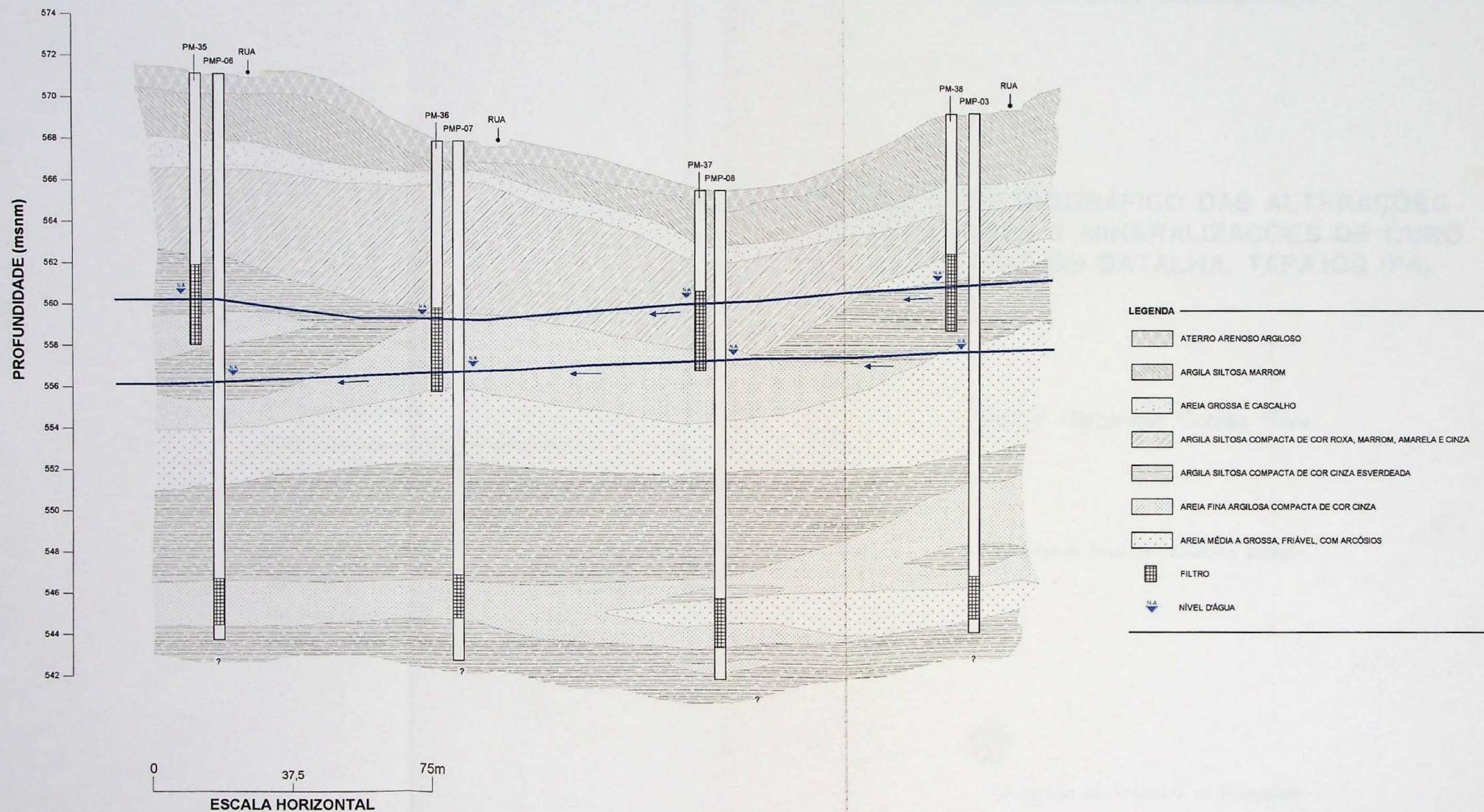
Figura 6.4

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP



SEÇÃO GEOLÓGICA B-B'

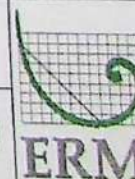


Seção Geológica B - B'

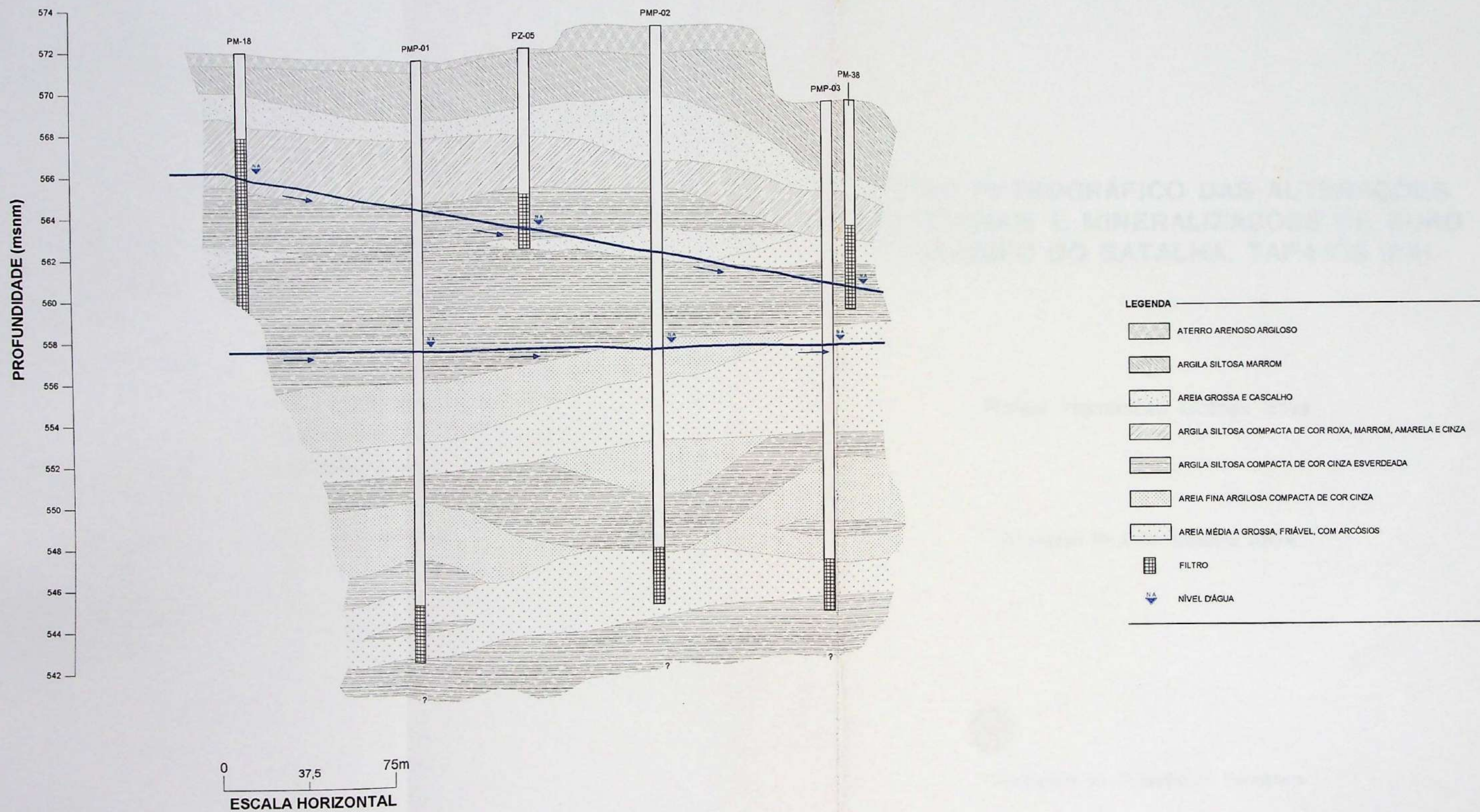
Figura 6.5

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP



SEÇÃO GEOLÓGICA C-C'

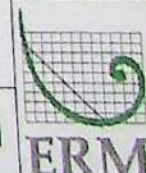


Seção Geológica C - C'

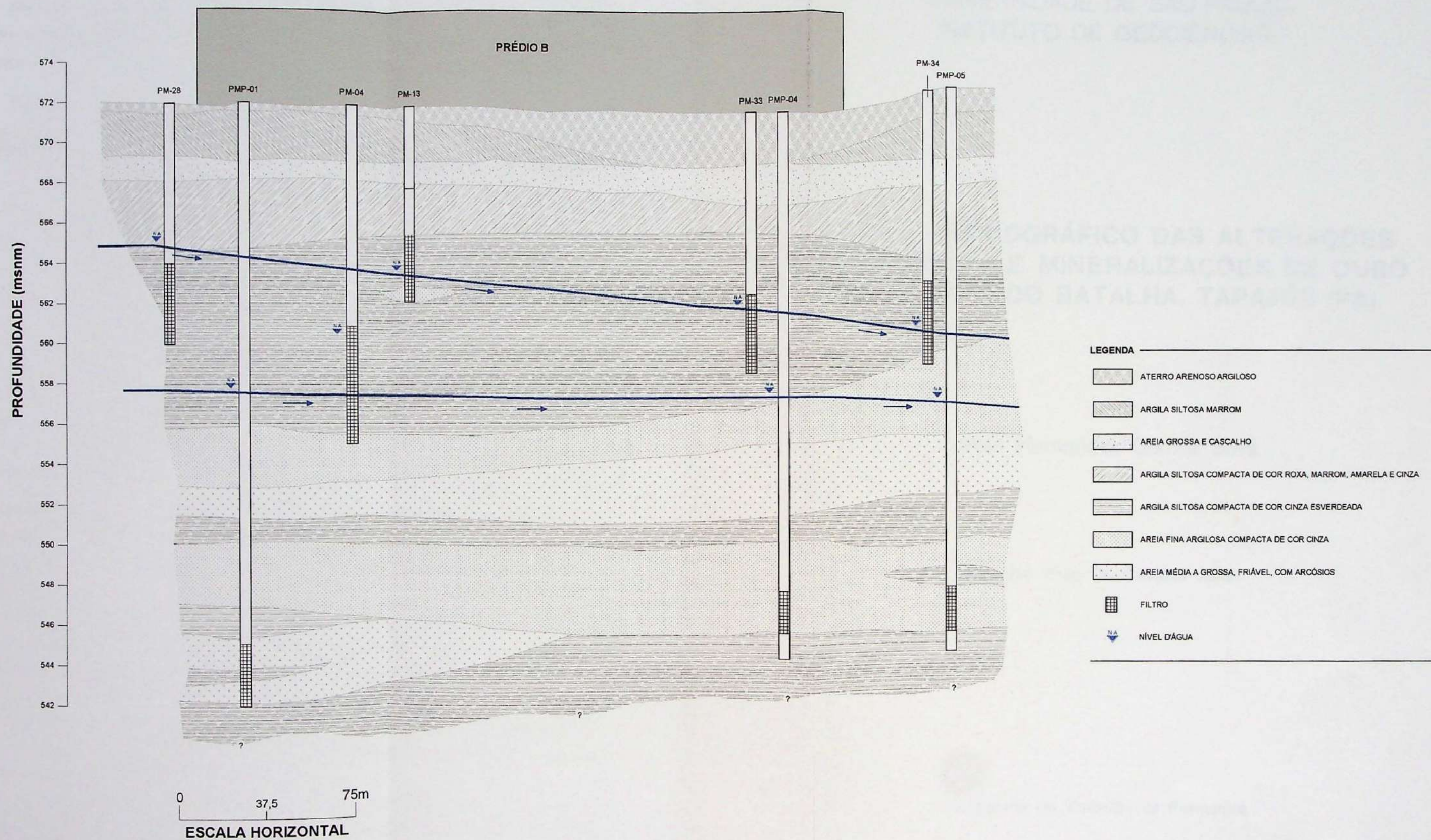
Figura 6.6

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP



SEÇÃO GEOLÓGICA D-D'

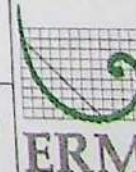


Seção Geológica D - D'

Figura
6.7

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP



6.3 HIDROGEOLOGIA LOCAL DA ÁREA DE ESTUDOS

Baseado nas descrições geológicas de perfis de sondagem, nas medidas de nível de água e nas interpretações de campo feitas pelo autor, foram separadas as seguintes unidades hidrogeológicas, compondo o modelo hidrogeológico conceitual, apresentado na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 – Modelo Hidrogeológico Conceitual

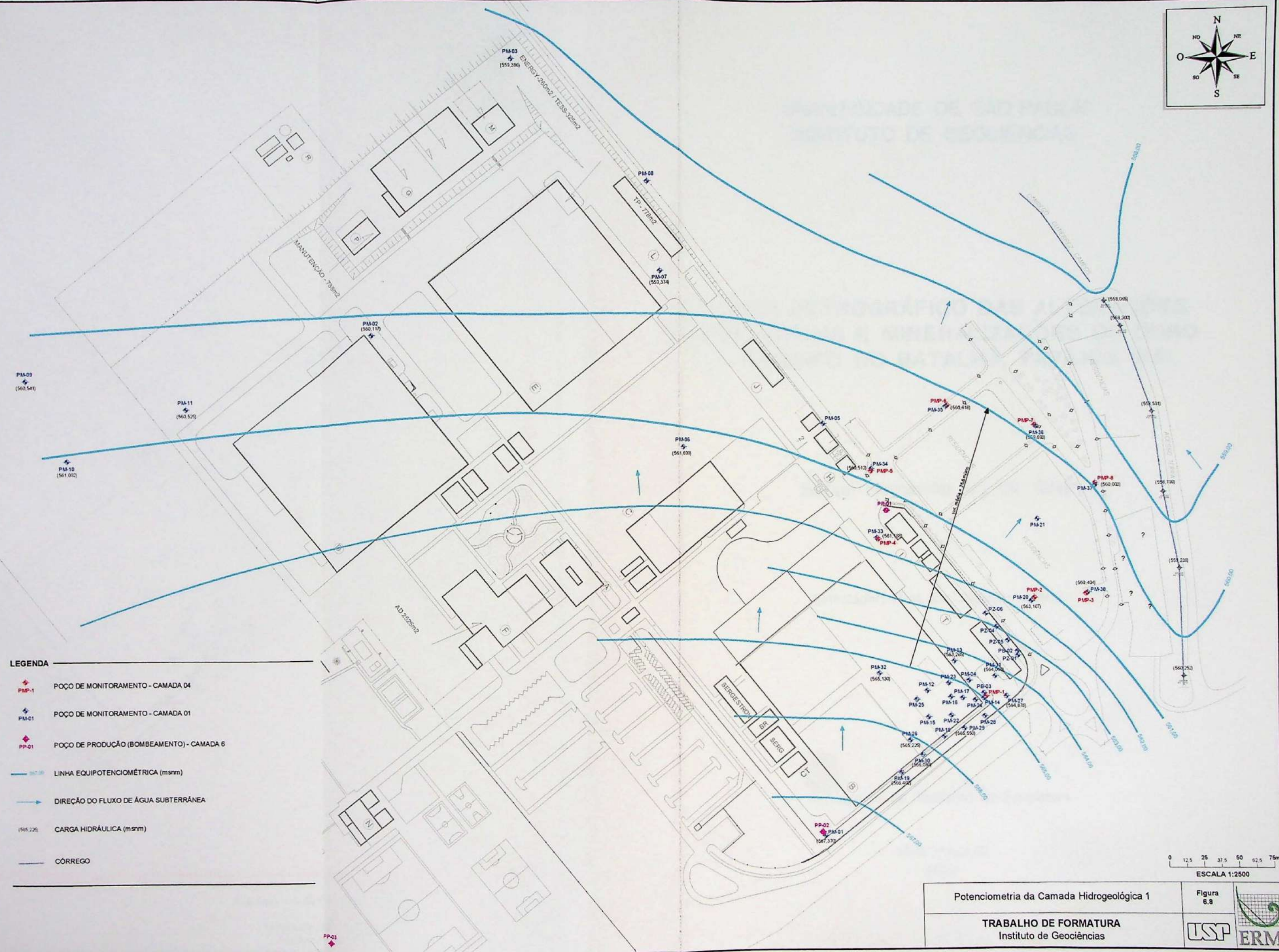
Camada	Descrição	Espessura (m)	Unidade Hidrogeológica
1	Argila-siltosa a argila, muito compactada, de coloração cinza esverdeada.	<16,5	Aquitarde raso
2	Areia fina a grossa, arcossiana, muito friável	3-7	Aqüífero raso (areia A)
3	Argila-siltosa a argila, muito compactada, de coloração cinza esverdeada.	1-5	Aqüífero raso (argila)
4	Intercalações de camadas arenosas, compostas por areia fina a grossa, de coloração ocre a cinza claro com camadas argilosas subordinadas.	2 – 8	Aqüífero raso (areia B)
5	Intercalações argilosas e arenosas (com predomínio das camadas argilosas).	30	Aquitarde profundo
6	Intercalações de camadas arenosas com camadas argilosas subordinadas.	>100	Aqüífero profundo

Foram elaborados dois mapas potenciométricos, relacionados às camadas 1 e 4, apresentado nas Figuras 6.8 e 6.9 respectivamente. Estes foram feitos utilizando-se as cargas hidráulicas dos poços pertinentes à cada camada, medidas no dia 8 de setembro de 2003 (Anexo 02).

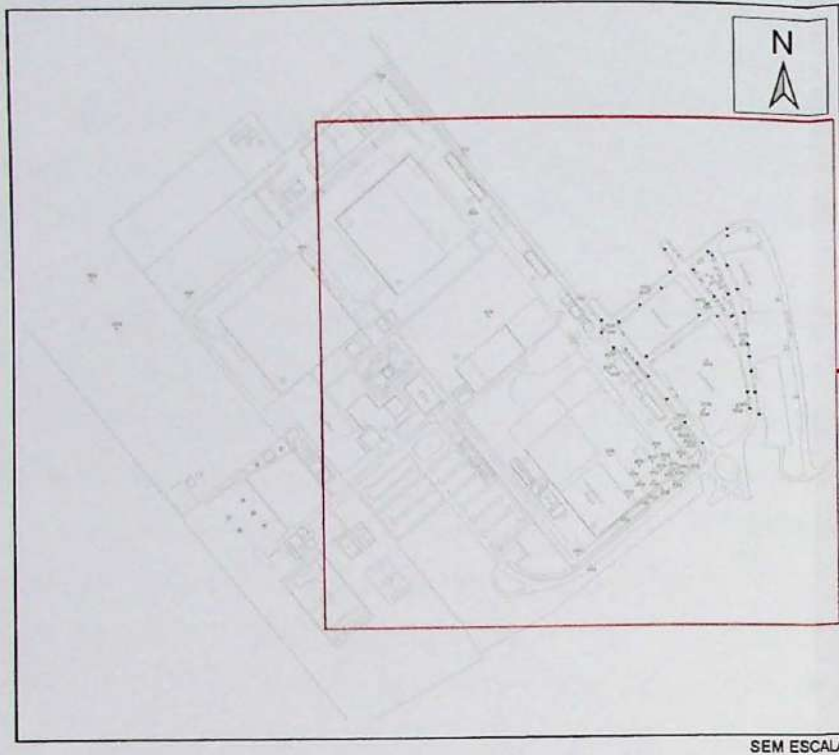
A partir do modelo hidrogeológico conceitual e do mapa potenciométrico da camada hidrogeológica 1 (Figura 6.8), pode-se dizer que o fluxo de água subterrânea na área do Prédio B, referente a camada 1, tem sentido de SSO para NNE, com descarga no córrego Gutierrez Campos, situado a nordeste.

Fazendo a mesma análise para a camada 4, o mapa potenciométrico (Figura 6.9) indica um fluxo de água subterrânea tem sentido de SSE para NNO, aparentemente sem descarga no córrego Gutierrez Campos.

Não existem dados suficientes da camada hidrogeológica 2 para definir sua relação com o córrego. Provavelmente o sentido do fluxo de água subterrânea nesta camada está situada entre as direções definidas para as camadas hidrogeológicas 1 e 4, ou seja, é de S para N.



SITUAÇÃO GERAL

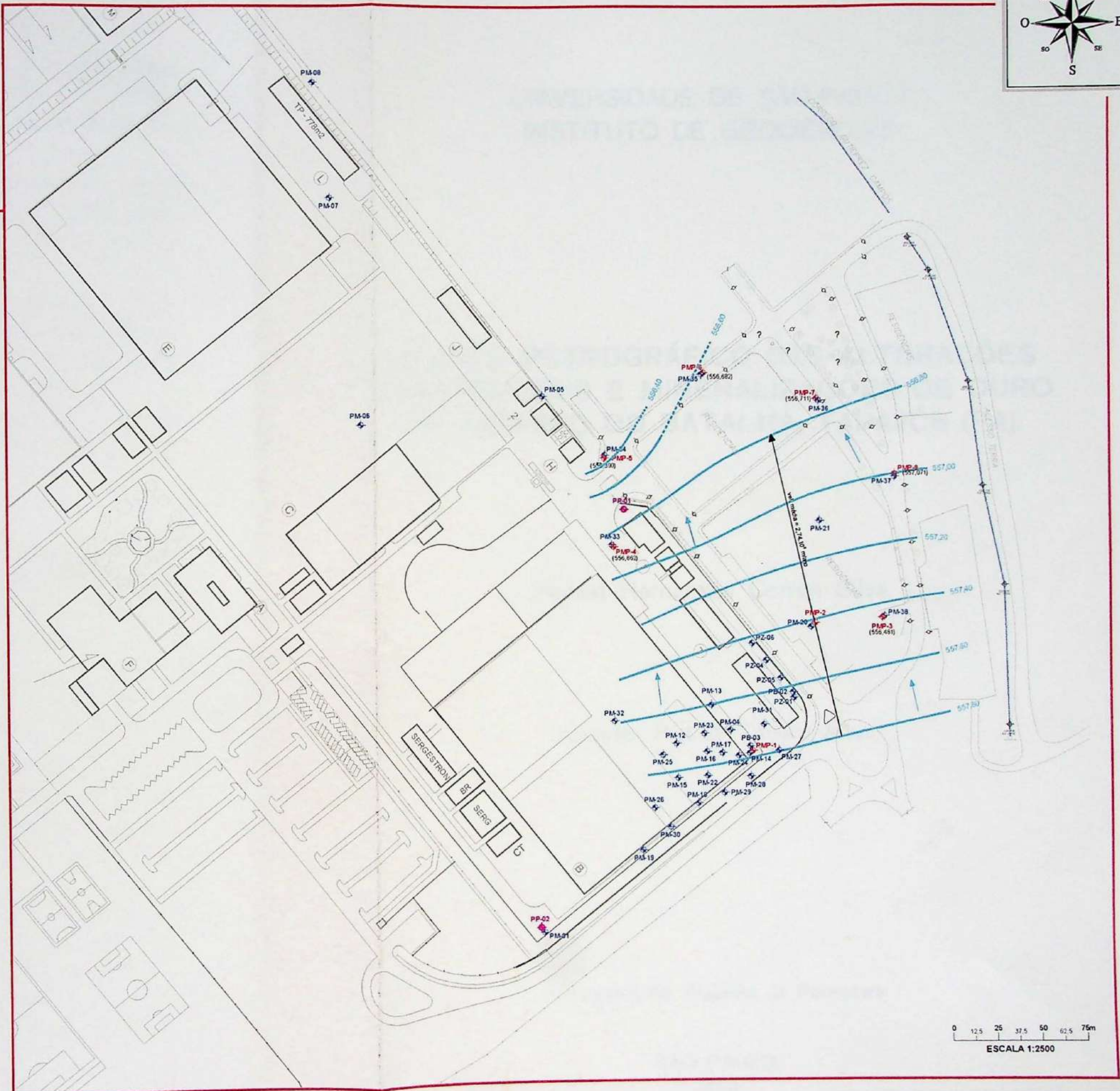


SEM ESCALA

LEGENDA

- PMP-1 POÇO DE MONITORAMENTO - CAMADA 04
- PM-01 POÇO DE MONITORAMENTO - CAMADA 01
- PP-01 POÇO DE PRODUÇÃO (BOMBEAMENTO) - CAMADA 6
- LINHA EQUIPOTENCIOMÉTRICA (msnm)
- DIREÇÃO DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
- (565,226) CARGA HIDRÁULICA (msnm)
- CÔRREGO

DETALHE



0 12.5 25 37.5 50 62.5 75m
ESCALA 1:2500

Potenciometria da Camada Hidrogeológica 4

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Figura
6.9



Não existem dados suficientes da camada 5 e 6 para definir a direção do fluxo de água subterrânea, porém acredita-se que seja semelhante ao da camada 4, visto que o rio Paraíba encontra-se a N da área de estudos e provavelmente se trata da área de descarga destas unidades hidrogeológicas mais profundas.

Foram efetuados três ensaios de condutividade hidráulica na área da indústria nos poços PM-01, PM-14 e PMP-01. Os dados destes ensaios foram tratados com o programa Aquifer Test® (WHI) utilizando-se o método Bouwer-Rice para interpretação, visto que esse é um dos métodos mais utilizados para interpretação desse tipo de ensaios.

Cada um dos poços ensaiados tem sua seção filtrante instalada em um horizonte distinto. O poço PM-01 tem a seção filtrante instalada em areia fina, com pouca matriz argilosa (camada 1), o poço PM-14 em argila pouco siltosa a siltosa (camada 1) e o poço PMP-01 em areia média a grossa, com muita matriz argilosa, intercalada por lentes de argila plástica (camada 4).

As planilhas e os gráficos dos ensaios executados encontram-se no Anexo 04. As condutividades hidráulicas obtidas e a velocidade da água subterrânea para os poços ensaiados podem ser visualizadas na Tabela 6.2 a seguir.

Tabela 6.2 – Condutividade Hidráulica das Camadas 1 e 4

Poços	PM-01	PM-14	PMP-01
Profundidade (metros)	5,5	10,0	30,0
K- Condutividade Hidráulica (m/s)	$1,38 \times 10^{-5}$	$1,42 \times 10^{-7}$	$4,26 \times 10^{-9}$
V- Velocidade da Água Subterrânea (m/ano)	52,66	0,54	$2,74 \times 10^{-3}$

Baseado na tabela 6.2, a velocidade média da camada 1 e da camada 4 foram estimadas em aproximadamente 26,6 e $2,74 \cdot 10^{-3}$ m/ano respectivamente. É válido ressaltar que os gradientes usados para o cálculo da velocidade estão referenciados nas Figuras 6.8 e 6.9 e que o valor de porosidade efetiva usado foi de 0,21 para a camada 1 e 0,28 para a camada 4, valores estes segundo Fetter (1994).

Em relação às áreas de recarga e descarga locais, pode-se dizer que, a área de recarga ocorre em toda a extensão superficial do aquífero, havendo uma diferença porém nos valores entre as áreas que são ou não pavimentadas. A área de descarga local da camada 1, possivelmente também da camada 2, se trata de um córrego que passa a nordeste da indústria chamado de Gutierrez Campos (Figura 6.10), córrego este que por fim deságua no rio Paraíba, que é a área de descarga regional das camadas mais profundas.

6.4 MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

6.4.1 Abordagem

Um modelo de fluxo da água subterrânea foi elaborado com base nos dados levantados durante as sucessivas etapas de investigação na área. A seqüência de atividades desenvolvidas pelo autor, para confecção do modelo, são descritas a seguir:

- Definição da área a ser modelada;
- Elaboração de um modelo digital da topografia;
- Elaboração de um modelo conceitual da geologia;
- Entrada de dados, ou configuração do modelo matemático;
- Calibração do modelo de fluxo de água subterrânea;
- Análise de sensibilidade do modelo; e
- Simulação do comportamento do sistema aquífero em diferentes cenários de bombeamento.

6.4.2 Área Definida para o Modelo

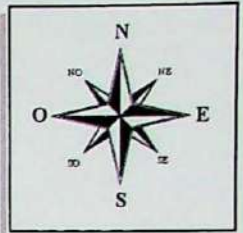
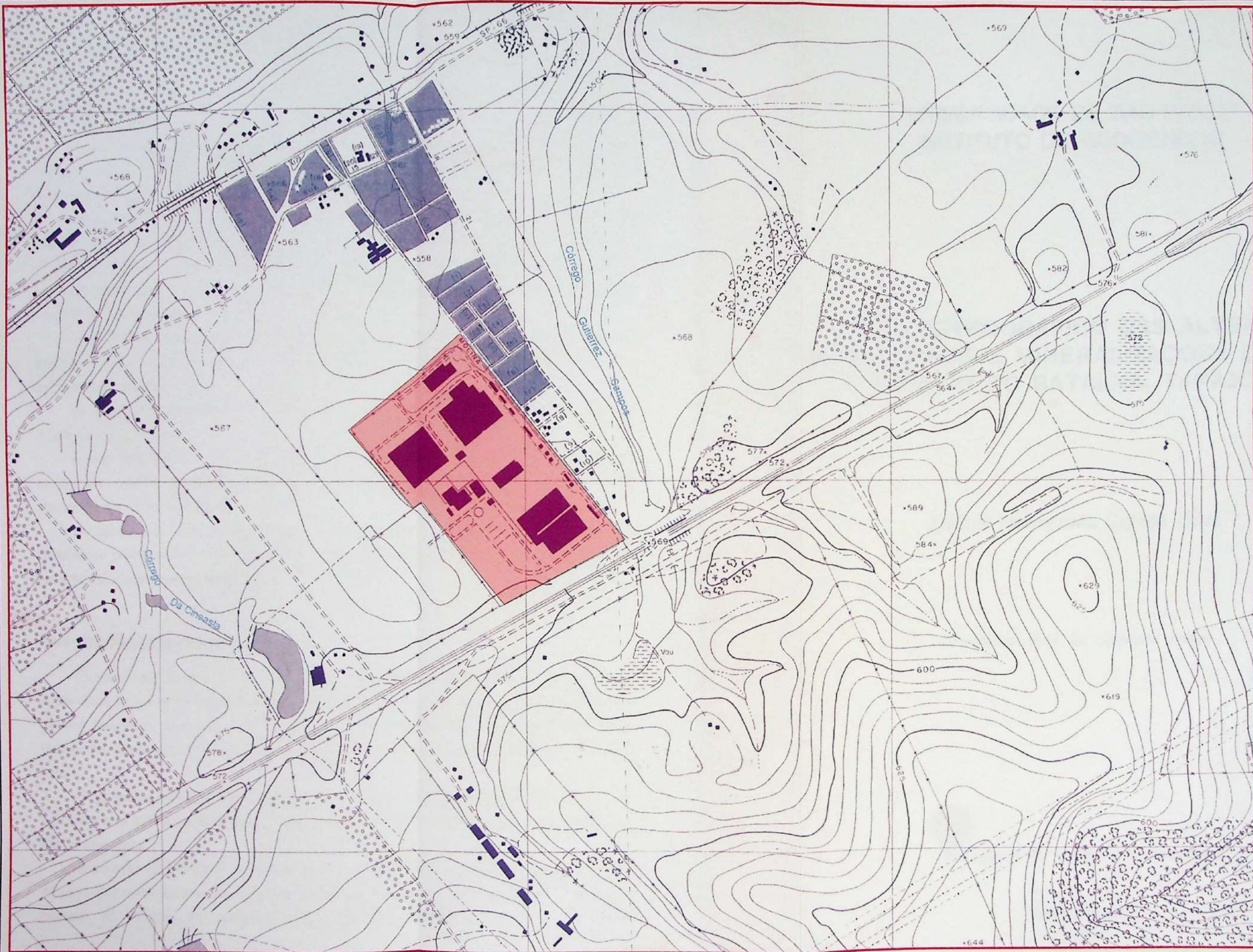
O modelo foi definido em uma área retangular de 3,4 x 2,5 km ou 8,5 km², cuja intenção foi deixar a indústria bem no centro, visto que se trata da área de maior interesse para modelagem e para evitar que o cone de rebaixamento do poço de produção encoste no contorno, o que invalidaria o modelo, já que no contorno as cargas foram definidas a priori.

A Figura 6.10 mostra a área definida para o modelo em mapa topográfico (escala 1:10.000) com destaque para a propriedade da indústria e a Figura 6.11 (Anexo 01) apresenta a base da área definida que foi inserida no modelo.

6.4.3 Modelo Digital da Topografia

Um modelo digital da topografia foi elaborado a partir do mapa topográfico em escala 1:10.000 (Figura 6.10). Um conjunto de valores de contorno foi criado, tabelado no computador e, em seguida, os dados foram interpolados pelo próprio programa Visual MODFLOW®.

O modelo digital da topografia é utilizado para definir a superfície do modelo. A cota da superfície topográfica é importante pois este aspecto influencia significativamente os níveis d'água calculados pelo modelo, principalmente para o aquífero raso (camada 1). A Figura 6.12 (Anexo 01) apresenta a topografia digital da área em três dimensões com exagero vertical de seis vezes.



0 50 100 150 200 250 300m
ESCALA 1:10.000

Fonte: GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SECRETARIA DE ECONOMIA E PLANEJAMENTO
Carta Eugênio de Melo SF-23-YD-II-1-SE-8

LEGENDA:



Área definida para o modelo



Área da Indústria

Área Definida para o Modelo

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Figura
6.10

USP



6.4.4 Hidrologia

A área de estudos está localizada na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, que encontra-se a norte, fora da área definida para o modelo (Figura 6.10). O rio Paraíba do Sul corresponde à zona de descarga regional do aquífero profundo (camada 6).

Com base no mapa topográfico 1:10.000 (Figura 6.10), observa-se que na área do modelo não estão presentes corpos d'água superficial de grande expressão. A leste da propriedade existe um córrego chamado "Córrego Gutierrez Campos". Este corpo d'água está a cerca de 250m de distância da área fonte da contaminação e atua como uma zona de descarga local para o aquífero raso (camada 1).

Mais distante, cerca de 1km a oeste da propriedade da indústria, há também um córrego chamado "Córrego da Cineasta" que alimenta os sistemas de irrigação das áreas cultivadas existentes na região.

As cotas do leito destes cursos d'água foram inseridas no modelo a partir do modelo digital da topografia.

Dados bibliográficos (Iritani, 1998) indicam que as médias de precipitação na região variam entre 1000 e 1500mm/ano. O período mais seco ocorre de junho a agosto e a época de chuvas de dezembro a março.

Utilizando a série de dados disponível compreendendo o período de 1974 a 1988, Iritani determinou precipitação média 1.457mm/ano e evapotranspiração 1.152mm/ano. As taxas de recarga calculadas variam de 94mm/ano a 136mm/ano.

6.4.5 Configuração do Modelo Matemático

Como já mencionado no item 4.4, para a realização da modelagem de fluxo de água subterrânea foi escolhido o aplicativo MODFLOW®, este que é um programa desenvolvido pelo Serviço Geológico Americano (USGS) e que resolve equações de fluxo em 3D, através do método de diferenças finitas e é considerado o programa mais popular da atualidade no mundo todo.

O programa utilizado neste trabalho foi o Visual MODFLOW®, pois se trata de um aplicativo que auxilia na entrada de dados e também nas formas de saída após o modelo ter sido processado.

O domínio do modelo é um retângulo com a malha, dimensionada da seguinte maneira: 10 camadas matemáticas com 89 linhas por 75 colunas somando um total de 6675 células por camada do modelo. As células possuem diferentes dimensões devido ao refinamento

diferenciado da malha. Este que foi feito a partir da região de interesse em que se tinha maiores informações, onde as células possuem uma largura de 5m, se espaçando para as bordas do modelo onde as células chegam a uma largura de até 170m. A Figura 6.13 (Anexo 01) apresenta o domínio do com seu respectiva malha.

Considerando-se a complexa geologia da área e a sucessão de vários níveis aquíferos, o modelo foi elaborado em três dimensões. Algumas camadas geológicas por serem muito espessas foram divididas matematicamente resultando em 10 camadas no modelo, numeradas de L1 a L10, como descrito na Tabela 6.3 a seguir.

Tabela 6.3 – Unidades Hidrogeológicas do Modelo

Camada no Modelo	Correspondente nas camadas hidrogeológicas	Nome	Condutividade Hidráulica inicial (m/s)	
			Kx,y	Kz
L1	1	Aquitarde raso	1.10 ⁻⁷	1.10 ⁻⁹
L2	2	Aquífero raso (areia A)	1.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁴
L3	3	Aquífero raso (argila)	1.10 ⁻⁷	1.10 ⁻⁹
L4	4	Aquífero raso (areia B)	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁷
L5 e L6	5	Aquitarde profundo	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁹
L7, L8, L9 e L10	6	Aquífero profundo	1.10 ⁻⁵	1.10 ⁻⁸

Baseado no que foi definido pelo modelo hidrogeológico conceitual (Tabela 6.1), foi considerada a existência de anisotropia vertical como mostrado nos valores de condutividade hidráulica inicial inseridos no modelo apresentado na Tabela 6.3. As condutividades hidráulicas iniciais são valores estabelecidos antes do modelo ser processado e funcionam como a primeira tentativa de calibração do modelo. A Figura 6.14 (Anexo 01) apresenta uma seção do modelo em que se pode visualizar todas as camadas diferenciadas por cores correspondentes aos diferentes valores de condutividade hidráulica inicial.

As condições de contorno nas bordas do modelo foram inseridas como sendo de tipo 1, ou seja, condição de carga hidráulica constante. Esta foi feita de maneira diferenciada para as diferentes camadas do modelo, conforme o descrito abaixo:

- Para a camada L1 as cargas hidráulicas foram definidas a partir da topografia digital e do nível d'água subterrânea médio desta camada, este que foi definido, a partir das informações dos poços de monitoramento da área, como sendo de 6m de profundidade;

- Para a camada L4 as cargas hidráulicas foram definidas a partir do mapa potenciométrico referente a esta camada (Figura 6.9), em que as linhas equipotenciais foram extrapoladas para as bordas da área do modelo;
- Para as camadas L2 e L3 as cargas hidráulicas foram definidas a partir de uma interpolação entre os valores das cargas hidráulicas das camadas L1 e L4; e
- Para as camadas L5 a L10, devido à falta de informações referentes às suas cargas hidráulicas, foram usados os mesmos valores da camada L4, visto que L4 já é considerada uma camada razoavelmente profunda e seus valores de carga hidráulica não devem variar significativamente com a profundidade.

Os corpos d'água superficiais foram inseridos como drenos, pois acredita-se que representam sempre áreas de descarga e não há inversão do fluxo devido a flutuações sazonais dos aquíferos. Para a inclusão dos drenos foram utilizados valores de condutância que foram calculados, obedecendo o que foi definido por McDonald & Harbaugh (1988), segundo a equação:

$$\text{Condutância} = (L \times C \times K) / E$$

Onde:

L = Largura do Dreno;

C = Comprimento do dreno na célula;

K = Condutividade Hidráulica do sedimento do fundo do dreno; e

E = Espessura do sedimento do fundo do dreno.

Para o cálculo dos valores de condutância se assumiu que a largura média os drenos (L) era de 2m, a condutividade hidráulica do sedimento do fundo (K) era de 1.10^{-7} m/s, a espessura de sedimento no fundo do dreno (E) era de 0,5m e foram assumidos dois valores médios de comprimento do dreno na célula (C), um fora da área refinada da malha de 200m e outro dentro da área refinada da malha de 10m. Esses valores resultaram em duas condutâncias distintas de 7 m²/dia e 0,4 m²/dia para diferentes porções dos drenos conforme mostrado na Figura 6.15 (Anexo 01).

Os valores de coeficiente de armazenamento não são necessários na execução de um modelo estacionário, portanto não foram inseridos. As porosidades efetivas das diversas camadas hidrogeológicas não são parâmetros de modelos de fluxo. Todavia elas são necessárias na avaliação das trajetórias de partículas inseridas no fluxo, assunto que será tratado mais adiante. As porosidades efetivas adotadas para as diferentes camadas do modelo foram definidas segundo Fetter (1994) e estão apresentadas na Tabela 6.4 a seguir.

Tabela 6.4 – Porosidade Efetiva das Camadas do Modelo

Camadas do Modelo	Porosidade Efetiva
L1, L3, L5 e L6	0,21
L2, L4, L7, L8, L9 e L10	0,28

Por fim foram inseridos no modelo todos os poços de monitoramento e de bombeamento existentes na área. Os poços de monitoramento somam um total de 52 denominados de: PZ-01, PZ-04 a PZ-06, PM-01 ao PM-38, PMP-01 ao PMP-08, PB-02 e PB-03. A localização dos poços pode ser visualizada na Figura 6.3.

É válido ressaltar que na área da indústria existem 3 poços de bombeamento, ou produção, denominados de PP-01 a PP-03. No entanto o único deles que funciona sem parar a uma vazão de 90 m³/dia é o poço PP-02 que foi inserido no modelo com seu filtro bombeando somente as camadas L7, L8 e L9. Sua localização também pode ser visualizada na Figura 6.3.

6.4.6 Calibração do Modelo Matemático

A calibração do modelo, como já dito no item 4.4, ocorreu no período entre os dias 15 de setembro e 05 de outubro de 2003. O procedimento de calibração do modelo foi um tanto quanto exaustivo pois foi feito a partir do método de “tentativa e erro”, em que sucessivas simulações foram processadas variando principalmente os valores de $K_{x,y}$ e K_z para as diferentes camadas do modelo.

Os valores da taxa de recarga, de evapotranspiração e a profundidade de extinção foram ajustados durante a calibração de acordo com as informações extraídas da bibliografia disponível para a área (Iritani, 1998) e encontram-se listadas na Tabela 6.5. É válido ressaltar que profundidade de extinção significa a profundidade máxima em que a evapotranspiração ainda é atuante.

Foram definidas duas zonas de recarga distintas em que a propriedade da indústria, por apresentar impermeabilização, recebeu um valor mais baixo que o resto da área definida para o modelo. As diferentes áreas de recarga definidas para o modelo podem ser visualizadas na Figura 6.16 (Anexo 01).

Tabela 6.5 – Dados de Recarga Utilizados no Modelo Calibrado

Área	Recarga	Evapotranspiração	Profundidade de Extinção
Propriedade da Indústria (impermeabilizada)	50 mm/ano	1000 mm/ano	3m
Resto da área modelada (não impermeabilizada)	70 mm/ano		

Os valores de condutividade hidráulica foram ajustados a partir dos valores iniciais apresentados na Tabela 6.3 e seus valores para o modelo calibrado podem ser visualizados na Tabela 6.6 a seguir.

Tabela 6.6 – Valores Calibrados de Condutividade Hidráulica para as Unidades Hidrogeológicas do Modelo

Camada no Modelo	Correspondente nas camadas hidrogeológicas	Nome	Condutividade Hidráulica calibrada (m/s)	
			K _{x,y}	K _z
L1	1	Aquitarde raso	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-9}$
L2	2	Aqüífero raso (areia A)	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
L3	3	Aqüífero raso (argila)	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-9}$
L4	4	Aqüífero raso (areia B)	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
L5 e L6	5	Aquitarde profundo	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$
L7, L8, L9 e L10	6	Aqüífero profundo	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$

Com os valores calibrados de condutividade hidráulica para as diferentes camadas do modelo é possível se observar que as camadas L2 e L4, diferentemente das outras camadas do modelo, não apresentaram anisotropia vertical.

Para que o modelo fosse considerado calibrado e representativo do sistema real, foram usados critérios quantitativos e qualitativos de calibração. A calibração quantitativa foi baseada em dois principais critérios: o balanço de massa, este que deve ser menor que 1%, e a correlação dos resíduos de carga (média normalizada), esta que deve ser inferior a 10%. A Tabela 6.7 foi elaborada a partir dos dados apresentados pelo aplicativo Visual MODFLOW® em relação ao balanço de massa.

Tabela 6.7 – Resultado do Balanço de Massa

Volumes de Entrada "IN" (m ³)	Volumes de Saída "OUT" (m ³)
IN: Storage = 0.000000 Constant Head = 21928.484400 Wells = 0.000000 Drains = 0.000000 Recharge = 1364.563100 ET = 0.000000 River Leakage = 0.000000 Head Dep Bounds = 0.000000 Total In = 23293.046900	OUT: Storage = 0.000000 Constant Head = 23008.990200 Wells = 90.000000 Drains = 61.750400 Recharge = 0.000000 ET = 134.281500 River Leakage = 0.000000 Head Dep Bounds = 0.000000 Total Out = 23295.021500
Total In – Total Out = – 1.974600	
Discrepância = – 0.010000 %	

Como pode ser visto na Tabela 6.7 a discrepância foi de –0,01%, ou seja, bem menor do que o valor máximo aceito para um modelo calibrado que é de 1%. Ainda em relação ao balanço de massa, a Figura 6.17 (Anexo 01) apresenta um gráfico com as entradas e saídas dos volumes de água no modelo, podendo-se assim obter uma melhor visualização dos mesmos.

A correlação dos resíduos de carga (média normalizada) feita para o modelo calibrado esta apresentado no gráfico da Figura 6.18 (Anexo 01), em que são comparados os valores das cargas hidráulicas observadas em campo com as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo. A Tabela 6.8 apresenta um resumo dos valores obtidos na correlação dos resíduos de carga.

Tabela 6.8 – Valores Obtidos na Correlação dos Resíduos de Carga

Nº de Pontos Observados	Erro Médio	Erro Médio Absoluto	Erro Quadrático Médio (RMS)	RMS Normalizado
52	0,1452267 m	0,947271 m	1,076474 m	9,581435 %

Como pode ser visto na Tabela 6.8 a média normalizada dos resíduos de carga foi de 9,58 %, ou seja, menor que o valor máximo permitido para um modelo calibrado que é de 10%. Desta forma, em relação aos critérios quantitativos de calibração o modelo elaborado apresenta-se devidamente calibrado.

Para efeito de calibração é válido ressaltar que os pontos de observação da carga hidráulica, nos poços de monitoramento, foram posicionados no centro da seção filtrante de cada poço, sempre adequando-se sua posição à camada geológica mais representativa em cada caso.

O critério qualitativo de calibração usado foi a comparação entre os mapas potenciométricos elaborados com os mapas gerados a partir das simulações. Esta comparação só pode ser feita em relação as camadas 1 e 4, pois são as únicas em que se tinha informação suficiente para a elaboração de um mapa potenciométrico manual (Figuras 6.8 e 6.9), e se mostrou um tanto quanto satisfatória. Apesar disso, o modelo, quando processado, gerou mapas potenciométricos para todas as camadas matemáticas. As Figuras 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.23 e 6.24 (Anexo 01) apresentam os mapas potenciométricos simulados para as camadas hidrogeológicas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 respectivamente.

Para que se tenha uma melhor visualização do critério qualitativo de calibração usado deve-se comparar as Figuras 6.8 com a 6.19 (Anexo 01), que são os mapas potenciométricos da camada 1 manual e simulado respectivamente e as Figuras 6.9 e 6.22 (Anexo 01), que são os mapas potenciométricos da camada 4 manual e simulado respectivamente.

Portanto pode-se dizer que o modelo encontra-se devidamente calibrado tanto quantitativamente como qualitativamente, sendo representativo do sistema real. No entanto é sempre válido ressaltar que não se trata de um modelo absoluto, pois ele foi elaborado com as informações disponíveis atualmente, visto que se, futuramente, novas informações forem geradas e estas contradigam o que foi apresentado pelo modelo, este deve ser reavaliado e consequentemente recalibrado.

6.4.7 Análise de Sensibilidade

De acordo com Anderson & Woessner (1992), a análise de sensibilidade é uma maneira de avaliar as incertezas do modelo. Esta análise foi feita pelo autor logo após a calibração do modelo e consistiu em sucessivas simulações em que, assim como no processo de calibração, os valores de condutividade hidráulica foram variados para que se pudesse verificar quais deles são mais ou menos sensíveis ao modelo, isto é, quais deles afetam mais ou menos as cargas hidráulicas simuladas.

Os valores de condutividade hidráulica que afetam pouco, razoavelmente ou muito as cargas hidráulicas simuladas foram divididos como de menor, média e maior sensibilidade respectivamente. Desta forma a Tabela 6.9 apresenta o resultado dessa análise de sensibilidade, onde $K_{x,y1}$ representa a condutividade hidráulica horizontal da camada

hidrogeológica 1 e K_z1 representa a condutividade hidráulica vertical da camada hidrogeológica 1 e assim por diante com os números variando de acordo com a respectiva camada hidrogeológica.

Tabela 6.9 – Resultado da Análise de Sensibilidade

Menor Sensibilidade	Média Sensibilidade	Maior Sensibilidade
$K_{x,y,z4} < K_{x,y3} < K_{x,y,z2}$	$K_{x,y6} < K_{x,y5} < K_{z6}$	$K_{z5} < K_{z3} < K_{x,y1} < K_{z1}$

A análise de sensibilidade, da mesma forma que para as condutividades hidráulicas, também foi feita para os parâmetros de recarga e evapotranspiração. No entanto estes não se mostraram muito sensíveis ao modelo, ou seja, quando tiveram seus valores variados, dentro de intervalos possíveis para a área de estudo, as cargas hidráulicas simuladas não apresentaram alterações significativas.

6.4.8 Simulação de Cenários de Bombeamento

6.4.8.1 Situação Atual

Este cenário foi considerado como a situação de equilíbrio do aquífero profundo, uma vez que os poços de produção encontram-se em operação há vários anos em regime permanente, constituindo o abastecimento total da indústria. A vazão atual é de 90 m³/dia por poço de produção, porém como já dito somente o poço PP-02 encontra-se em constante atividade, logo a vazão atual total da planta é de 90 m³/dia.

Neste cenário (Figuras 6.19 a 6.24 (Anexo 01)), observa-se que o bombeamento no aquífero profundo (camada hidrogeológica 6), feito pelo poço PP-02, não interfere na dinâmica do aquífero raso (camadas L2 a L4). O fluxo apresenta uma velocidade que varia de camada para camada, num intervalo de 0,44 m/ano (camada L4) a 14,51 m/ano (camada L1), sendo que os gradientes hidráulicos das camadas L4 e L1 são, aproximadamente, 0,5 % e 2,5 % respectivamente.

Os valores de velocidade de fluxo obtidos a partir da simulação, não são os mesmos daqueles calculados para o modelo hidrogeológico conceitual (Tabela 6.2), porém são bastante compatíveis. Isto porque deve-se levar em consideração de que a velocidade de fluxo apresentada na Tabela 6.2 foi calculada em duas dimensões (2-D) e que o modelo matemático

a calcula em três dimensões (3-D) sendo, portanto, mais representativa do sistema aquífero real.

Para que se pudesse entender como se comporta a contaminação a partir da área fonte, foi feita uma simulação de caminamento de partículas utilizando-se do programa Modpath que faz parte do aplicativo Visual MODFLOW®. O Modpath desenha o caminamento de partículas sob velocidade de fluxo advectivo da água subterrânea, não considerando, portanto, a dispersão, a degradação e a retardação do contaminante.

As partículas inseridas no modelo podem ser observadas na Figura 6.25 (Anexo 01). Elas foram dispostas desta forma no intuito de simular a área fonte que, como já observado no item 6.1, se trata do prédio B da fábrica.

A Figura 6.26 (Anexo 01) ilustra a trajetória simulada dos compostos dissolvidos a partir da área fonte, dividida em intervalos de 10 anos, até um máximo de 100 anos. É válido ressaltar que as linhas equipotenciais apresentadas na figura são representativas da camada L4. Inicialmente, a pluma migra com sentido de SO para NE, segundo o mapa potenciométrico simulado da camada L1 (Figura 6.19 (Anexo 01)) que sofre influência do córrego Gutierrez Campos. Seguindo sua trajetória, antes mesmo de ultrapassar a propriedade da indústria (aproximadamente quando cruza a linha equipotencial 589), devido ao caráter predominantemente vertical do fluxo (Figura 6.27 (Anexo 01)), ocorre a sucessiva migração da pluma para as camadas inferiores L2 a L6, em que o fluxo passa a ter sentido de S para N.

Tendo isso em vista dois aspectos podem ser observados: o primeiro deles é que, como a indústria foi fundada em 1974 e portanto se passaram 29 anos até hoje, mesmo que a contaminação por solventes clorados tenha ocorrido no primeiro ano de operação da fábrica, a pluma simulada, como apresentada na Figura 6.26 (Anexo 01), teria um diâmetro de aproximadamente 50 m e ainda não teria ultrapassado os limites da propriedade da indústria, não atingindo portanto potenciais receptores existentes fora da área de estudo. O segundo aspecto é que o aquífero profundo (camadas L7 a L10) não é atingido nessa simulação, mesmo após o longo período de 100 anos de migração que foi simulado.

6.4.8.2 Sistema de Remediação

A simulação realizada para situação atual, apresentada no item anterior, mostra que devido ao tempo de operação da indústria a pluma ainda não atingiu potenciais receptores existentes fora da área da fábrica, isso considerando somente a advecção. No entanto tal simulação também indica que, futuramente, se nenhuma ação de remediação for tomada, algum possível receptor externo poderá ser exposto aos contaminantes da pluma de

contaminação. O mesmo raciocínio é válido em relação ao poço de produção PP-02 do aquífero profundo (camadas L7 a L10), que apesar de, mesmo em 100 anos, ainda não ter sido alcançado pela pluma, devido ao caráter predominantemente vertical do fluxo (Figura 6.27 (Anexo 01)), este possivelmente será atingido em algum momento.

Para tanto, o autor propôs a simulação de um sistema de remediação cujo objetivo desejado, do ponto de vista hidrodinâmico, foi efetuar a contenção hidráulica e controle do movimento da água subterrânea contaminada, a fim de impedir uma maior expansão da pluma de contaminação. Para que este objetivo seja alcançado é necessário que as seguintes medidas sejam verificadas:

- Minimização da estagnação da água subterrânea; e
- Contenção da zona fonte localizada abaixo do Prédio B.

O sistema de remediação proposto e simulado foi do tipo "Pump & Treat" (bombeamento e tratamento), em que uma barreira hidráulica, composta por cinco poços de bombeamento dispostos de maneira linear no limite da propriedade da indústria, faria o bombeamento da água contaminada e esta seria tratada dentro da própria planta da fábrica. A Figura 6.28 (Anexo 01) apresenta o sistema de remediação proposto.

Para a elaboração da barreira hidráulica um grande número de configurações foram testadas, sendo que foi escolhida aquela que apresentou maior segurança com menor bombeamento e portanto, a de melhor relação custo/benefício.

Para a realização da simulação do sistema proposto foram inseridos no modelo cinco poços de bombeamento, dispostos assim como mostra a Figura 6.28 (Anexo 01), com sua seção filtrante localizada no aquífero raso, ou seja, nas camadas L2 a L4 do modelo. A vazão de bombeamento determinada para cada poço foi de $2\text{m}^3/\text{dia}$, visto que é uma vazão razoavelmente baixa e que não deve implicar em restrições técnicas ao sistema proposto.

A simulação com o sistema funcionando gerou novos mapas potenciométricos para as diferentes camadas do modelo. Tais mapas estão apresentados nas Figuras 6.29 a 6.32 (Anexo 01) que são referentes as camadas L1 a L4 respectivamente. O que pode ser observado desta simulação é que na camada L1 ocorre uma convergência das linhas equipotenciais em volta dos poços de bombeamento, como um cone de rebaixamento do nível d'água subterrânea. Este que vai sendo cada vez mais suavizado nas camadas inferiores L2, L3 e L4, sendo quase que imperceptível na camada L4.

Para que se pudesse entender como a pluma de contaminação se comportaria mediante o sistema de remediação implantado no modelo, novamente foi feita uma simulação de caminamento de partículas a partir da área fonte seguindo o mesmo procedimento adotado para a simulação da situação atual apresentada no item anterior.

O resultado dessa simulação pode ser visualizado nas Figuras 6.33 e 6.34 (Anexo 01). Tais figuras mostram que o sistema de remediação proposto se mostrou eficaz, sendo capaz de conter toda a pluma de contaminação de modo que atendeu aos objetivos hidrodinâmicos propostos.

Apesar do sistema de remediação proposto ter se mostrado eficaz, outra simulação foi feita, no intuito de realmente se comprovar a eficiência do sistema. Para tanto, novamente, foi simulado o caminhamento de partículas, porém para uma situação em que um dos poços do sistema deixe de funcionar abruptamente. O objetivo desta simulação foi verificar se, por algum problema qualquer, algum dos poços se tornasse inoperante, o sistema seria capaz de conter a pluma contaminante.

Para tanto o que foi feito foram cinco sucessivas simulações, em que, em cada uma delas, se desligou o bombeamento de um dos cinco poços do sistema. O resultado apresentado pelas simulações mostrou que, mesmo com um dos seus poços inoperantes, o sistema se mostrou eficaz e capaz de conter a pluma contaminante. Como exemplo a Figura 6.35 (Anexo 01) apresenta o resultado de uma dessas simulações em que, no caso, o poço do meio do sistema encontrava-se inoperante.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O modelo matemático calibrado apresentou um resultado bastante compatível com o esperado, quando comparado com o modelo hidrogeológico conceitual. Principalmente se levar em consideração as camadas L1 e L4 em que se pode comparar as linhas equipotenciais simuladas (Figuras 6.19 e 6.20 (Anexo 01)) com os mapas potenciométricos das mesmas camadas (Figuras 6.8 e 6.9).

Quando observada a simulação do caminhamento de partículas a partir da área fonte (Figura 6.26 e 6.27 (Anexo 01)), nota-se que o fluxo advectivo da água subterrânea é predominantemente vertical e um tanto quanto lento (0,44 a 14,51 m/ano), visto que, em 100 anos, as partículas ainda se encontram dentro do domínio do modelo e não chegaram a atingir o aquífero profundo (camadas L7 a L10).

Em relação à velocidade do fluxo de água subterrânea apresentada pelo modelo, é válido ressaltar que a camada L1, apesar de ter sido considerada como um aquífero (Tabela 6.3), apresenta uma velocidade (14,51 m/ano) maior que da camada L4 (0,44 m/ano), que foi considerada como um aquífero (Tabela 6.3). A princípio este fato é estranho visto que um aquífero normalmente possui uma velocidade de fluxo menor que de um aquífero. No entanto ao observarmos os gradientes hidráulicos de ambas as camadas (2,5 % camada L1 e 0,5 % camada L4) esta diferença entre as velocidades de fluxo é explicada.

Em termos de área fonte de contaminação pode-se dizer que esta possui, no máximo, 29 anos visto que a fábrica foi fundada em 1974. No entanto apesar de não se saber ao certo quando se deu o vazamento do tanque, no prédio B, que continha solventes clorados, acredita-se que não foi nos primeiros anos de operação da fábrica. Desta forma analisando a Figura 6.26 (Anexo 01), em que as setas, que marcam a trajetória das partículas, estão de dez em dez anos, observa-se que o centro de massa da pluma de contaminação ainda não ultrapassou os limites da propriedade da indústria. No entanto nota-se também que, se nenhuma medida de contenção da pluma for proposta, ela não só ultrapassará os limites da propriedade da fábrica, como algum possível receptor externo poderá ser exposto aos seus contaminantes.

Além disso, em relação ao aquífero profundo (camadas L7 a L10) pode-se dizer que apesar de ainda não ter sido alcançado pela pluma de contaminação, este provavelmente será atingido em algum momento, devido ao caráter predominantemente vertical do fluxo.

Tendo isso em vista foi simulado um sistema de remediação do tipo "Pump & Treat" (bombeamento e tratamento), com a instalação de uma barreira hidráulica conforme mostra a Figura 6.28 (Anexo 01). Esse sistema se mostrou eficiente, de modo que foi capaz de conter a pluma de contaminação, não permitindo que ela avançasse sobre as residências vizinhas a indústria, nem tampouco atingisse o aquífero profundo (camadas L7 a L10).

O modelo matemático, desta maneira, mostrou sua funcionalidade e sua aplicabilidade para um problema real. Visto que ele foi capaz de dar idéia da atual situação de contaminação e serviu como diretriz para otimização de um sistema de remediação. Este que, como já dito, se mostrou eficiente e viável, visto que foi capaz de conter a pluma de contaminação.

É sempre válido ressaltar que o modelo matemático desenvolvido pelo autor se trata de um modelo tridimensional de fluxo advectivo de água subterrânea e que, desta forma, as simulações de caminamento de partículas levaram em consideração somente o centro de massa da pluma de contaminação, desconsiderando os efeitos de dispersão, retardação e degradação da pluma. Tais efeitos com certeza ocorrem no sistema real, mas para serem modelados seria necessário realizar um modelo de transporte de contaminantes, o que foge do escopo do presente Trabalho de Formatura.

8 CONCLUSÕES

O presente Trabalho de Formatura teve como objetivo principal avaliar a extensão, comportamento e prognósticos de uma pluma contaminante em um aquífero localizado em uma área urbana da bacia de Taubaté, com o intuito de se prever os possíveis impactos ambientais a serem causados pela mesma. Isto foi realizado através de uma modelagem matemática tridimensional de fluxo advectivo de água subterrânea, para uma distribuição estacionária de

cargas hidráulicas. Esta avaliação foi aproximada, pois não foram considerados os fenômenos de dispersão, retardação e degradação dos contaminantes.

Para que a modelagem matemática tivesse sucesso foi necessário que se seguisse um protocolo (Figura 3.3). Sendo assim foram realizadas sucessivas etapas, cada qual a seu tempo (Figura 5.1), tais como: pesquisa bibliográfica, organização dos dados coletados, duas etapas de campo, definição de um modelo hidrogeológico conceitual e por fim a modelação matemática propriamente dita seguida de seu processo de calibração.

Conforme foi apresentado, diversas simulações foram feitas com o seguinte propósito: de se avaliar a situação atual de contaminação da água subterrânea, prever seus possíveis impactos e elaborar um sistema de remediação eficiente para a área. Os resultados obtidos atenderam a todos esses propósitos.

Desta forma, pode-se concluir que a modelagem matemática foi efetuada com sucesso, visto que o objetivo inicialmente proposto pelo autor foi atingido, de maneira que ele foi capaz de utilizar a modelagem matemática como ferramenta para a solução de um problema ambiental real, além de adquirir um conhecimento específico tal muito importante para sua formação.

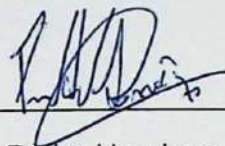
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. 1992. Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego, EUA. 381p.
- BAIR, E. S.; ROADCAP, G. S. 1992. Comparison of Flow Models Used to Delineate Capture Zones of Wells: 1. Leaky-Confining Fractured-Carbonate Aquifer. *Ground Water*, v. 30, n. 1, p. 199-211.
- BEAR, J.; BELJIN M. S.; ROSS R. R. 1992. Fundamentals of Groundwater Modeling, *Groundwater Issue*, United States Environmental Protection Agency - USEPA, 11 p.
- BRAMLETT, W.; BORDEN, R. C. 1990. Computer Notes – Numerical Generation of Flow Nets, The FLOWNS Model. *Ground Water*, v. 28, n. 6, p. 946-950.
- CLEARY, R. W. 1989. Águas Subterrâneas. Abrh/Ed. da Ufrj. Rio de Janeiro. v. 2, p. 293-402.
- DAEE – Departamento de Águas Subterrâneas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo 1977. Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 3. São José dos Campos. DAEE, São Paulo. 3 v.
- FETTER, C. W.. 1994. Applied Hydrogeology. Prentice-Hall. Upper Saddle River. New Jersey. 4ª Edição. 598 p.
- HAMDAN, L.; MUKHOPADHYAY, A. 1991. Numerical Simulation of Subsurface-Water Rise in Kuwait City. *Ground Water*, v. 29, n. 1, p. 93-104.

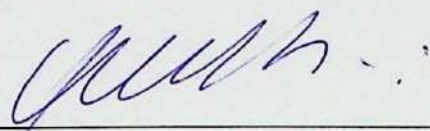
- HASUI, Y. & PONÇANO, W. L. 1978. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. Cong. Bras. Geologia, 30, Recife. *Anais...* SBG, v.1, p. 368 – 381.
- HIRATA, R. C. A. 1993. Os recursos hídricos subterrâneos e as novas exigências ambientais. *Revista do IG*, v. 14, n. 1, p. 36-62.
- HIRATA, R. C. A. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudo de casos no estado de São Paulo. São Paulo. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo Escala 1:500.000. IPT. São Paulo. 2v.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT 1990. Geologia das Folhas Jacaré (SF-23-Y-D-II-3), Tremembé (SF-23-Y-B-V-4), Taubaté (SF-23-Y-D-II-2) e Pindamonhangaba (SF-23-Y-B-VI-3), escala 1:50.000, Estado de São Paulo. IPT, Relatório 28732, São paulo, 2 vol., 276 p.
- IRITANI, M. 1998. Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea. São Paulo, 200 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- MANCINI, F. 1995. Estratigrafia e aspectos da tectônica deformadora da Formação Pindamonhangaba, Bacia de Taubaté, SP. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo
- MARCELINO, M. de B. 1999. Delimitação de perímetro de proteção de poços tubulares (PPP) empregando a técnica de modelagem numérica tridimensional. São Paulo, 122 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. 1988. A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of U. S. Geological Survey, 06-A1, USGS, Washington, EUA. 576 p.
- MONTENEGRO, A. A. de A. 1990. Modelação matemática do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto. São Carlos, 154 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PHILLIPS, S. P.; BELITZ, K. 1991. Calibration of a Texture-Based Model of a Ground-Water Flow System, Western San Joaquin Valley, California. *Ground Water*, v. 29, n. 5, p. 702-715.
- PINDER, G. F.; GRAY, W. G. 1977. Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology. Academic Press.
- PRICKETT, T. A. 1975. Modeling Techniques for Groundwater Evaluation, *In: Advances in Hydroscience*, vol 10. New York: Academic Press, 1-143.
- ROSSATO, F. M.. 1999. Modelação Matemática Bidimensional na Definição de Zonas de Captura de Poços no Aquífero Adamantina, Município de Urânia, Noroeste do Estado de São Paulo.

- São Paulo, 40 p. Monografia de Trabalho de Formatura – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. 256 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo
- TAVARES, T. L. S.. 2002. Aplicação de Modelo Matemático para Fluxo de Água Subterrânea. São Paulo, 54 p. Monografia de Trabalho de Formatura – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- VARNIER, C. L. 2001. O efeito do nitrogênio proveniente de sistemas de saneamento in situ na qualidade das águas subterrâneas em aquíferos livres e rasos. São Paulo, 150 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- WANG, H. F.; ANDERSON, M. P. 1982. Introduction to Groundwater Modeling - Finite Difference and Finite Element Methods. New York, W. H. Freeman and Company. 237p. A Series of Books in Geology. Allan Cox (ed.).
- WHB - WATERLOO HYDROGEOLOGIC BRASIL 1998. Apostila do Curso de: Modelagem Matemática de Fluxo e Transporte de Contaminantes. Realização: Waterloo Hydrogeologic Brasil; Universidade de São Paulo; Instituto Geológico – Estado de São Paulo. Apoio: ABAS. Setembro de 1998.

De acordo,



Pedro Henrique de Aquino Corrêa

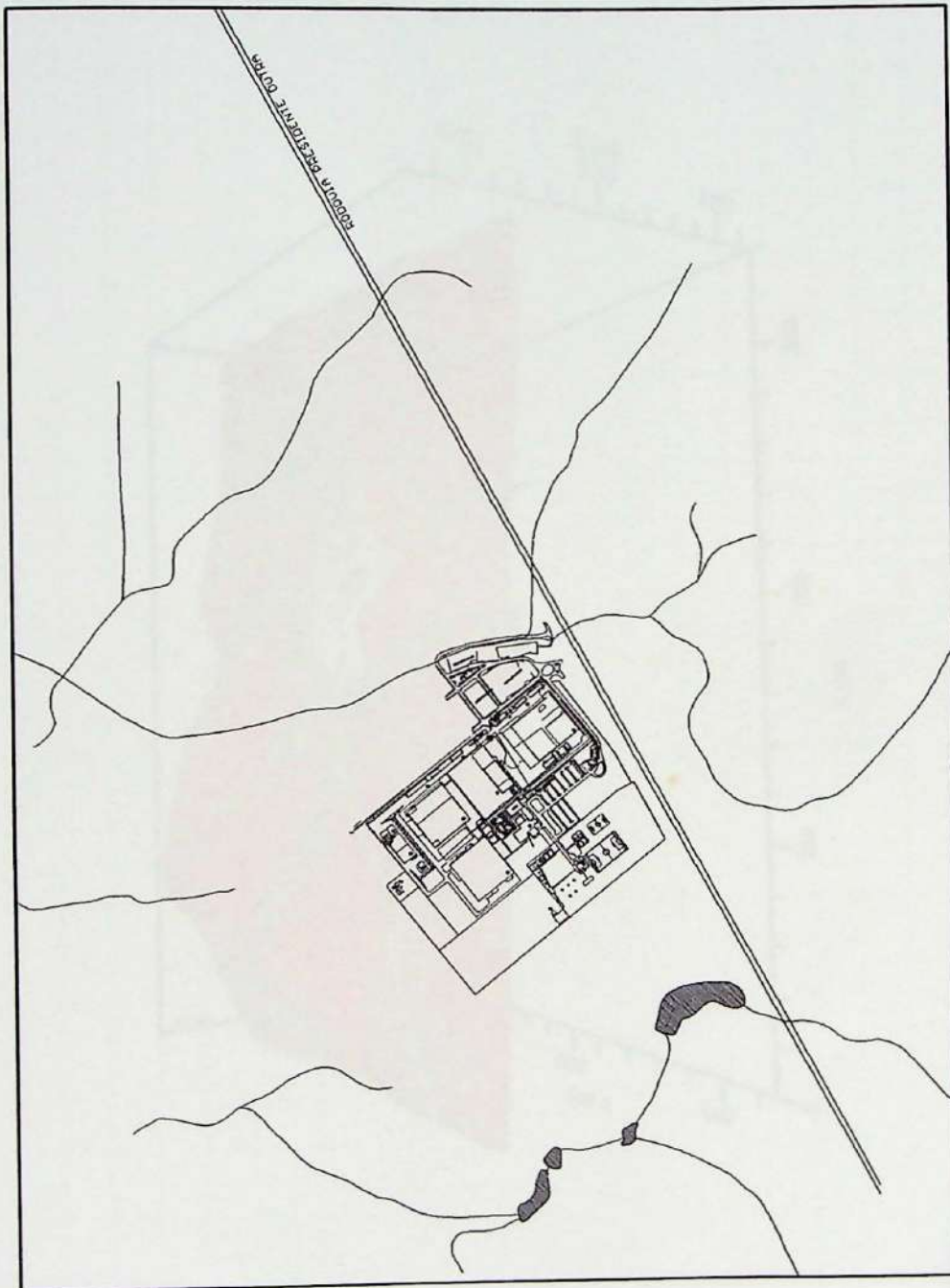
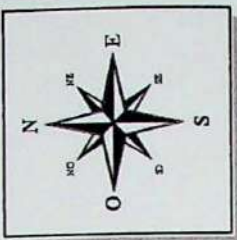


Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

ANEXOS

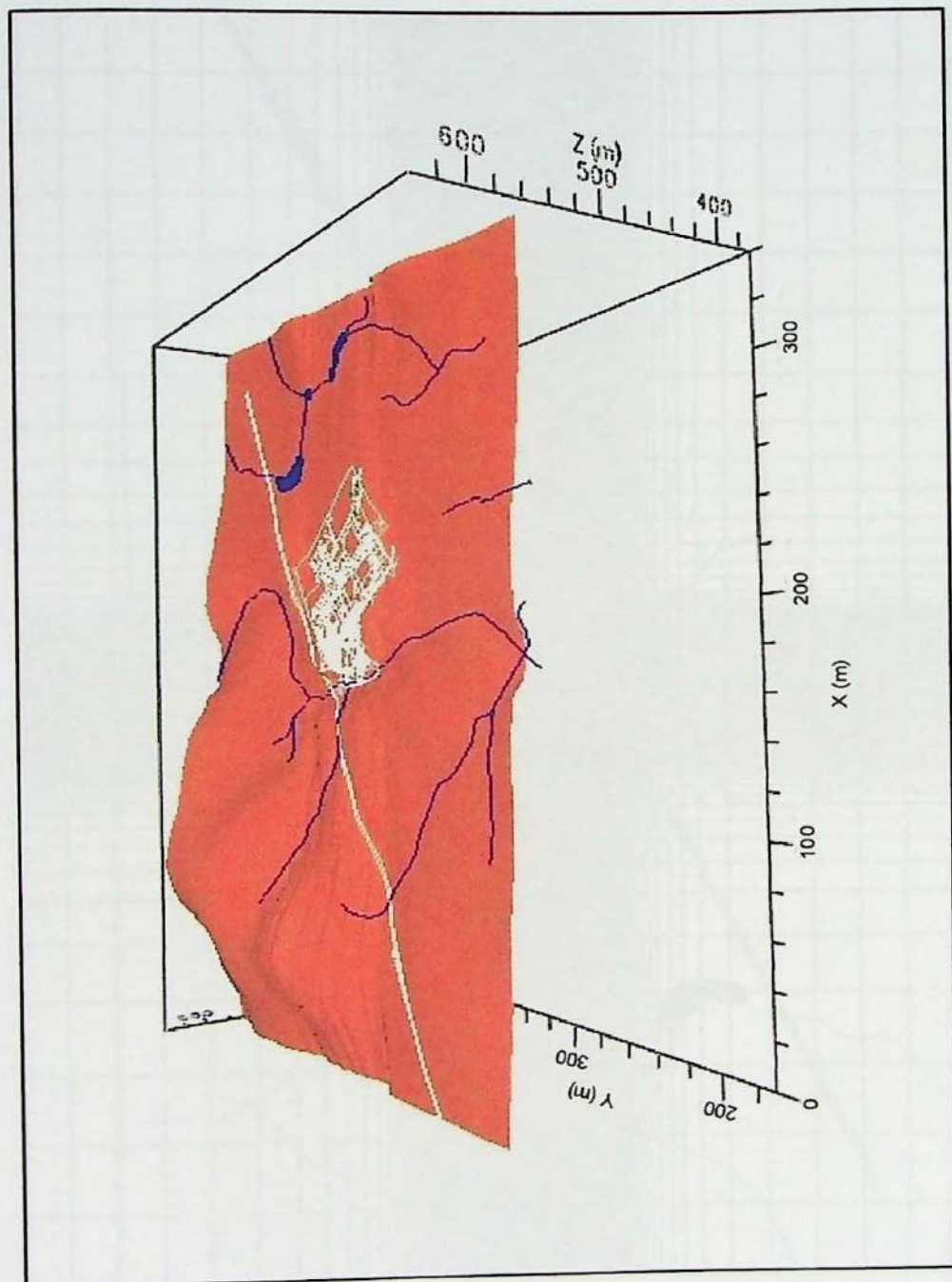
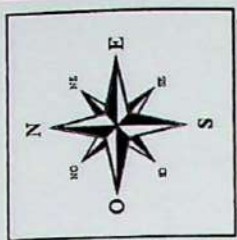
ANEXOS

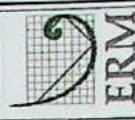
Anexo 01
Figuras

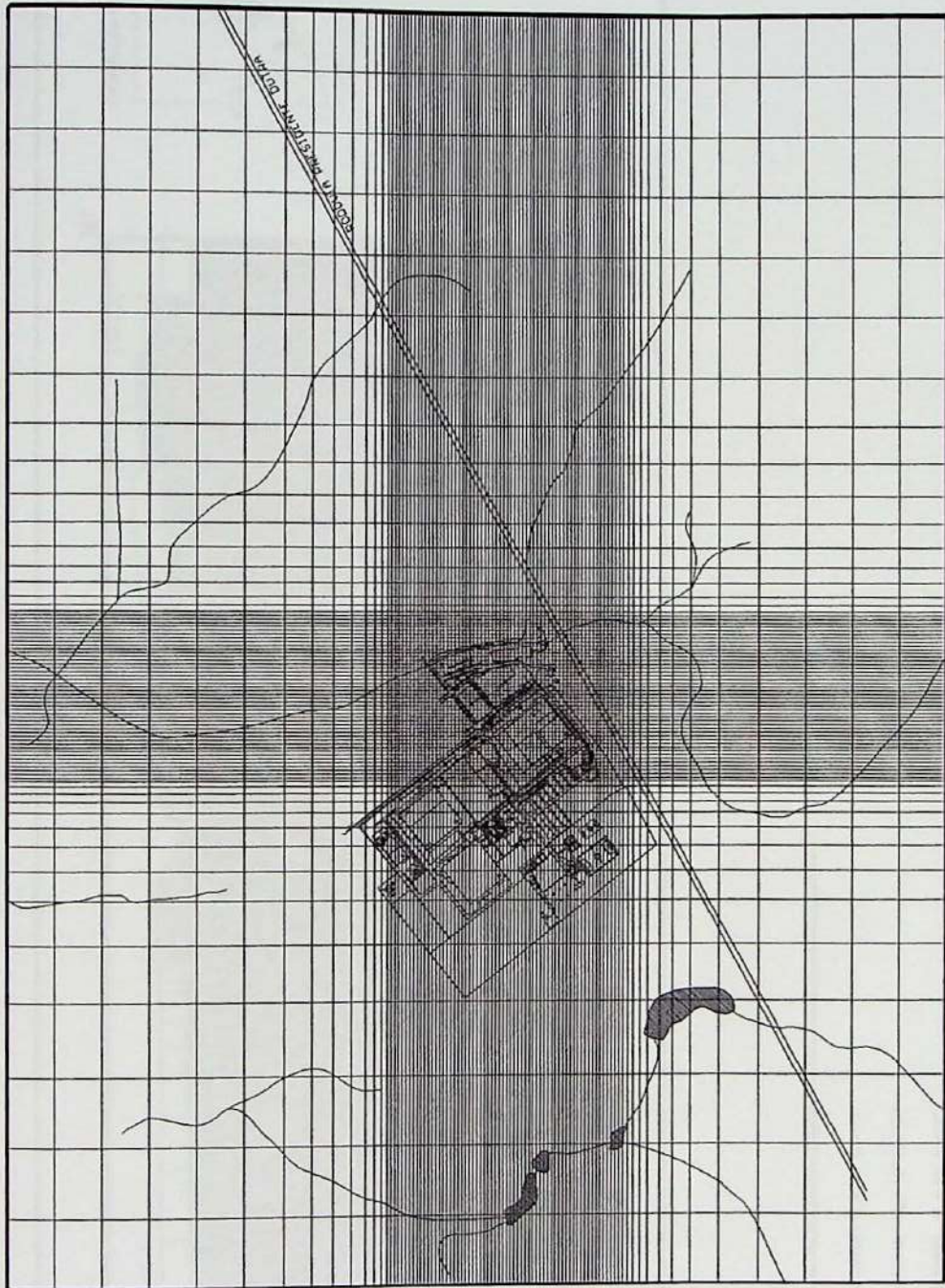
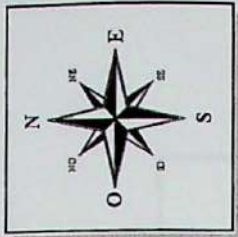


0 500 m
Escala

Figura 6.11	Base da Área Inserida no Modelo
USP	TRABALHO DE FORMATURA Instituto de Geociências



	<p>Topografia Digital da Área em 3-D com exagero vertical de seis vezes</p>	
Figura 6.12	<p>TRABALHO DE FORMATURA Instituto de Geociências</p>	



0 500 m
Escala

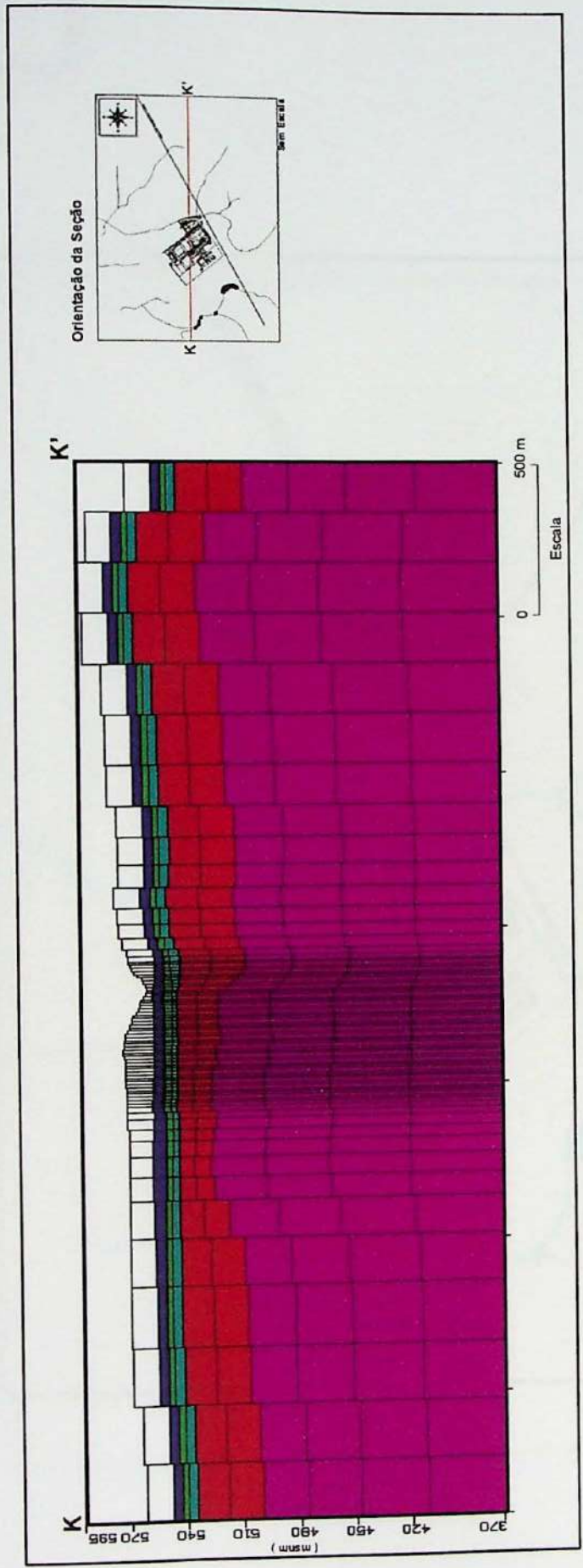
LEGENDA
MALHA DO MODELO

Domínio do Modelo

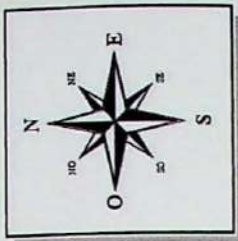
Figura
6.13

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências






- LEGENDA
- Conductividade Hidráulica Inicial - $K_{x0} = 10^{-1}$ $K_z = 10^{-9}$
 - Conductividade Hidráulica Inicial - $K_{x0} = 10^{-1}$ $K_z = 10^{-4}$
 - Conductividade Hidráulica Inicial - $K_{x0} = 10^{-1}$ $K_z = 10^{-9}$
 - Conductividade Hidráulica Inicial - $K_{x0} = 10^{-1}$ $K_z = 10^{-9}$
 - Conductividade Hidráulica Inicial - $K_{x0} = 10^{-1}$ $K_z = 10^{-4}$
 - Conductividade Hidráulica Inicial - $K_{x0} = 10^{-1}$ $K_z = 10^{-4}$



0 500 m
Escala

LEGENDA

 Drenos Inseridos no Modelo

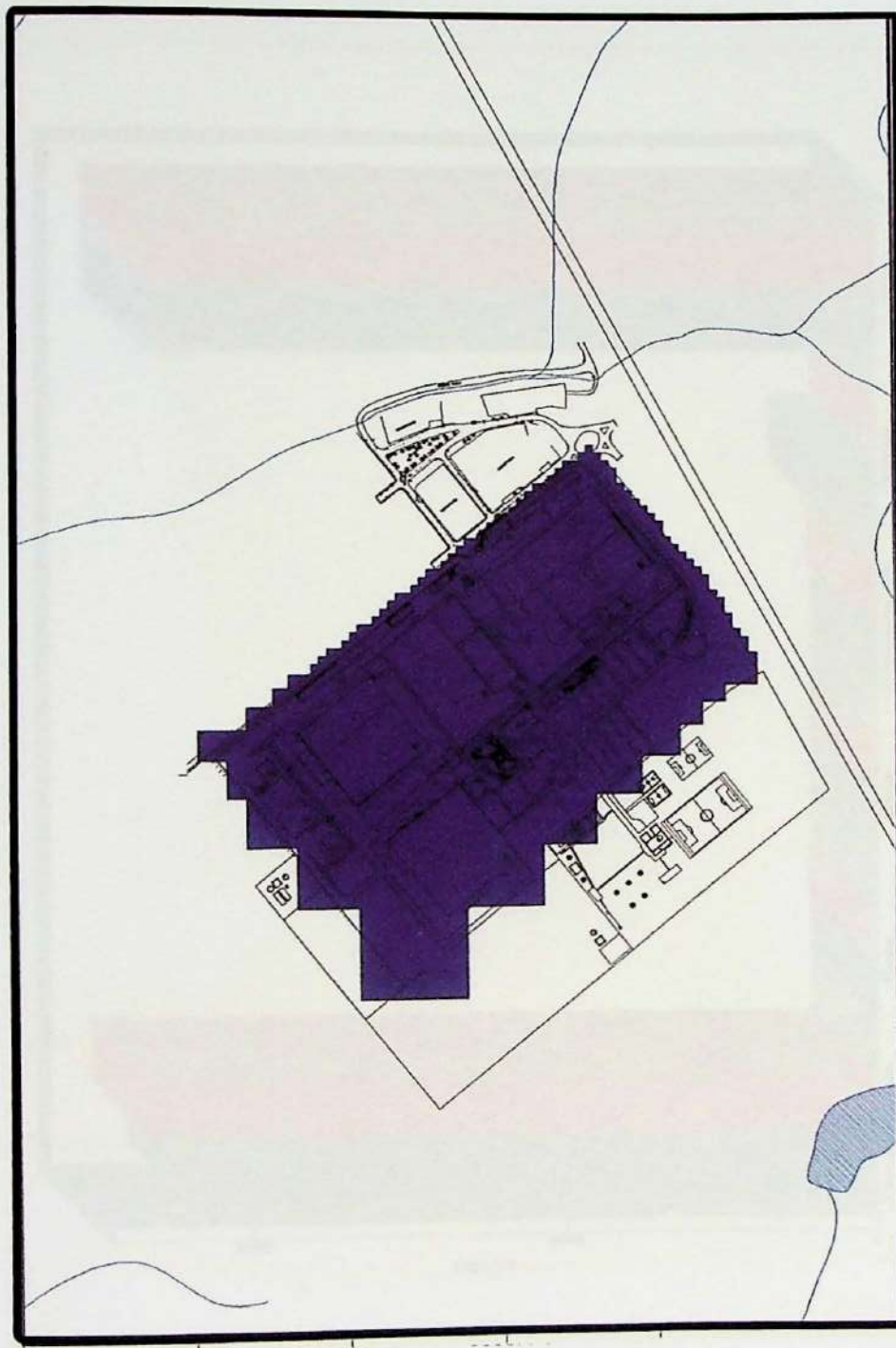
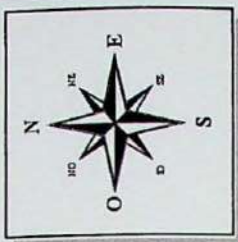
Drenos Inseridos no Modelo

Figura
6.15

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP





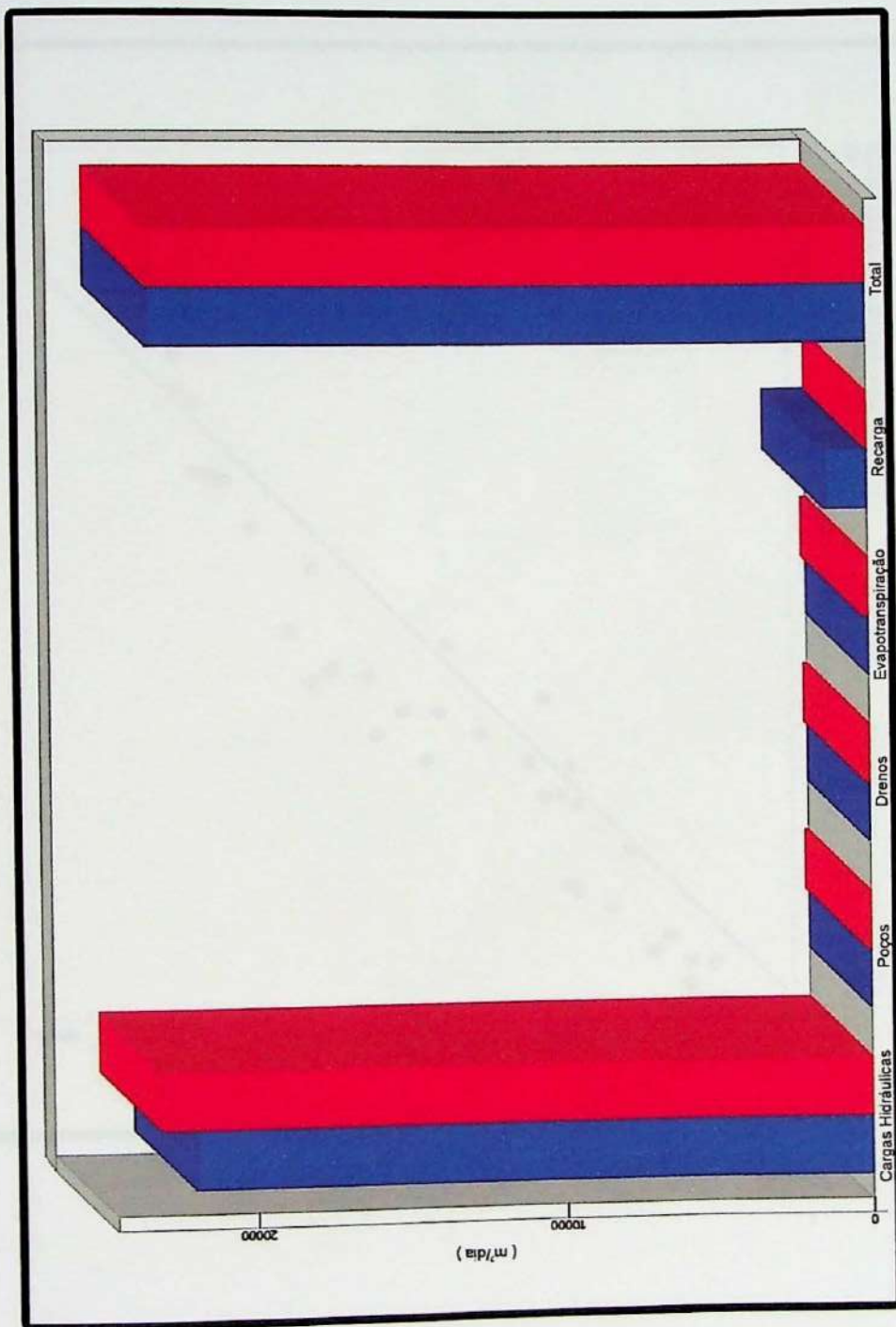
0 300 m
Escala

LEGENDA

- Área de Recarga de 70 mm/ano
- Área de Recarga de 50 mm/ano

Figura 6.16	Áreas de Recarga do Modelo
USP	TRABALHO DE FORMATURA Instituto de Geociências





LEGENDA

Volume de Entrada

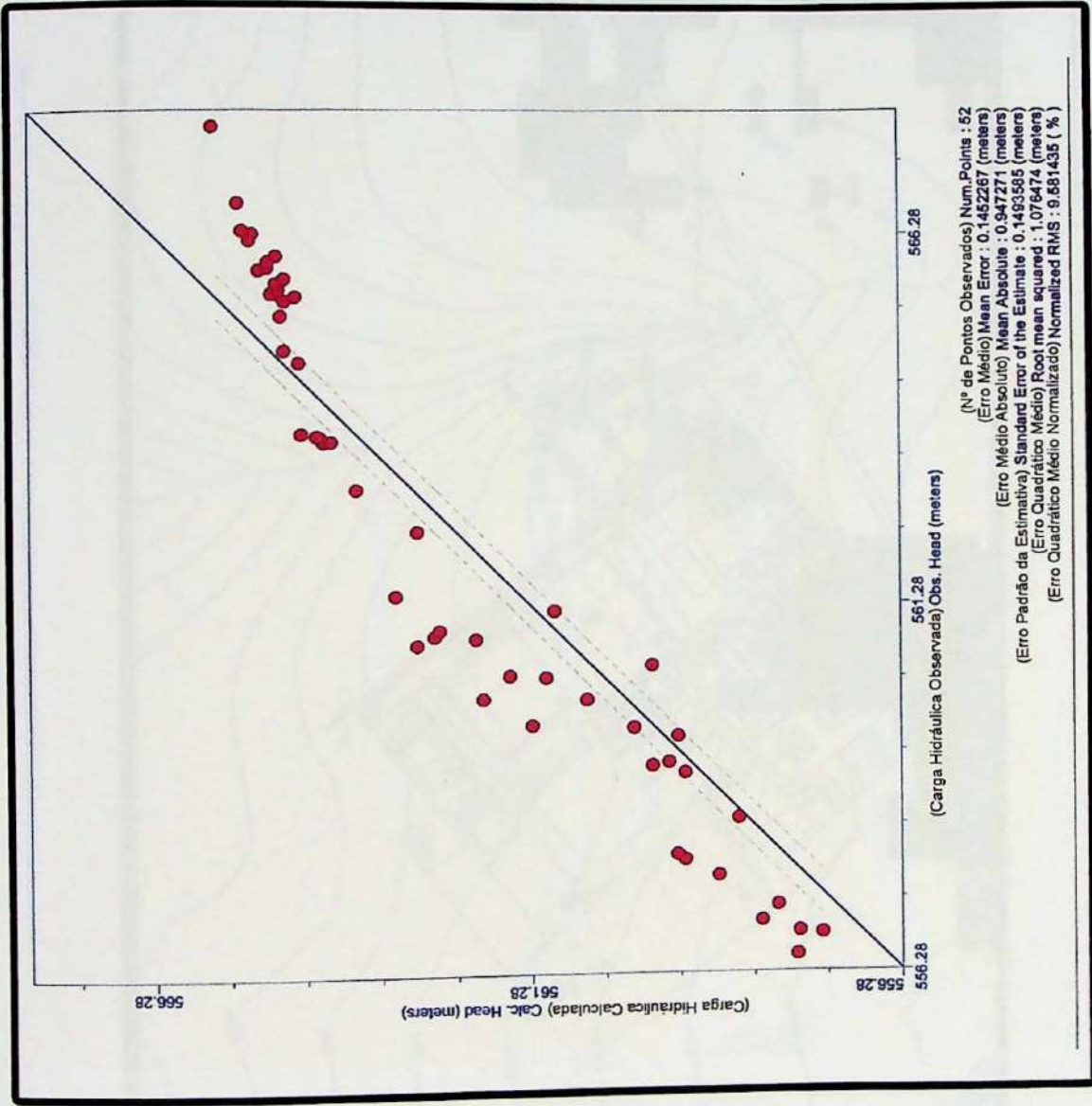
Volume de Saída

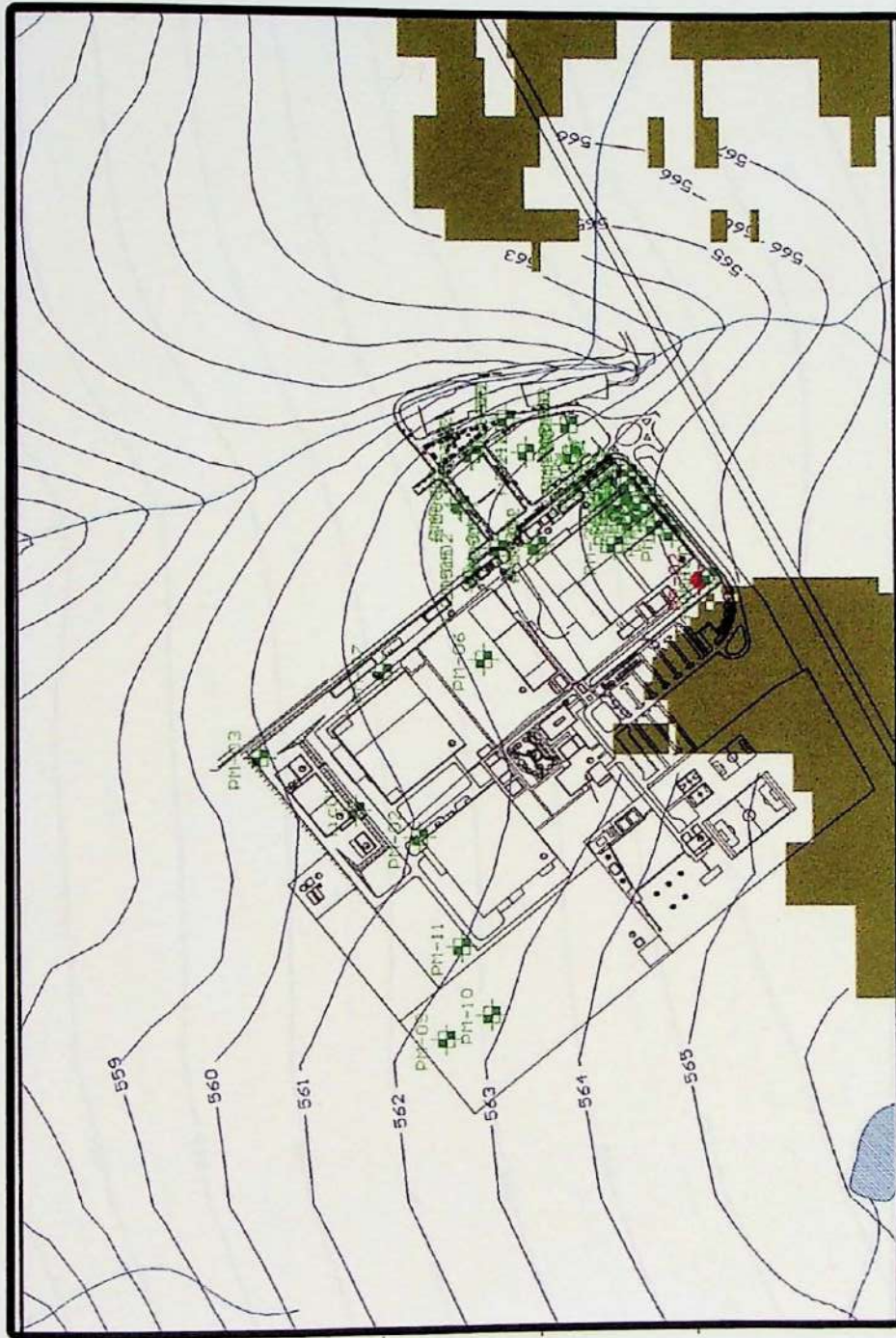
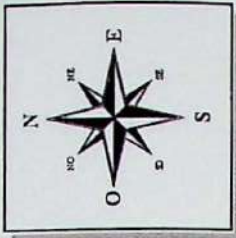
Gráfico do Balanço de Massa do Modelo

Figura 6.17

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências







LEGENDA

565 --- Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

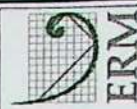
Região Seca

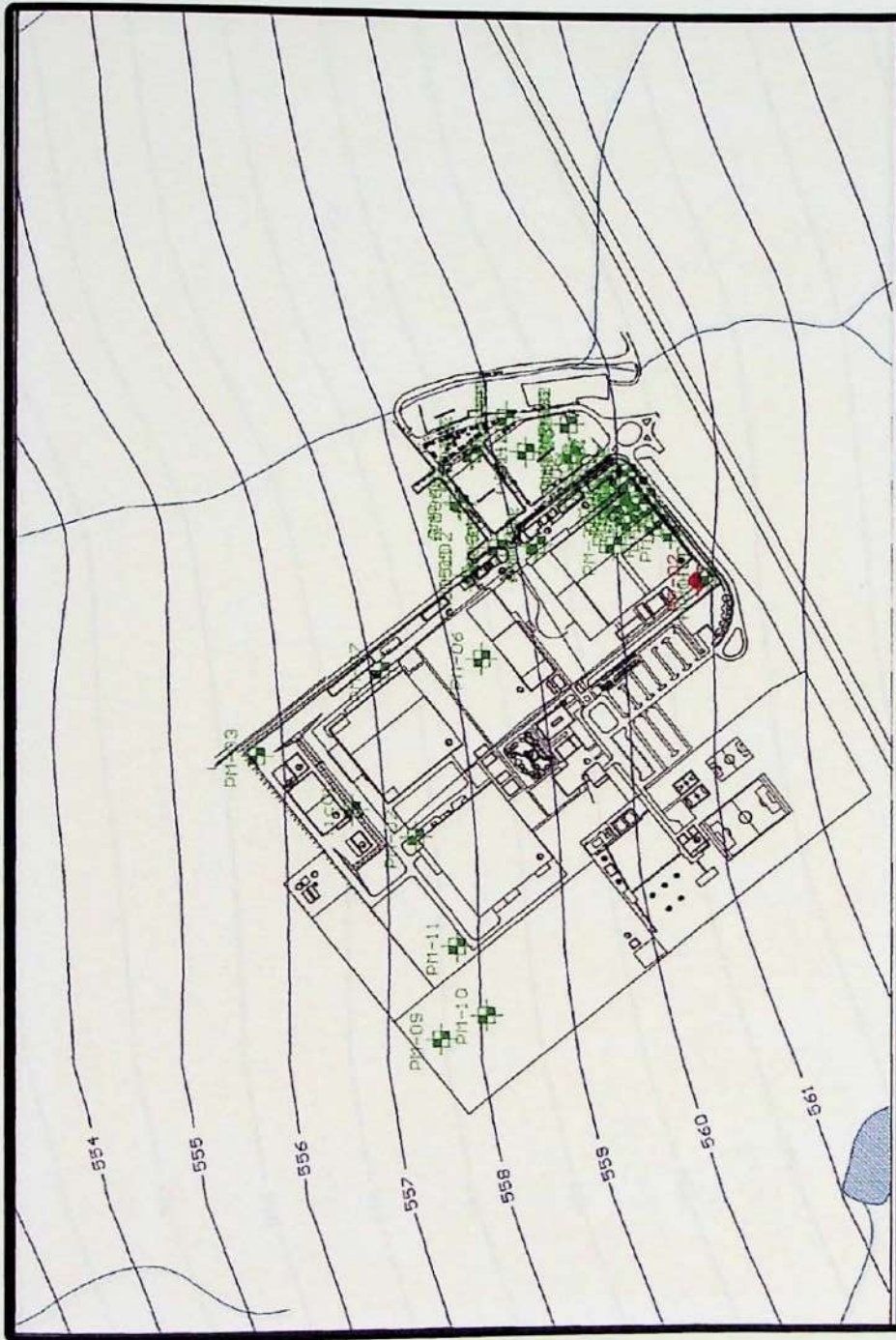
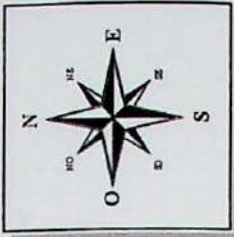
0 300 m
Escala

Mapa Potenciométrico Simulado
Carnada Hidrogeológica 1

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Figura
6.19





0 300 m
Escala

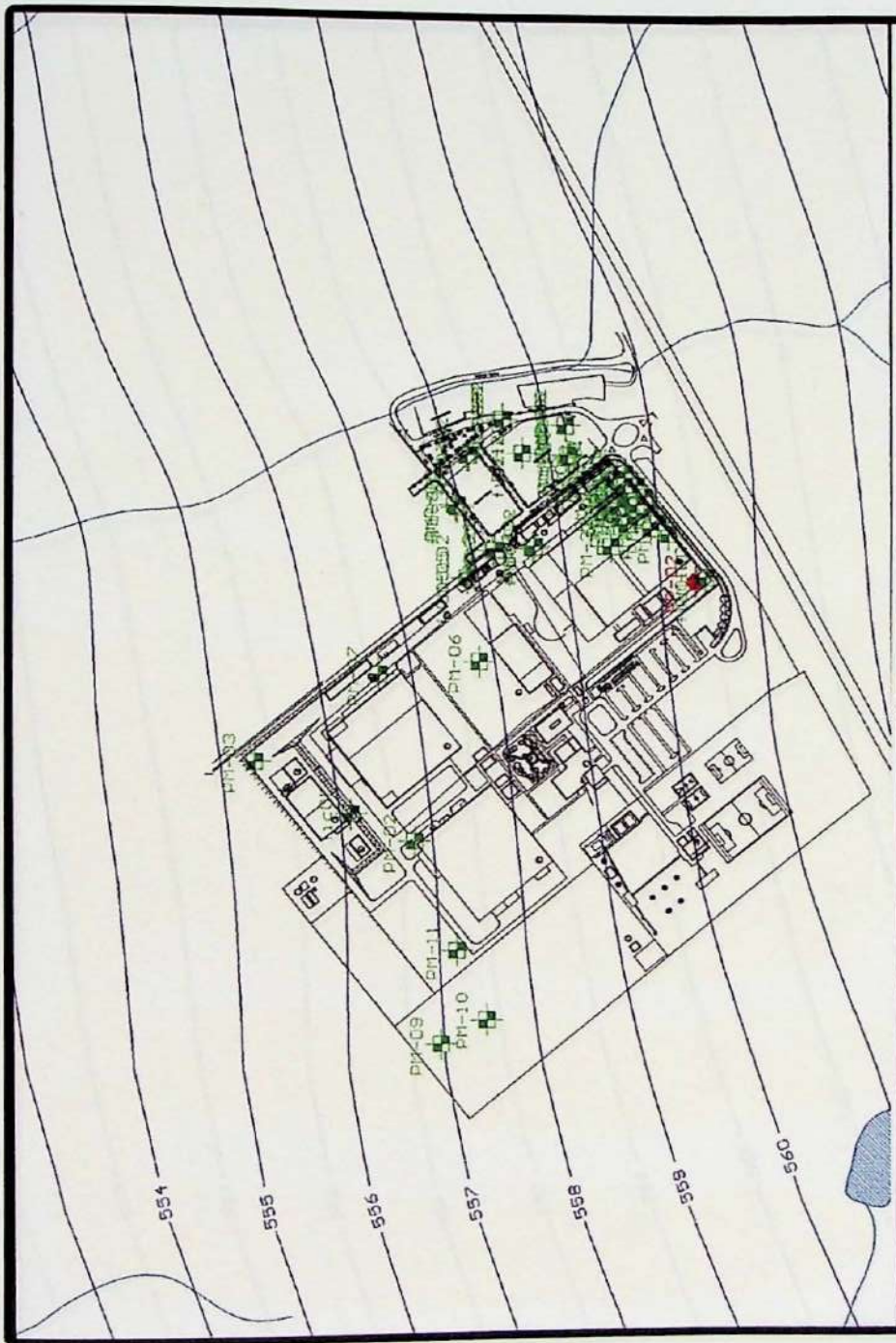
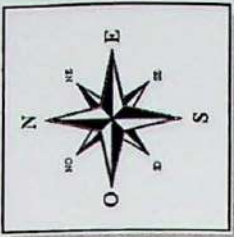
LEGENDA
— 561 —
Linhas Equipotenciais Simuladas (msm)

Mapa Potenciométrico Simulado
Camada Hidrogeológica 2

Figura
6.20

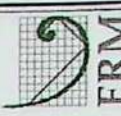
TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

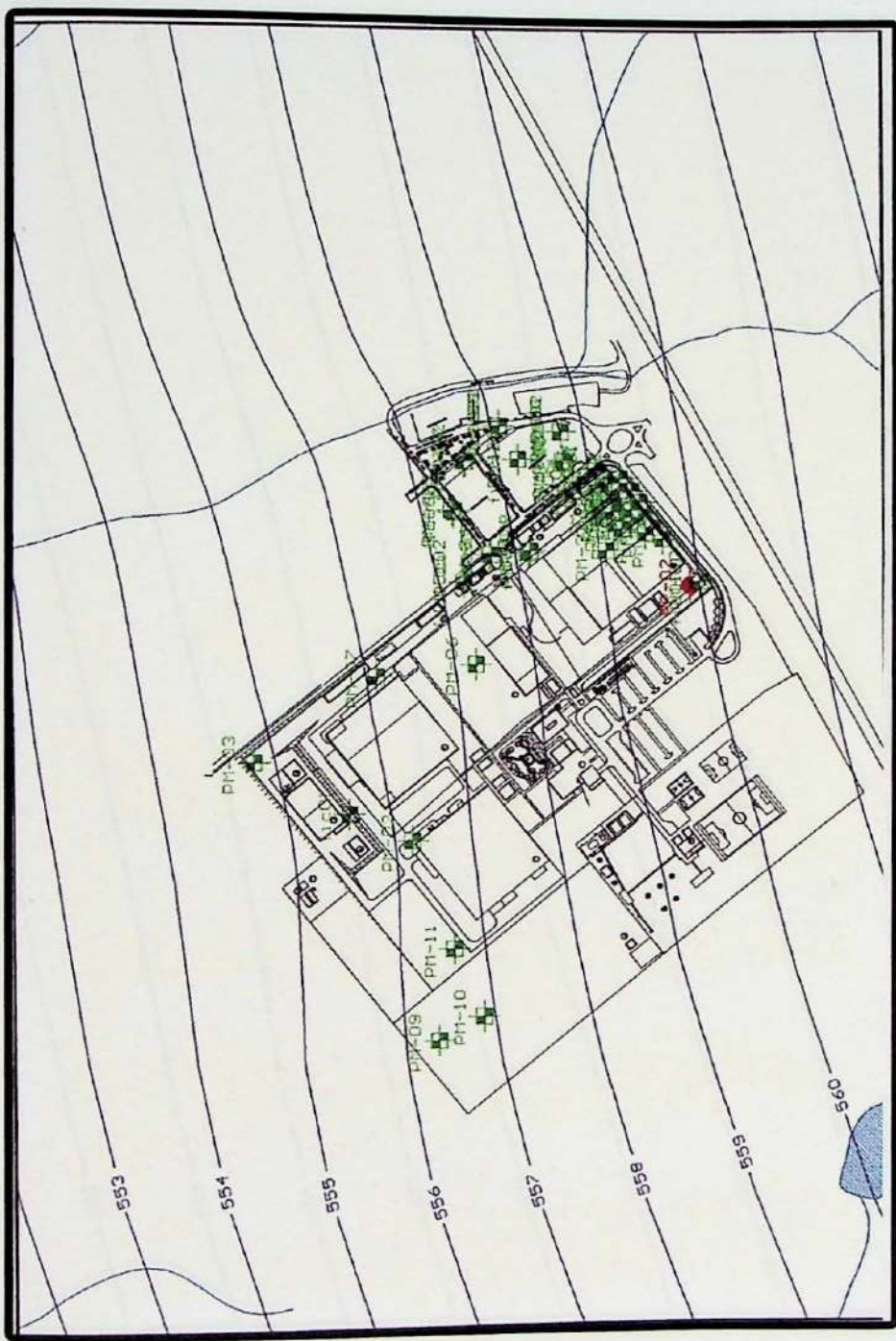
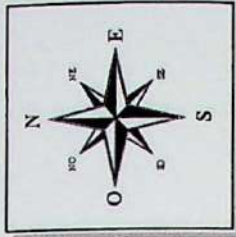




0 300 m
Escala

LEGENDA
— 560 —
Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

Mapa Potenciométrico Simulado Camada Hidrogeológica 3	Figura 6.21	 ISP
TRABALHO DE FORMATURA Instituto de Geociências		



0 300 m
Escala

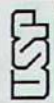
LEGENDA

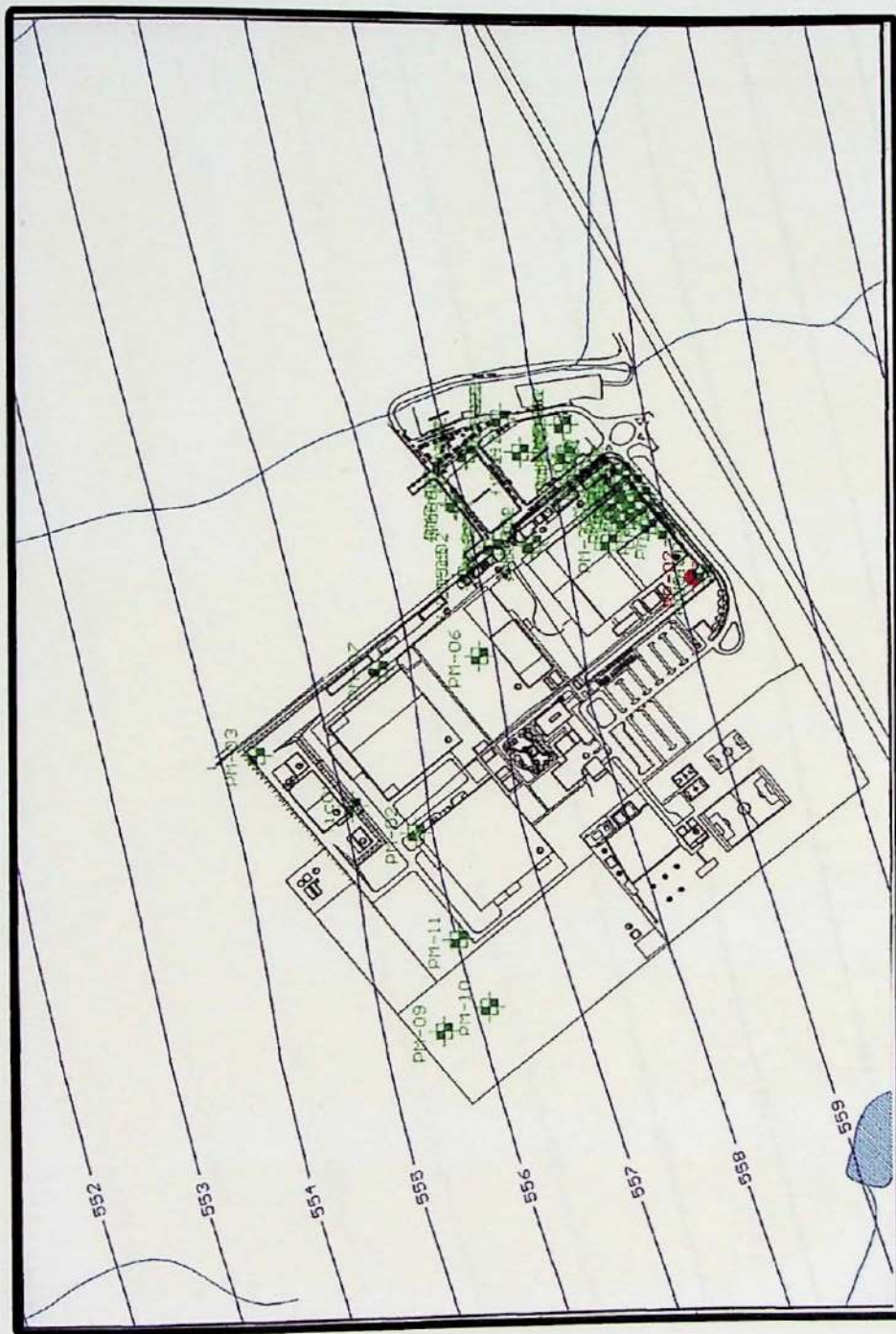
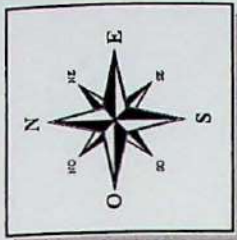
560 Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

Mapa Potenciométrico Simulado
Camada Hidrogeológica 4

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Figura
6.22





0 300 m
Escala

LEGENDA

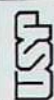
559
Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

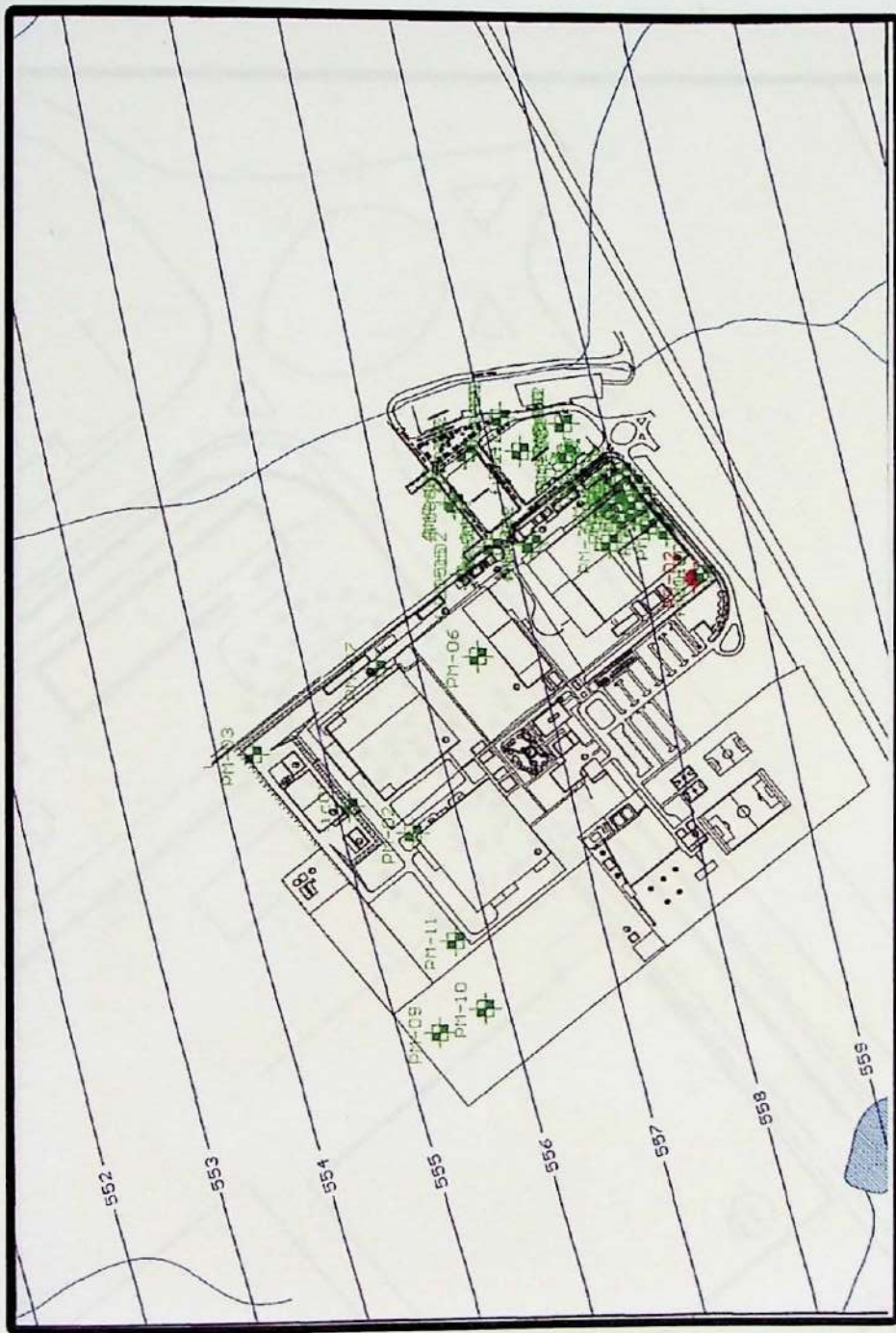
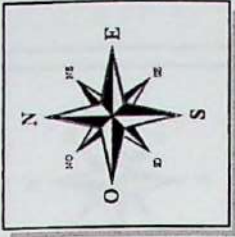
Mapa Potenciométrico Simulado
Camada Hidrogeológica 5

Figura
6.23



TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências



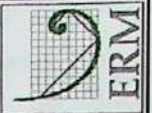


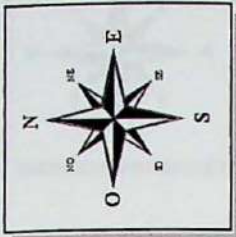
0 300 m
Escala

LEGENDA

— 559 — Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

Figura 6.24	Mapa Potenciométrico Simulado Camada Hidrogeológica 6
USP	TRABALHO DE FORMATURA Instituto de Geociências





0 30 m
Escala

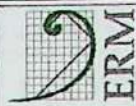
LEGENDA

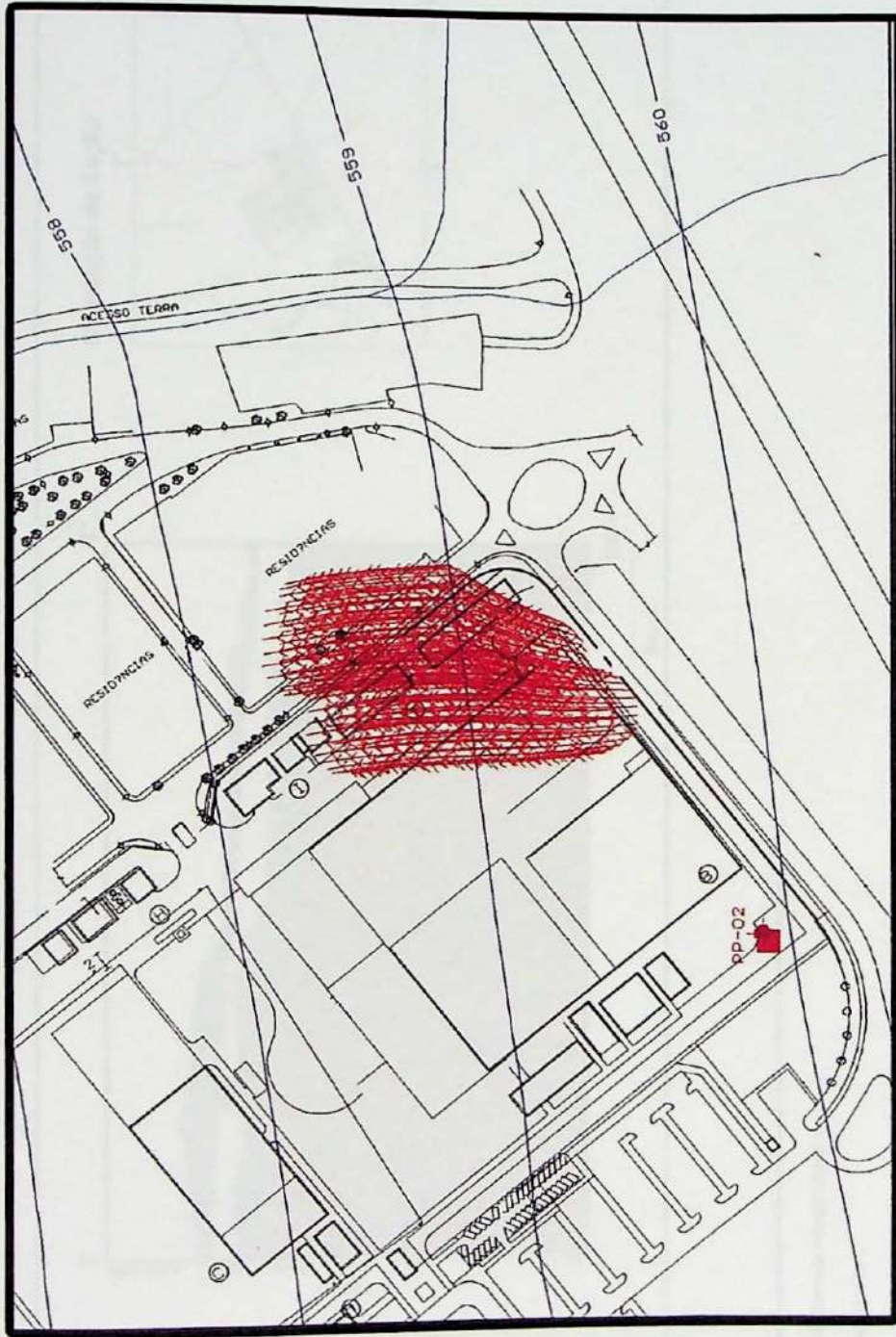
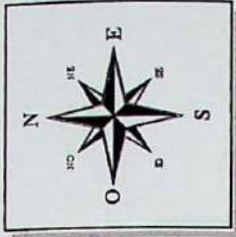
Partículas inseridas no modelo

Partículas Inseridas no Modelo
Simulando a Área Fonte

Figura
6.25


TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geodências






0 70 m
ESCALA

LEGENDA

 Trajetória das partículas marcadas de dez em dez anos

 Linhas Equipotenciais Simuladas da Camada Hidrogeológica 4 (msnm)

Trajéórias Simuladas das Partículas Inseridas no Modelo
Máximo de 100 anos

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

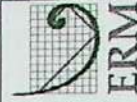
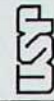
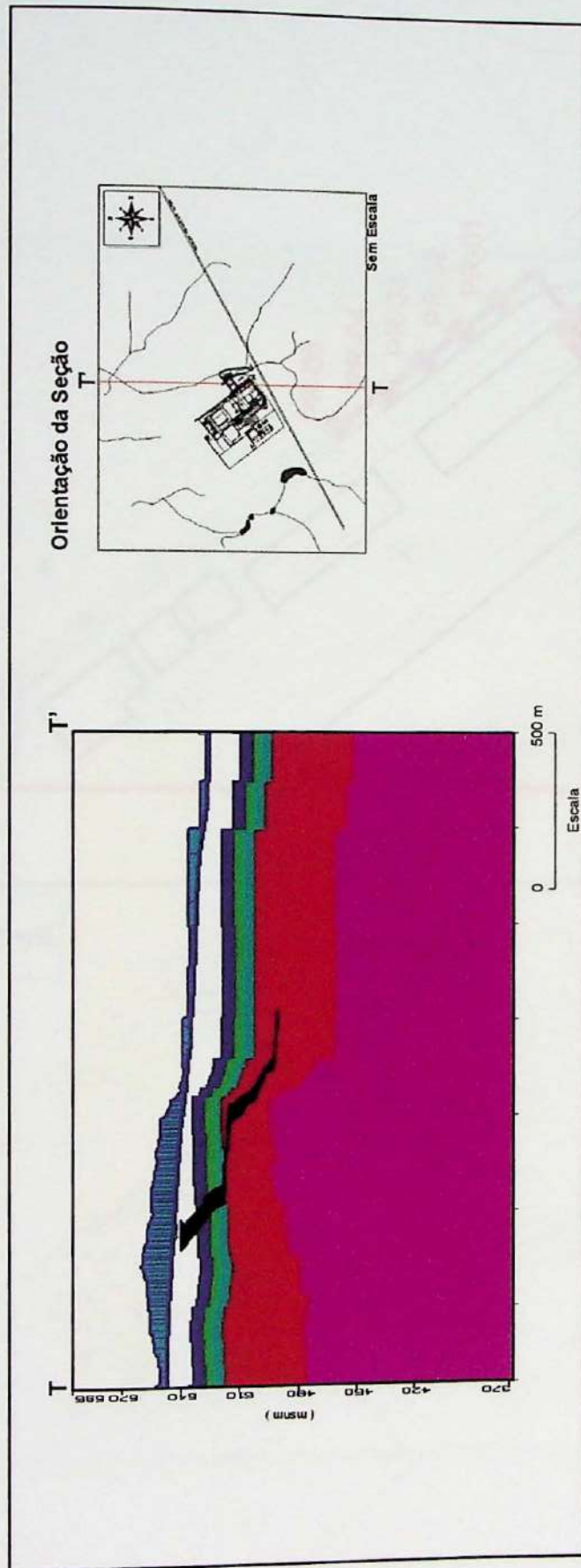


Figura
6.26

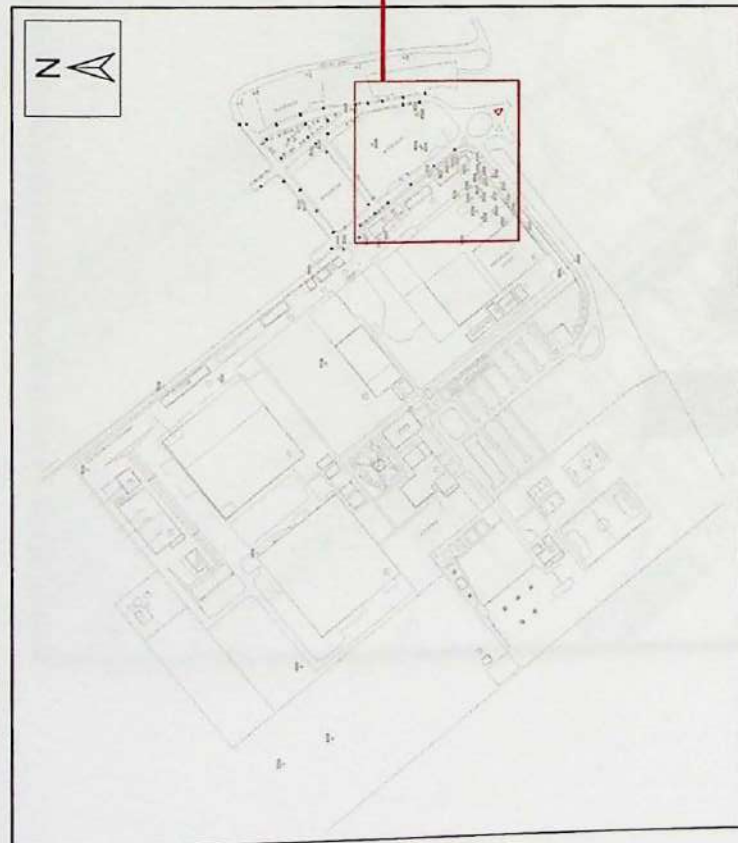




LEGENDA




- Região Seca da Camada Hidrogeológica 1
- Camada Hidrogeológica 1
- Camada Hidrogeológica 2
- Camada Hidrogeológica 3
- Camada Hidrogeológica 4
- Camada Hidrogeológica 5
- Camada Hidrogeológica 6
- Trajetória Simulada das Partículas para 100 anos

SITUAÇÃO GERAL

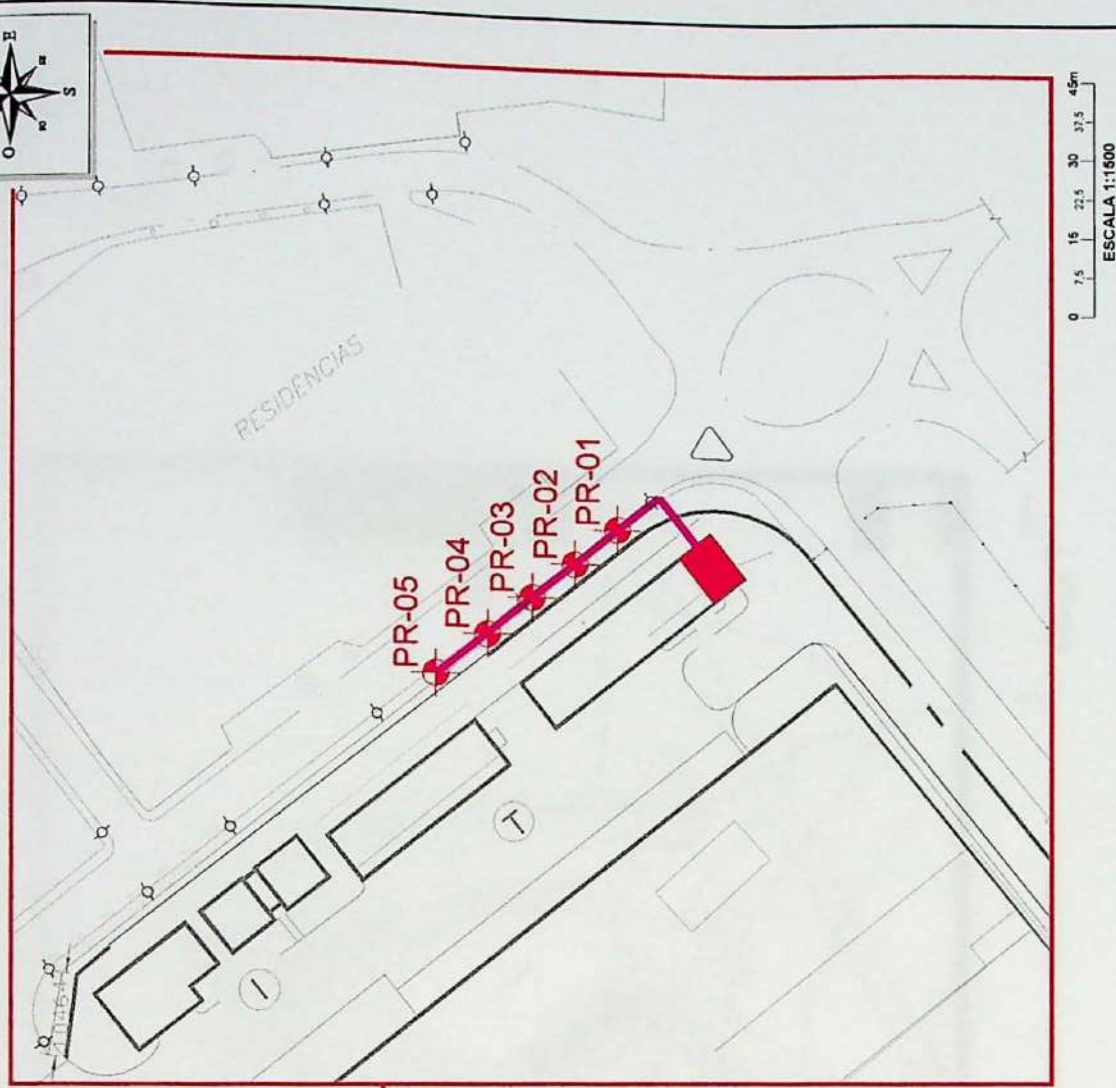


SEM ESCALA

LEGENDA

- PR-01  POÇO DE REMEDIAÇÃO PROPOSTO
-  TUBULAÇÃO
-  ÁREA DE TRATAMENTO DA ÁGUA

DETALHE

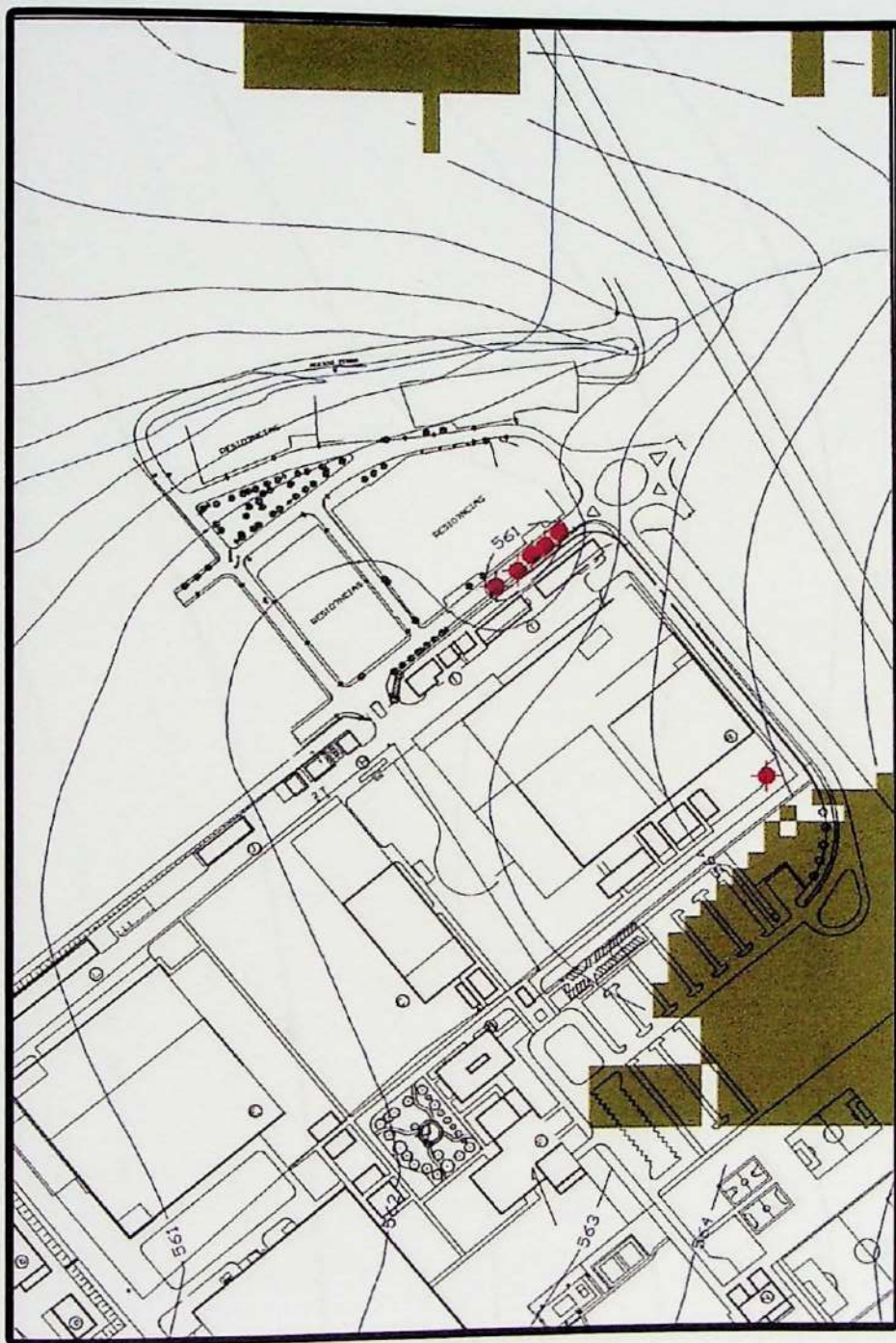
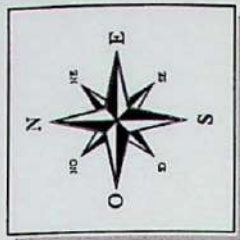


Esquema do Sistema de Remediação Proposto

Figura 6.28

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências





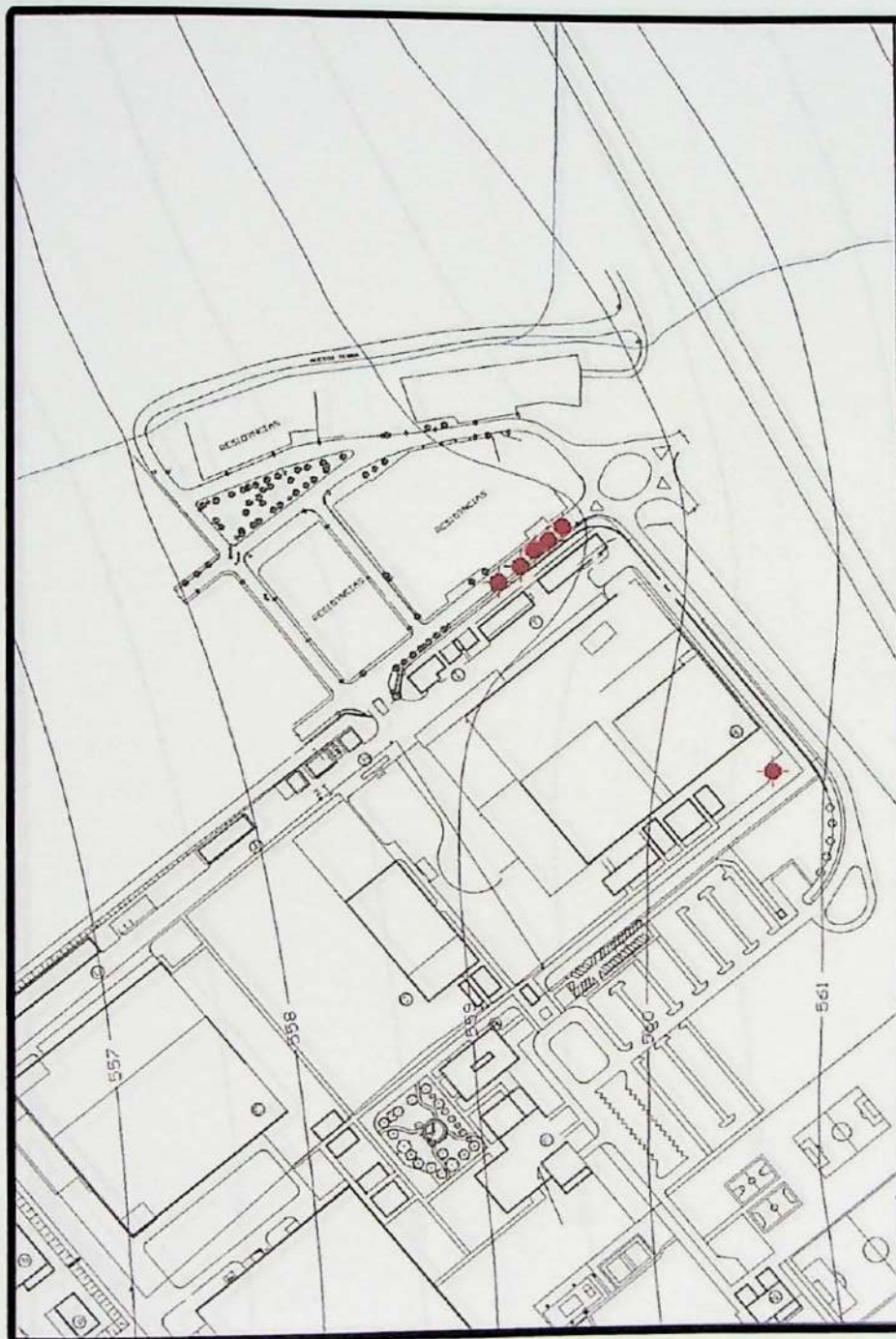
0 110 m
ESCALA

LEGENDA

561
Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

Região Seca

Poço de Bombeamento ativado



0 110 m
ESCALA

561 — Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

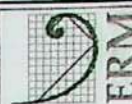
Poço de Bombeamento ativado

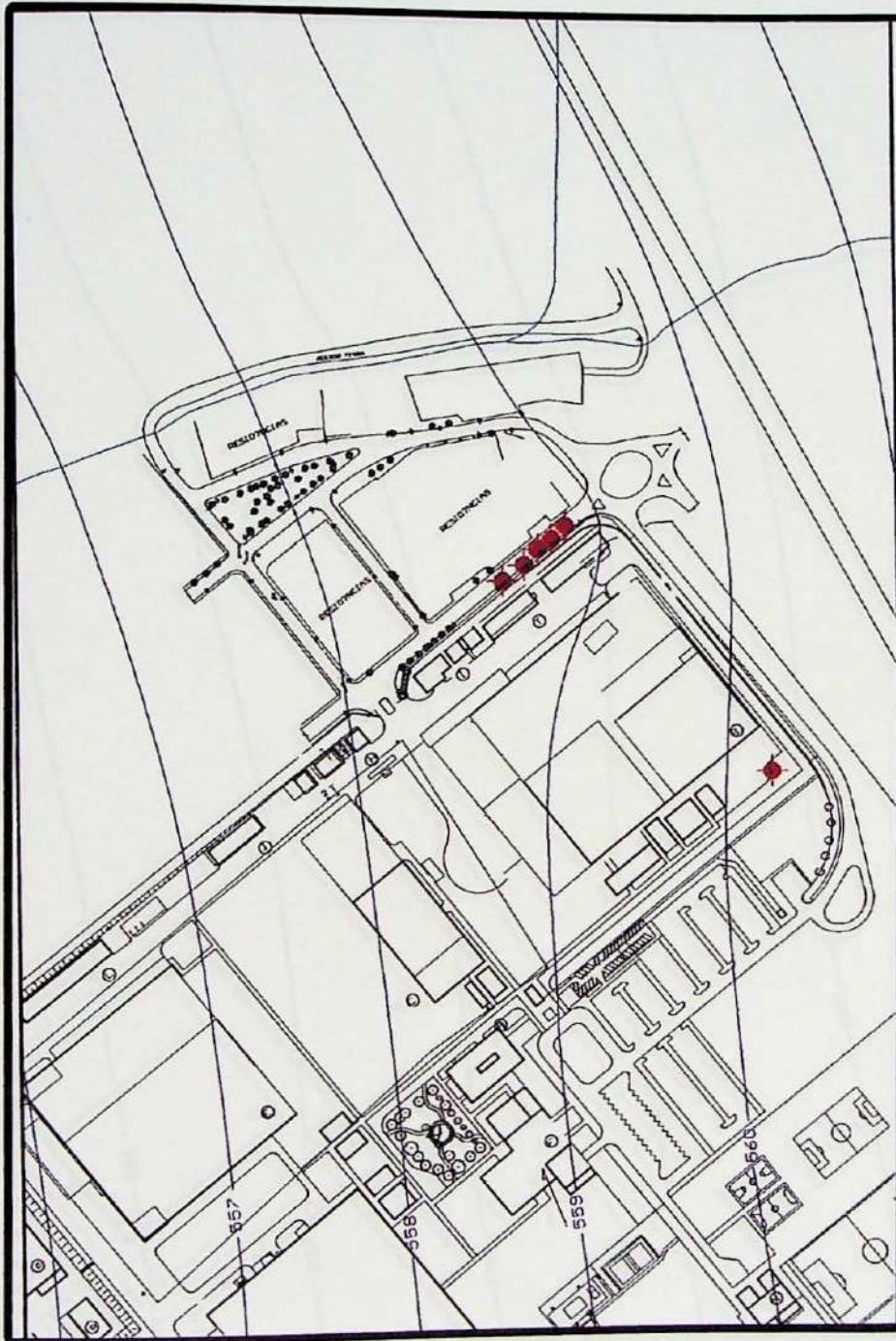
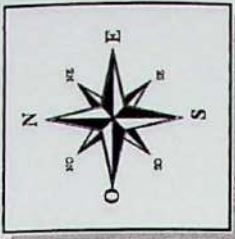


Mapa Potenciométrico Simulado com Sistema de Remediação Funcionando - Camada Hidrogeológica 2

Figura 6.30

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências





0 110 m
ESCALA

LEGENDA

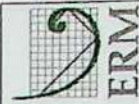
— Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

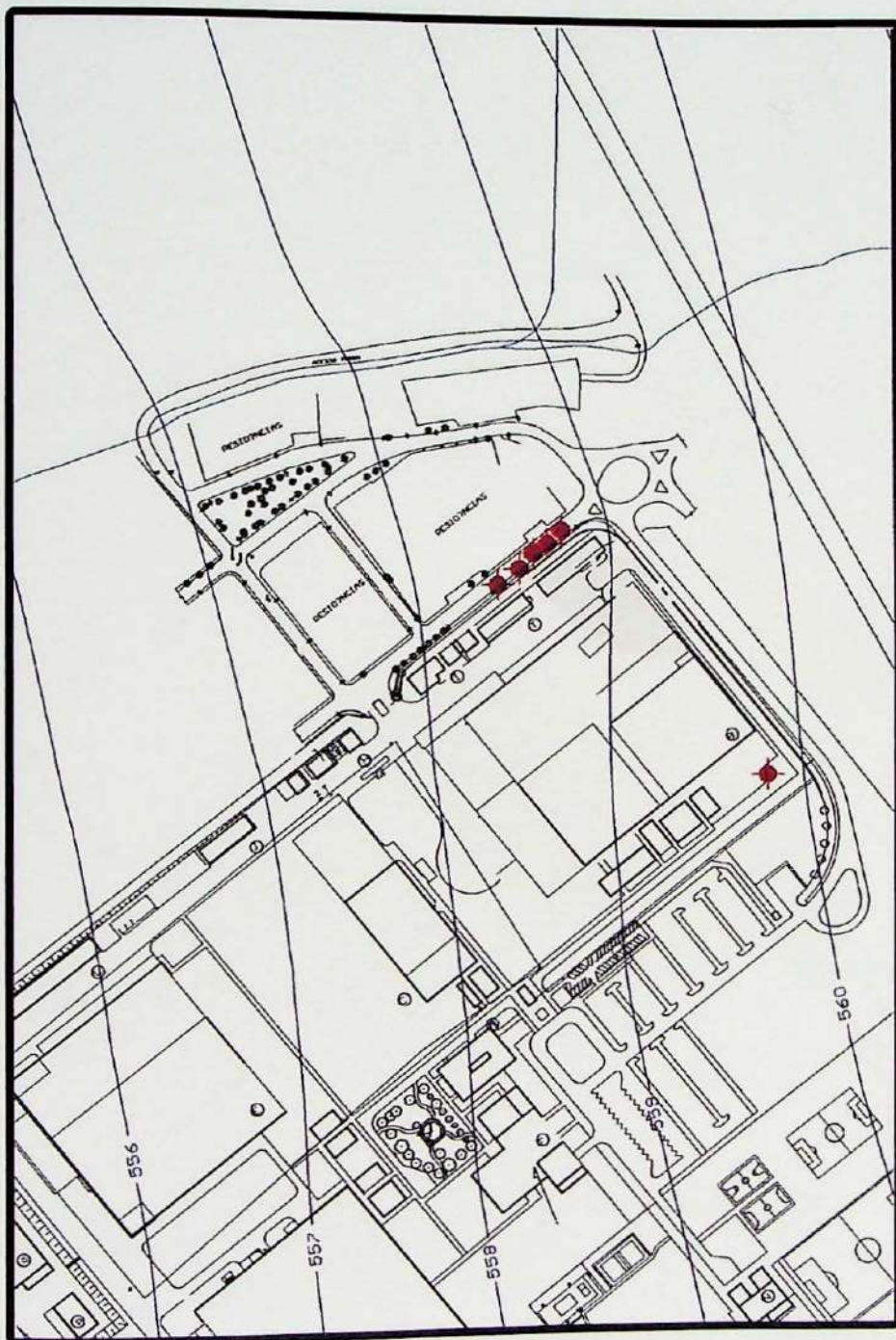
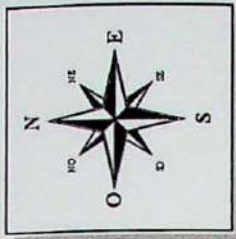
● Poço de Bombeamento ativado

Mapa Potenciométrico Simulado com Sistema de
Remediação Funcionando - Camada Hidrogeológica 3

Figura
6.31

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências





0 110 m
ESCALA

LEGENDA

— 560 —
Linhas Equipotenciais Simuladas (msnm)

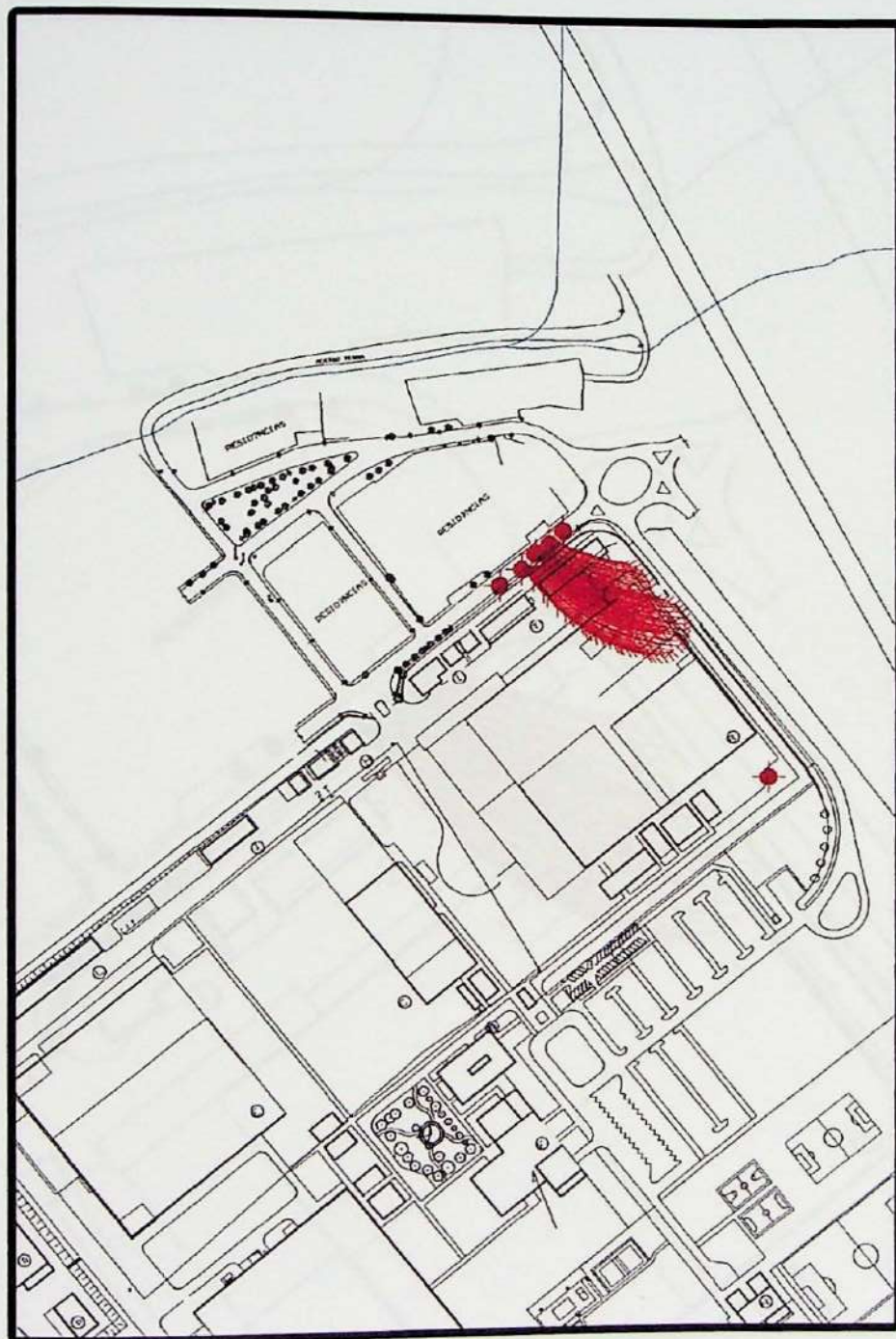
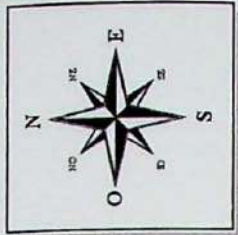
★
Poço de Bombeamento ativado

Mapa Potenciométrico Simulado com Sistema de
Remediação Funcionando - Camada Hidrogeológica 4

Figura
6.32

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências





0 110 m
ESCALA

LEGENDA

Trajatória das partículas marcadas de dez em dez anos

Poço de Bombeamento ativado

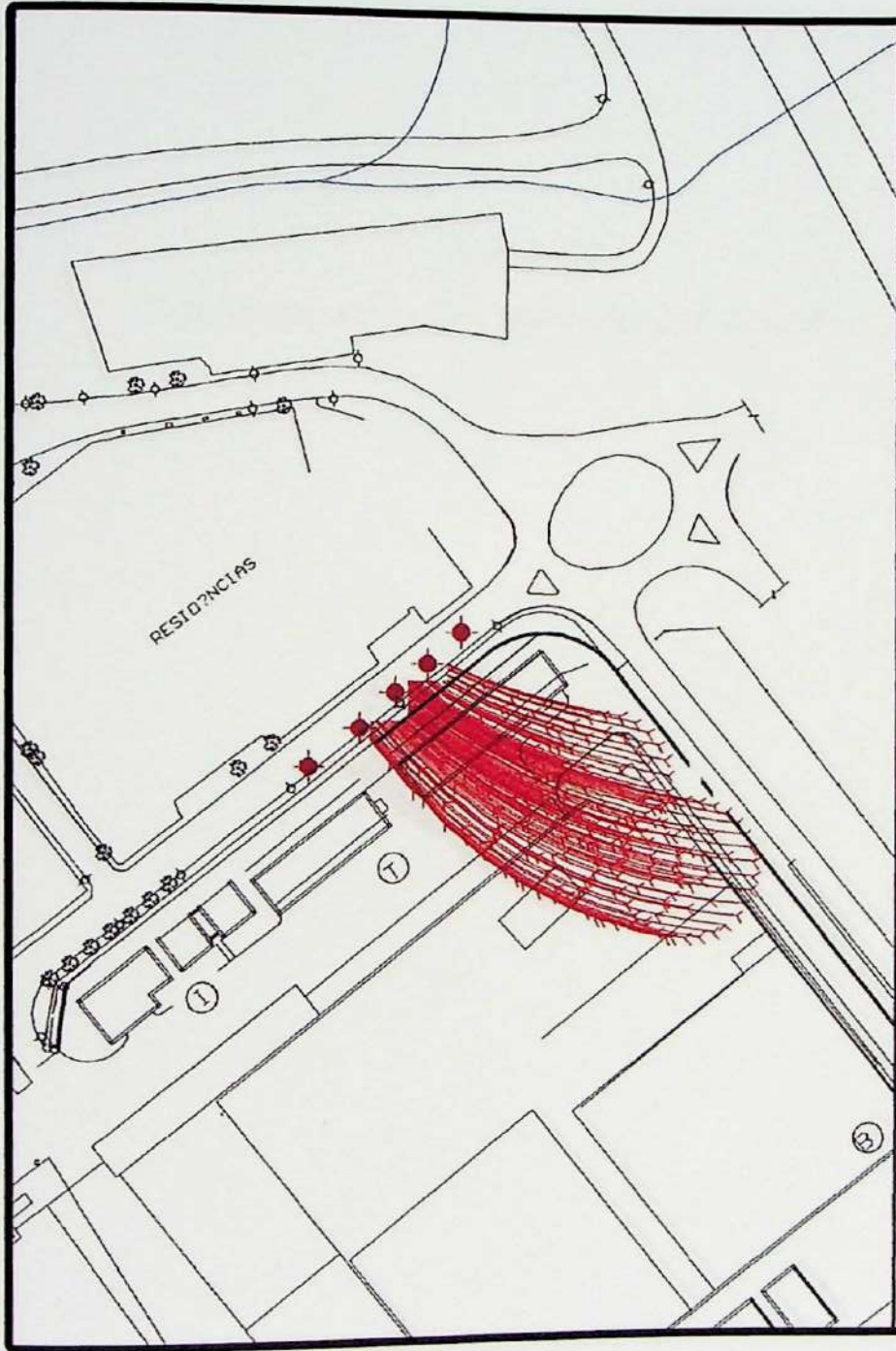
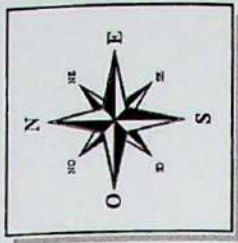
Trajórias Simuladas das Partículas Inseridas no Modelo
Com o Sistema de Remediação Funcionando

Figura
6.33

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP





0 50 m
ESCALA

LEGENDA

Trajetória das partículas marcadas de dez em dez anos



Poço de Bombeamento ativado

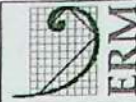


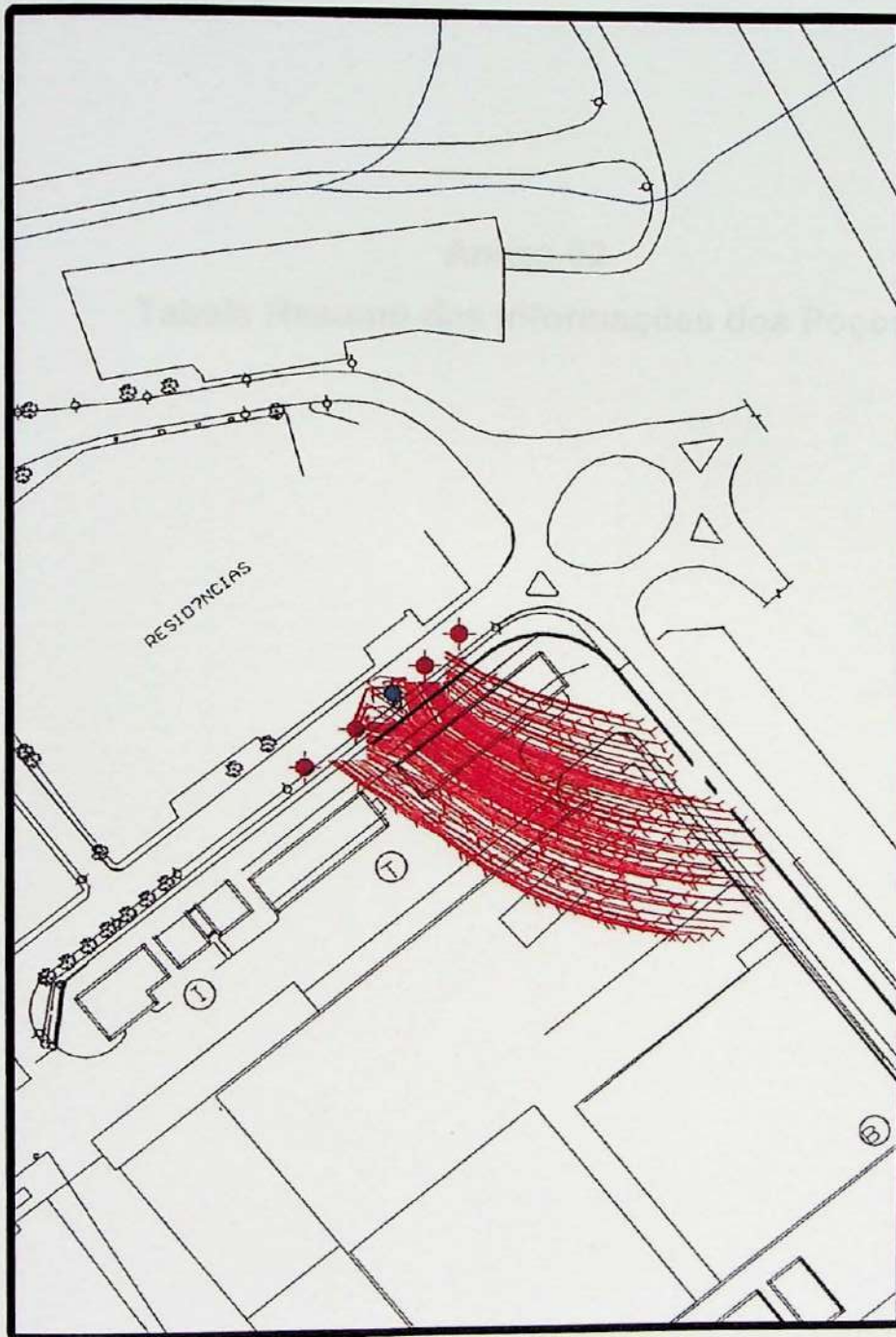
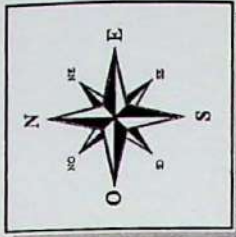
Detalhe das Trajetórias Simuladas das Partículas Inseridas
no Modelo com o Sistema de Remediação Funcionando

Figura
6.34

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

USP





0 50 m
ESCALA

LEGENDA

Trajetória das partículas marcadas de dez em dez anos



Poço de Bombeamento ativado



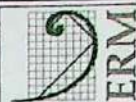
Poço de Bombeamento desativado



Trajetórias Simuladas das Partículas com o Sistema de
Remediação Funcionando com Um Poço Desativado

Figura
6.35

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências



Anexo 02
Tabela Resumo das Informações dos Poços

TABELA RESUMO DOS POÇOS INSTALADOS NA ÁREA DE ESTUDOS

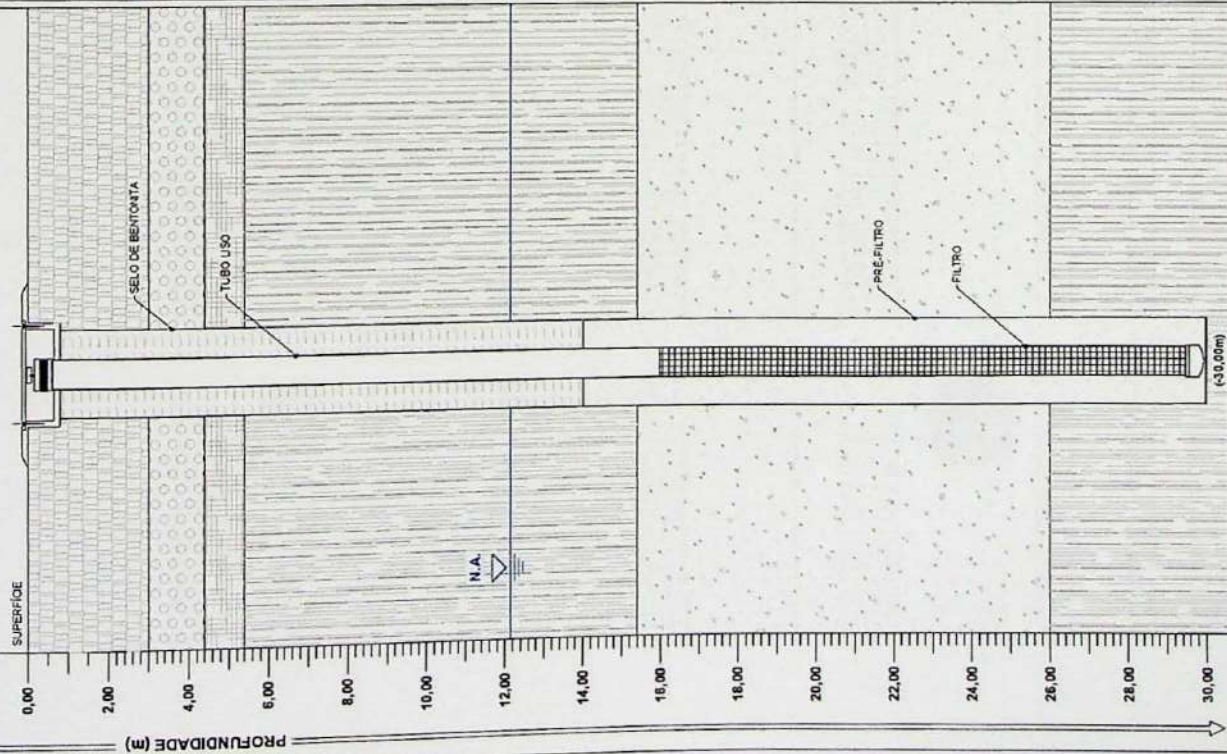
Poço	Prof. Total (m)	Filtro (m)	Camada Hidrogeológica	NA (02/03)	NA (08/09/03)	Cota	Carga Hidráulica (02/03)	Carga Hidráulica (09/03)
PMP-01	30	3	4	13,96	14,2	571,975	558,015	557,775
PMP-02	28	3	4	15,13	--	573,072	557,942	--
PMP-03	25,35	2	4	--	11,645	569,126	--	557,481
PMP-04	27,2	2	4	--	15,04	571,902	--	556,862
PMP-05	28,15	2	4	--	16,175	572,565	--	556,390
PMP-06	27	2	4	--	14,965	571,647	--	556,682
PMP-07	25	2	4	--	11,38	568,091	--	556,711
PMP-08	23,6	2	4	--	8,84	565,911	--	557,071
PM-01	5,5	2	1	4,42	5,17	572,540	568,120	567,370
PM-02	13	3	1	11,62	11,98	572,097	560,477	560,117
PM-03	9,5	3	1	6,58	7,04	566,426	559,846	559,286
PM-04	16,35	6	1	11,28	11,82	572,003	560,723	560,183
PM-05	17,85	6	1	13,33	13,96	572,023	558,693	558,063
PM-06	17,8	6	1	9,45	10,355	572,054	562,604	561,699
PM-07	13,5	3	1	12	12,56	571,934	559,934	559,374
PM-08	8,7	2	1	9,42	cimentado	567,262	557,842	--
PM-09	12	6	1	--	10,36	570,901	--	560,541
PM-10	10,5	5	1	--	9,03	570,122	--	561,092
PM-11	11,8	5	1	10,94	11,54	572,065	561,125	560,525
PM-12	10	6	1	6,11	6,715	572,108	565,998	565,393
PM-13	10	6	1	--	8,77	572,055	--	563,285
PM-14	10	5	1	6,51	7,14	572,018	565,508	564,878
PM-15	9,7	5	1	5,95	6,47	572,141	566,191	565,671
PM-16	11	5	1	6,19	6,775	572,119	565,929	565,344
PM-17	11	6	1	--	6,99	572,163	--	565,173
PM-18	9,9	6	1	5,68	6,22	572,168	566,488	565,948
PM-19	8,5	5	1	5,06	5,69	572,092	567,032	566,402
PM-20	12,3	5	1	9,93	--	573,102	563,172	--
PM-21	12,5	5	1	10,19	--	572,793	562,603	--
PM-22	10	4	1	6,03	6,515	572,120	566,090	565,605
PM-23	10	4	1	6,45	7,05	572,150	565,700	565,100
PM-24	9,2	4	1	6,25	6,89	572,120	565,870	565,230
PM-25	9,2	4	1	5,88	6,47	572,180	566,300	565,710
PM-26	8,7	4	1	5,59	6,04	572,120	566,530	566,080
PM-27	12	4	1	7,11	8,07	572,320	565,210	564,250
PM-28	12	4	1	6,41	6,955	572,180	565,770	565,225
PM-29	12	4	1	6,01	6,54	572,090	566,080	565,550
PM-30	10,5	4	1	5,6	6,14	572,220	566,620	566,080
PM-31	10	4	1	6,91	7,92	571,980	565,070	564,060
PM-32	8,3	4	1	--	6,98	572,090	--	565,130
PM-33	13,5	4	1	--	10,795	571,917	--	561,122
PM-34	13,5	4	1	--	12,14	572,652	--	560,512
PM-35	13,5	4	1	--	11,04	571,658	--	560,618
PM-36	11,7	4	1	--	8,295	567,988	--	559,693
PM-37	9	4	1	--	5,96	565,963	--	560,003
PM-38	11	4	1	--	8,75	569,174	--	560,424
PZ-01	9,3	7	1	8,32	9,29	572,379	564,059	563,089
PZ-04	10	7	1	8,77	9,6	572,675	563,905	563,075
PZ-05	10,1	3	1	8,58	9,45	572,570	563,990	563,120
PZ-06	10,5	3	1	8,72	9,5	572,607	563,887	563,107
PB-02	30	14	2, 3 e 4	11,99	14,8	572,540	560,550	557,740
PB-03	30	14	2, 3 e 4	11,27	11,835	572,010	560,740	560,175

Anexo 03

Perfil Construtivo dos Poços Instalados em Janeiro e em Agosto de 2003

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO

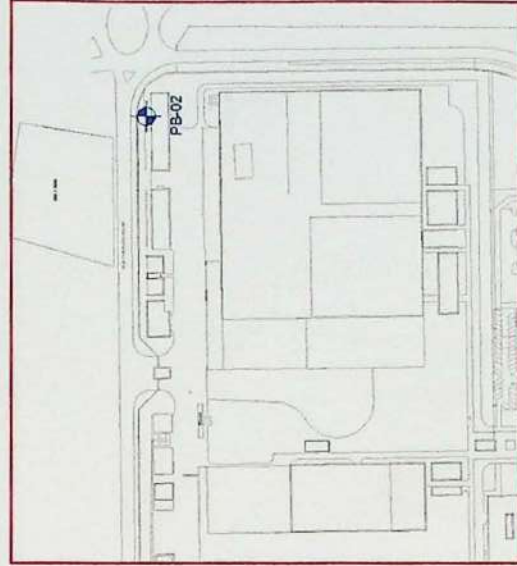
PB-02



DESCRIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- 0.00 - 3.00m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- 3.00 - 4.40m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- 4.40 - 5.40m: Argila arenosa a siltosa.
- 5.40 - 15.40m: Argila siltosa compacta, cinza.
- 15.40 - 26.00m: Areia fina a média cor clara.
- 26.00 - 30.00m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



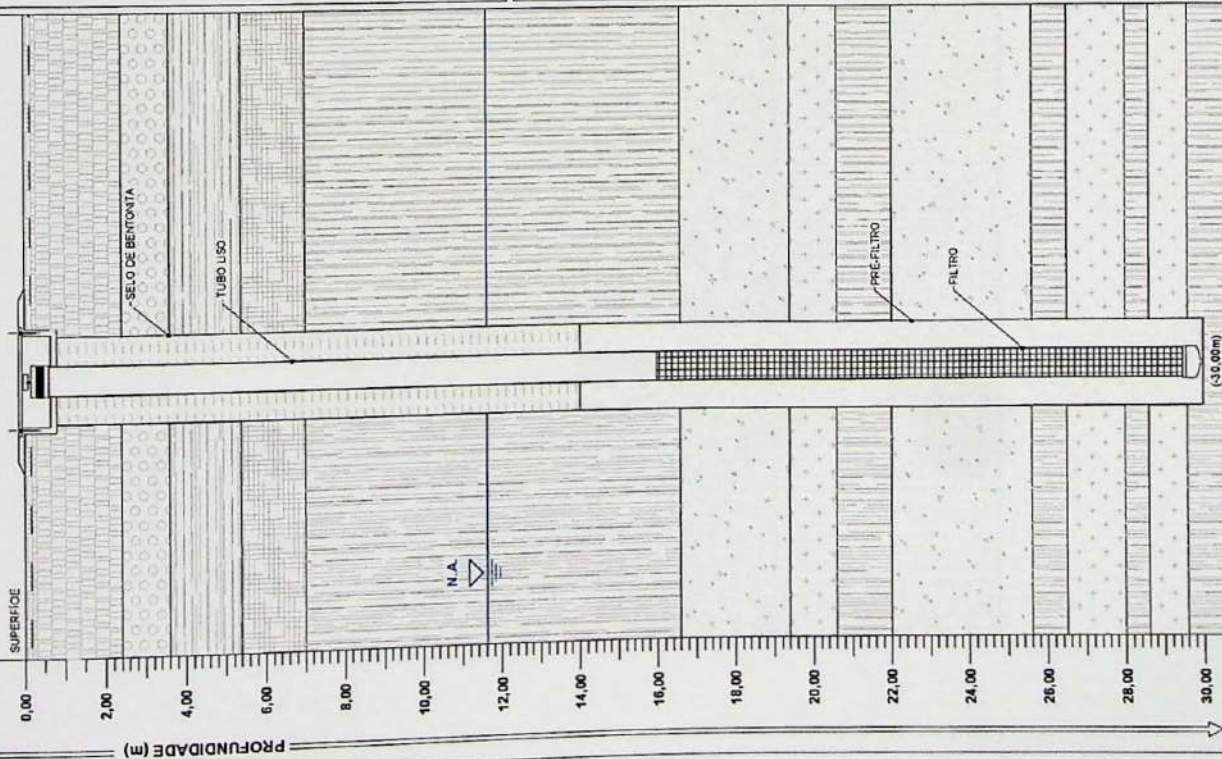
PB-02

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO DO POÇO 11" 4" MÉTODO DE PERFURAÇÃO
HOLLOW STEM AUGER

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO

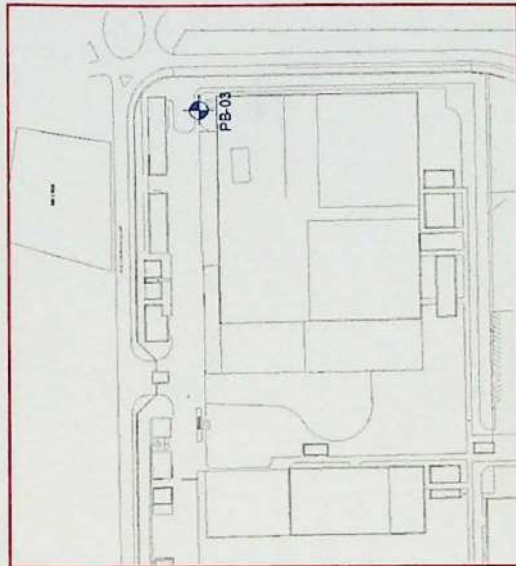
PB-03



DESCRIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0.00 - 0.20m: Piso de concreto sobre brita.
- . 0.20 - 2.20m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.20 - 3.60m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 3.60 - 5.40m: Argila siltosa amarela.
- . 5.40 - 7.00m: Argila arenosa a siltosa.
- . 7.00 - 16.60m: Argila siltosa compacta, cinza.
- . 16.60 - 19.40m: Areia fina a média cor clara.
- . 19.40 - 20.60m: Areia fina a grossa, cor clara, com arcósios.
- . 20.60 - 22.00m: Argila siltosa compacta, cinza.
- . 22.00 - 25.60m: Areia fina a média cor clara.
- . 25.60 - 26.50m: Argila siltosa compacta, cinza.
- . 26.50 - 28.00m: Areia fina a grossa, cor clara, com arcósios.
- . 28.00 - 28.60m: Argila siltosa compacta, cinza.
- . 28.60 - 29.60m: Areia fina a grossa, cor clara, com arcósios.
- . 29.60 - 30.00m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



PB-03

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Ø PERFURAÇÃO 11" Ø INSTALAÇÃO 4" MÉTODO DE PERFURAÇÃO HOLLOW STEM AUGER

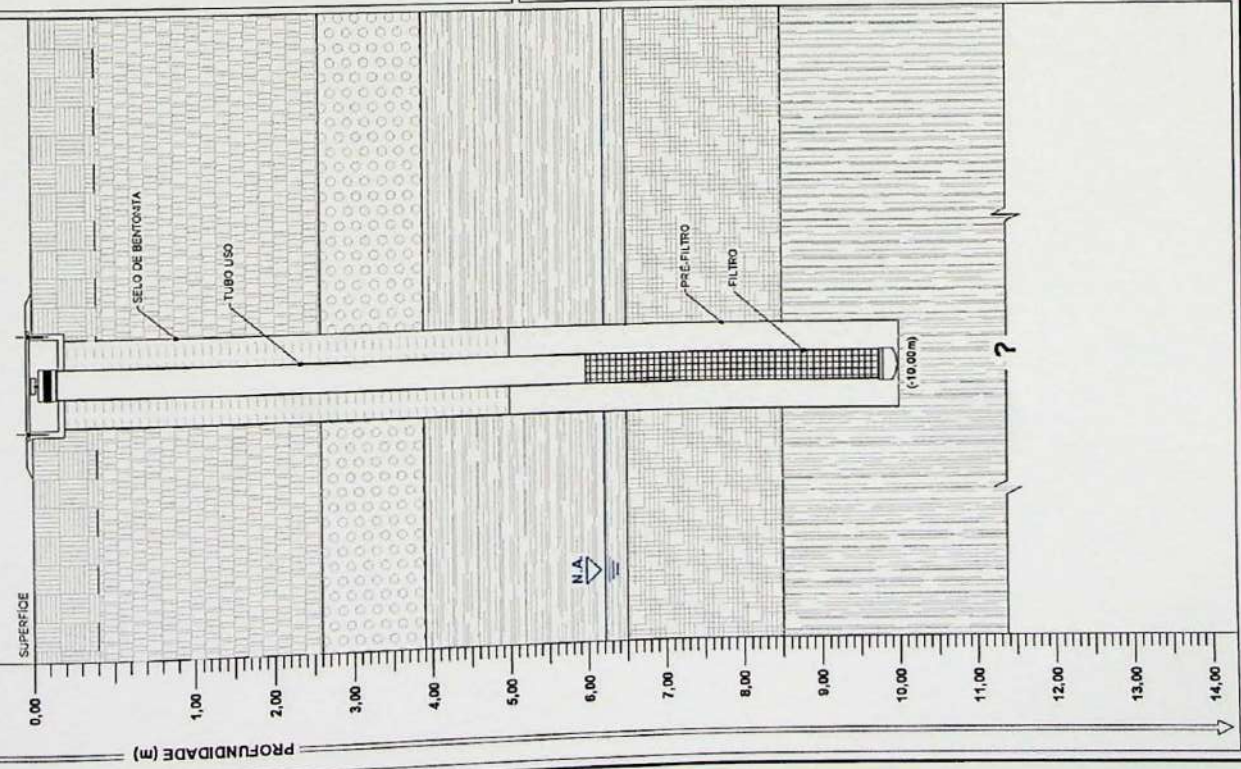


PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

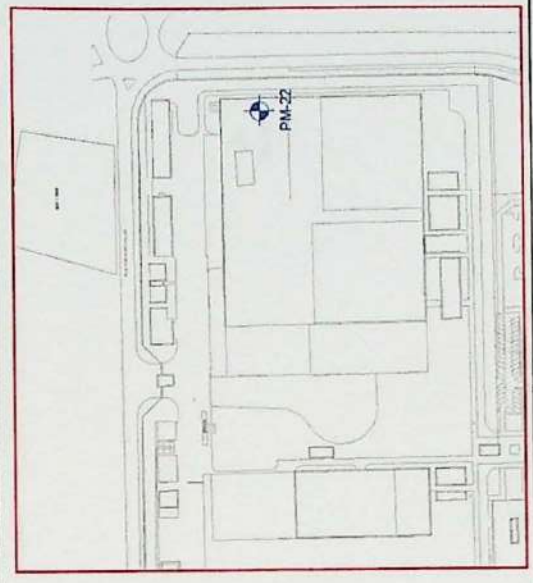
CAMADA 1

- . 0.00 - 0.40m: Piso de concreto sobre brita.
- . 0.40 - 2.60m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.60 - 3.90m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 3.90 - 6.50m: Argila siltosa amarela.
- . 6.50 - 8.50m: Argila arenosa a siltosa.
- . 8.50 - 10.00m: Argila siltosa compacta, cinza.

PM-22

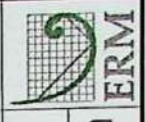


LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



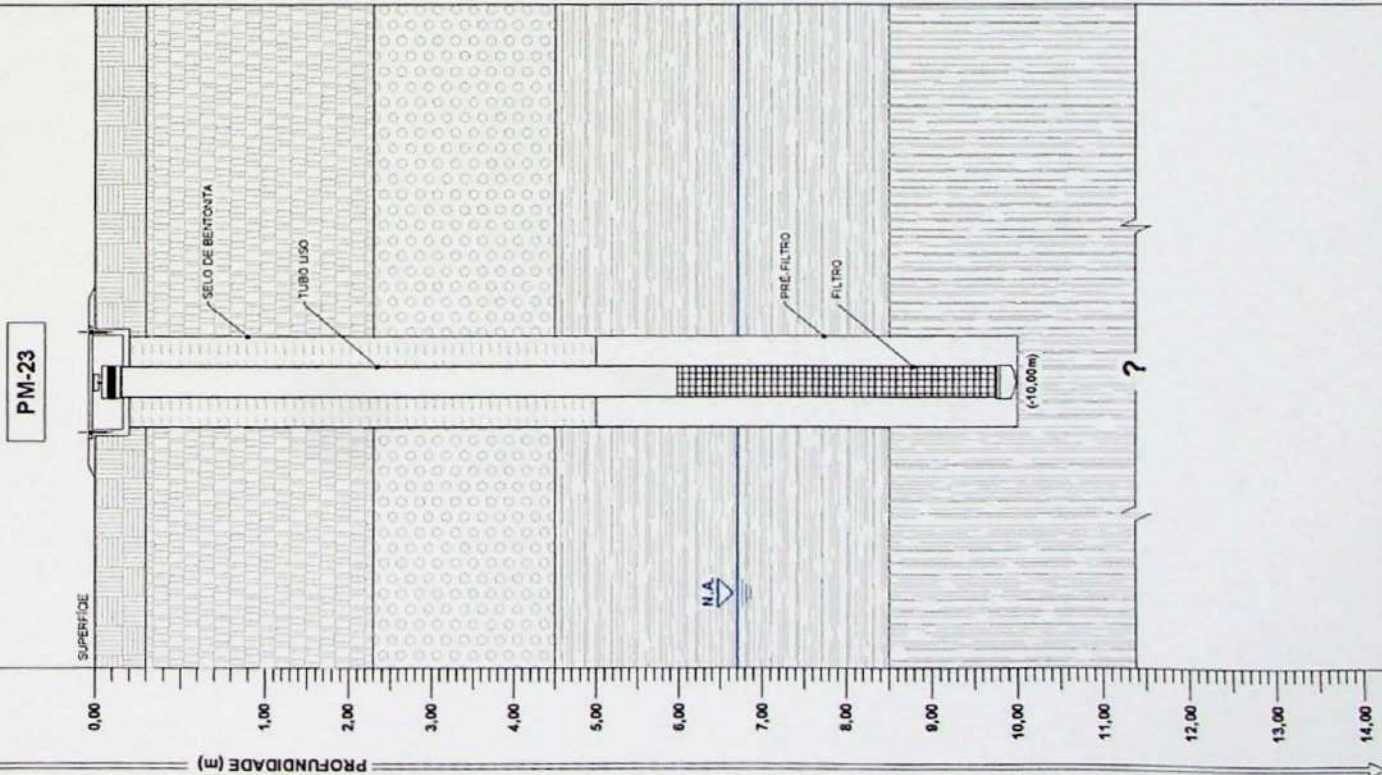
PM-22

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências



PERFURAÇÃO	INSTALAÇÃO	METODO DE PERFURAÇÃO
4"	2"	TRADO MANUAL

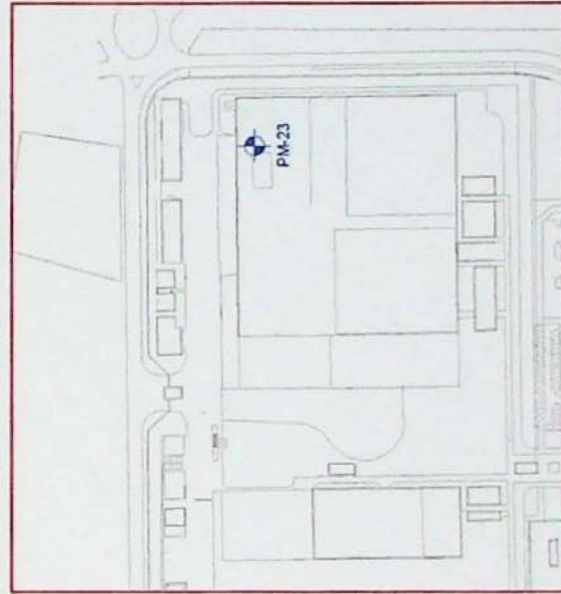
PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



CAMADA 1

- . 0.00 - 0.30m: Piso de concreto sobre brita.
- . 0.30 - 2.30m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.30 - 4.50m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 4.50 - 8.50m: Argila siltosa amarela.
- . 8.50 - 10.00m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



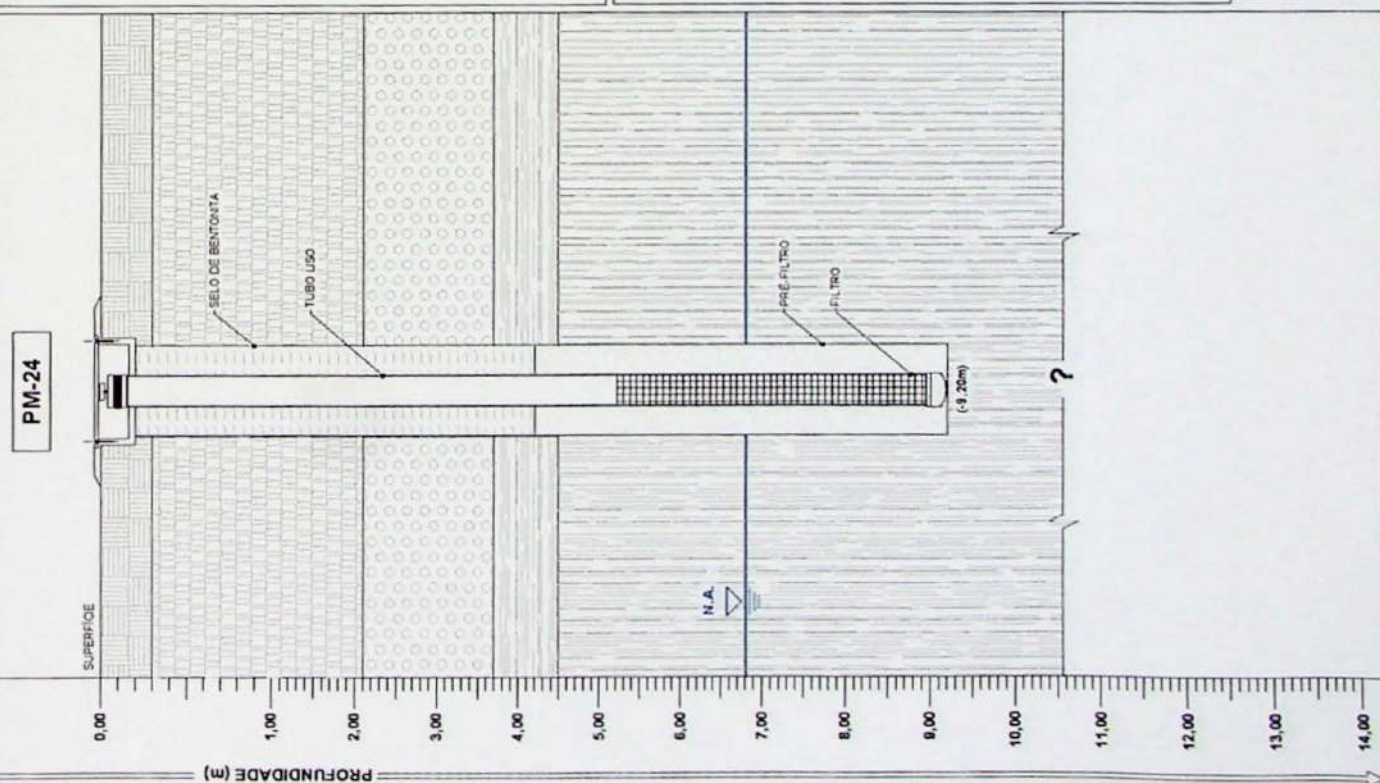
PM-23

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIAMETRO 4" INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO TRADO MANUAL



PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

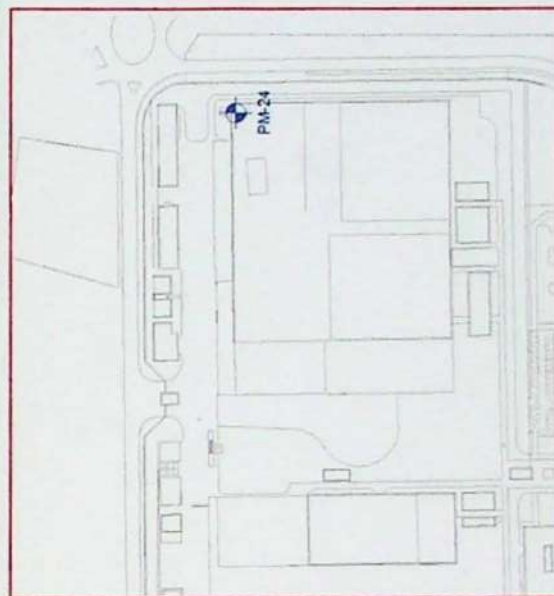


DESCRIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

CAMADA 1

- . 0,00 - 0,30m: *Piso de concreto sobre brita.*
- . 0,30 - 2,10m: *Aterro argilo siltoso avermelhado.*
- . 2,10 - 3,70m: *Areia argilosa, com cascalho na base.*
- . 3,70 - 4,50m: *Argila siltosa amarela.*
- . 4,50 - 9,20m: *Argila siltosa compacta, cinza.*

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO

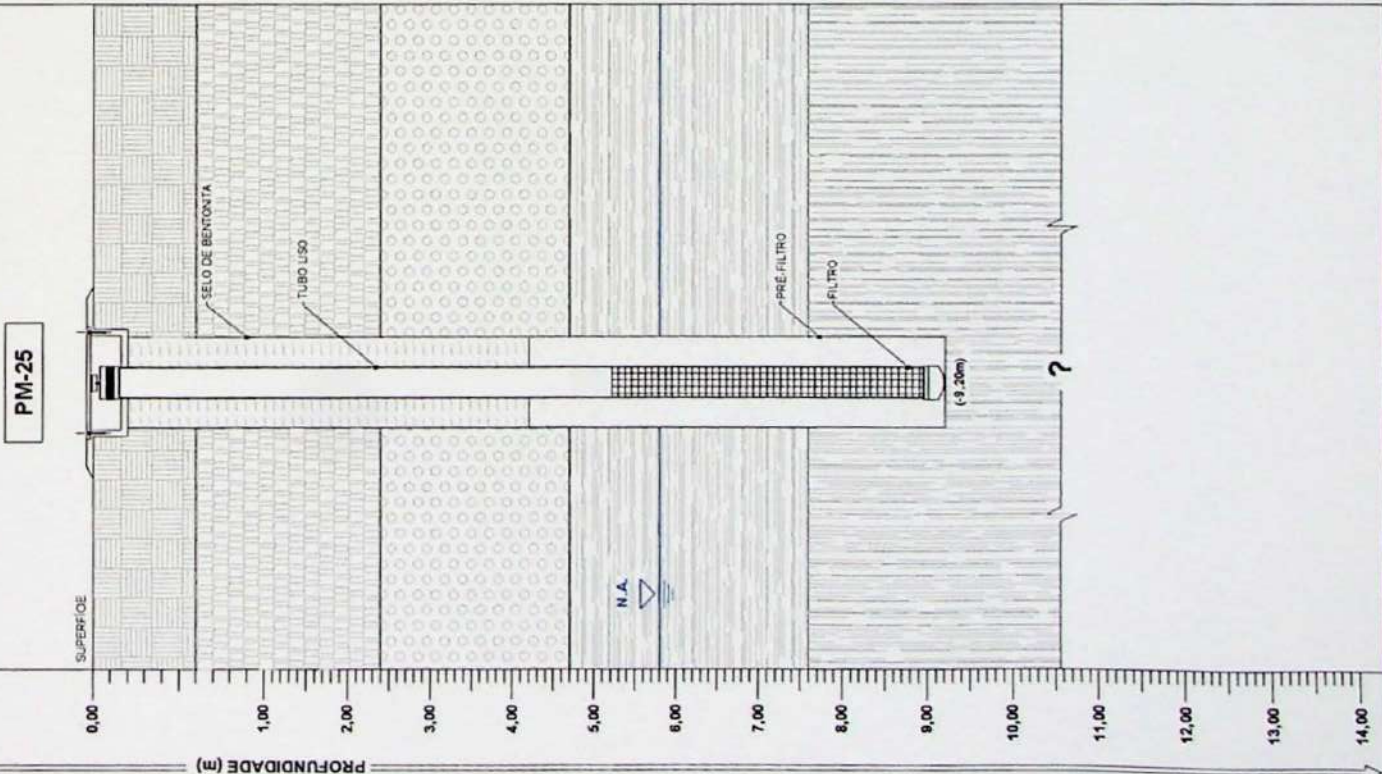


PM-24

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

INSTALAÇÃO	MÉTODO DE PESQUISA
4"	TRADO MANUAL

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

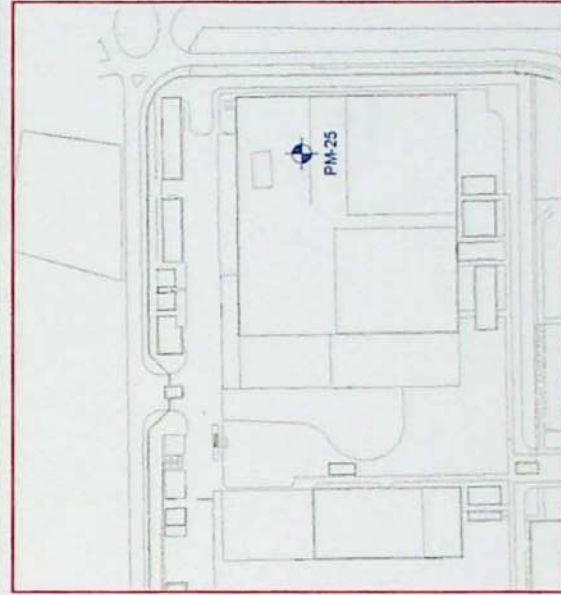


DESCRIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

CAMADA 1

- . 0.00 - 0.60m: Piso de concreto sobre brita.
- . 0.60 - 2.40m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.40 - 4.60m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 4.60 - 7.60m: Argila siltosa amarela.
- . 7.60 - 9.20m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



PM-25

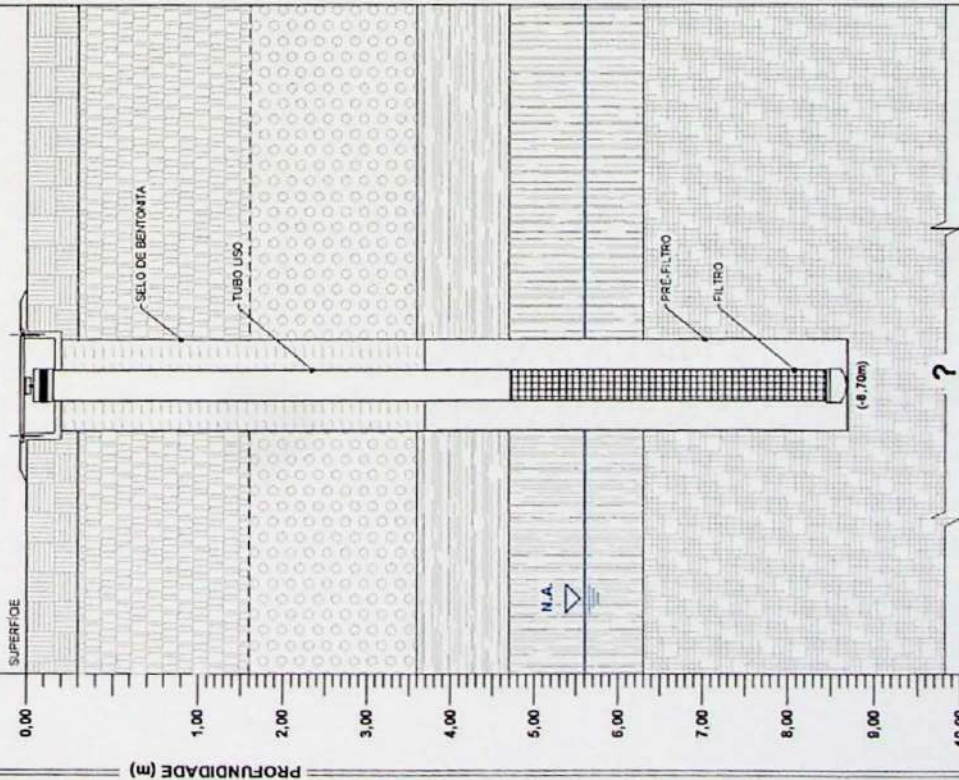
TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÁMETRO 4" INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO TRADO MANUAL



PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

PM-26

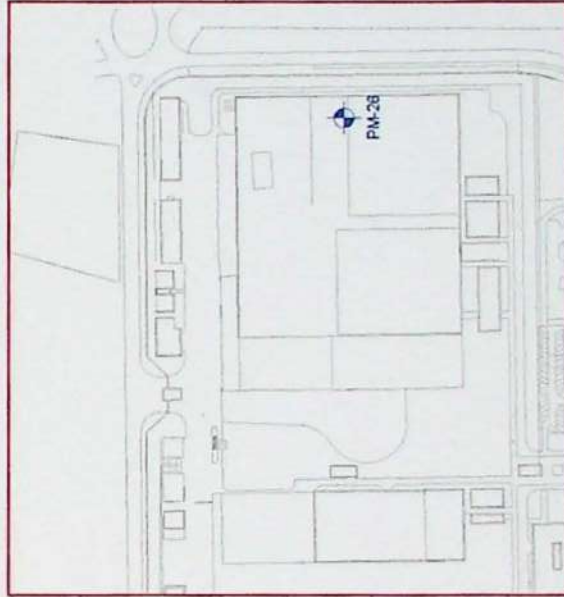


DESCRIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

CAMADA 1

- . 0.00 - 0.30m: Piso de concreto sobre brita.
- . 0.30 - 1.60m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 1.60 - 3.60m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 3.60 - 4.70m: Argila siltosa amarela.
- . 4.70 - 6.30m: Argila siltosa compacta, cinza.
- . 6.30 - 8.70m: Argila arenosa a siltosa.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



PM-26

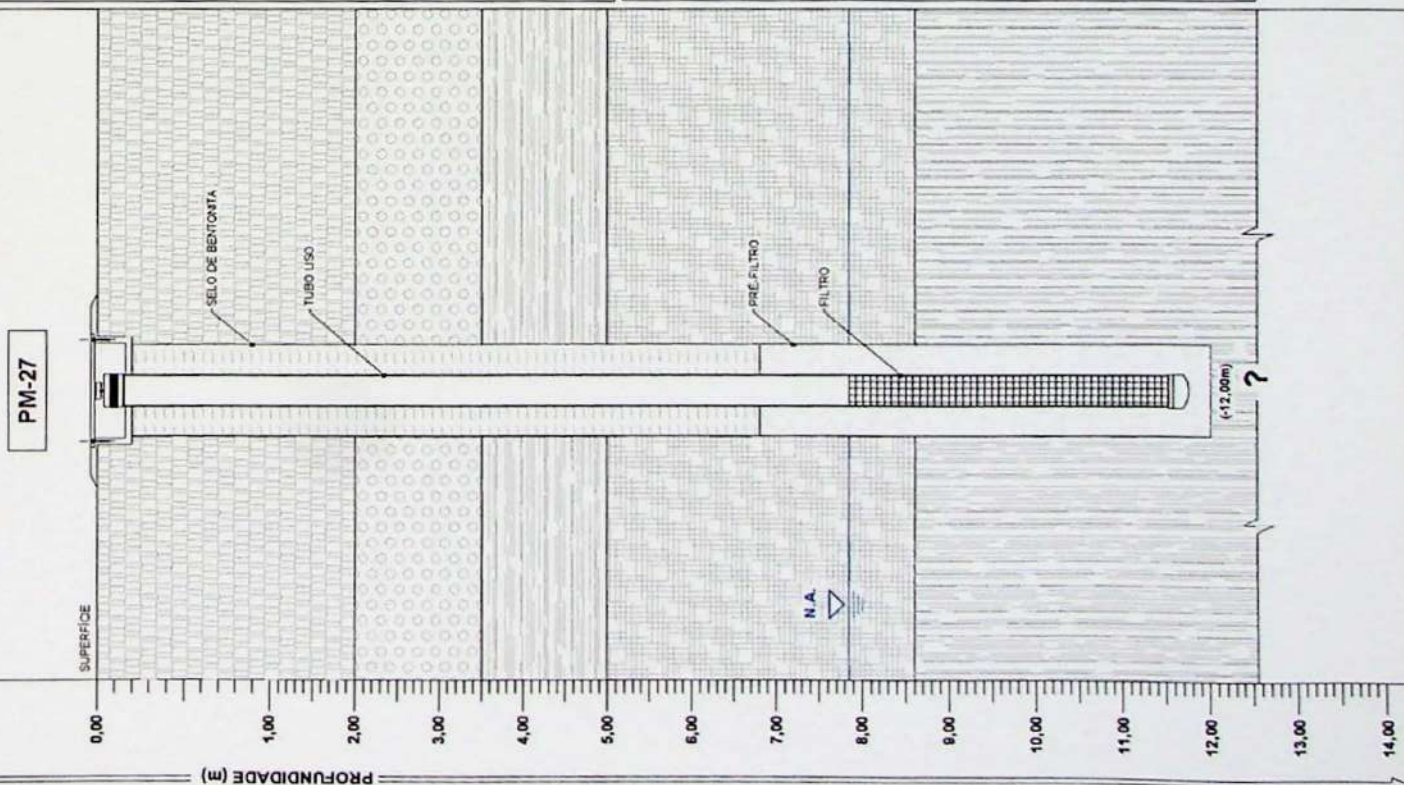
TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

ESCALA 4" 2" 1"

MÉTODO DE PERFURAÇÃO
TRADO MANUAL



PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

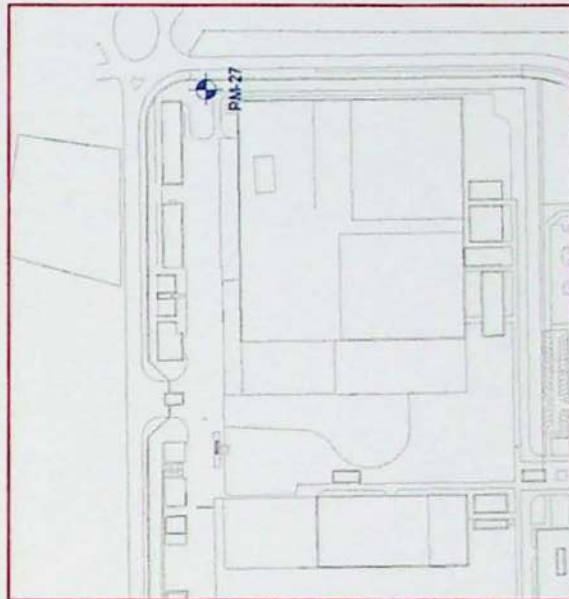


DESCRIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

CAMADA 1

- . 0.00 - 2.00m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.00 - 3.50m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 3.50 - 5.00m: Argila siltosa amarela.
- . 5.00 - 8.60m: Argila arenosa a siltosa.
- . 8.60 - 12.00m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



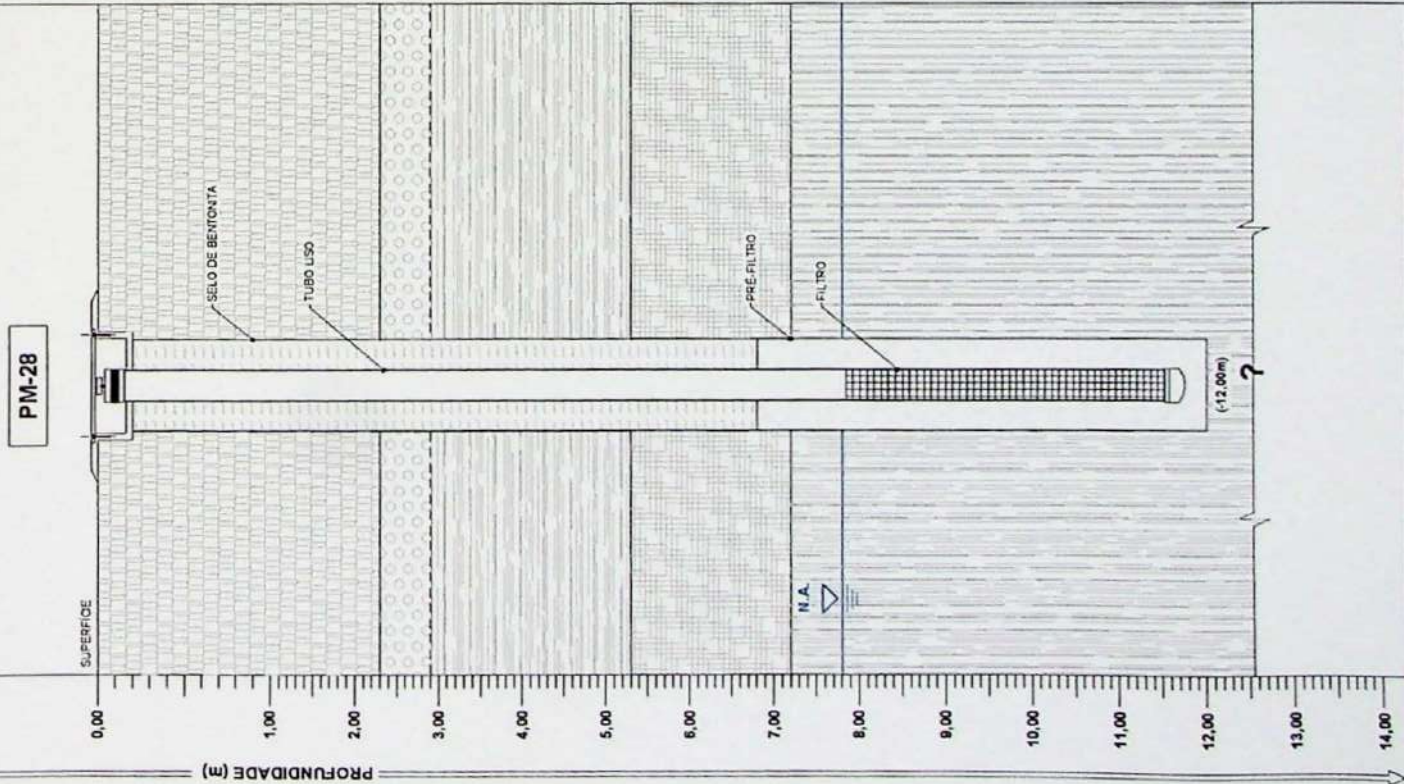
PM-27

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Ø PERFURAÇÃO 6" Ø INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO HOLLOW STEM AUGER



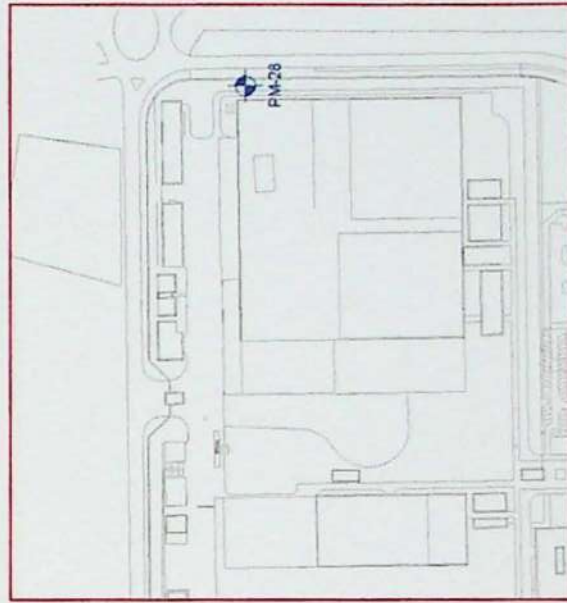
PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



CAMADA 1

- . 0.00 - 2.30m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.30 - 2.90m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 2.90 - 5.30m: Argila siltosa amarela.
- . 5.30 - 7.20m: Argila arenosa a siltosa.
- . 7.20 - 12.00m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



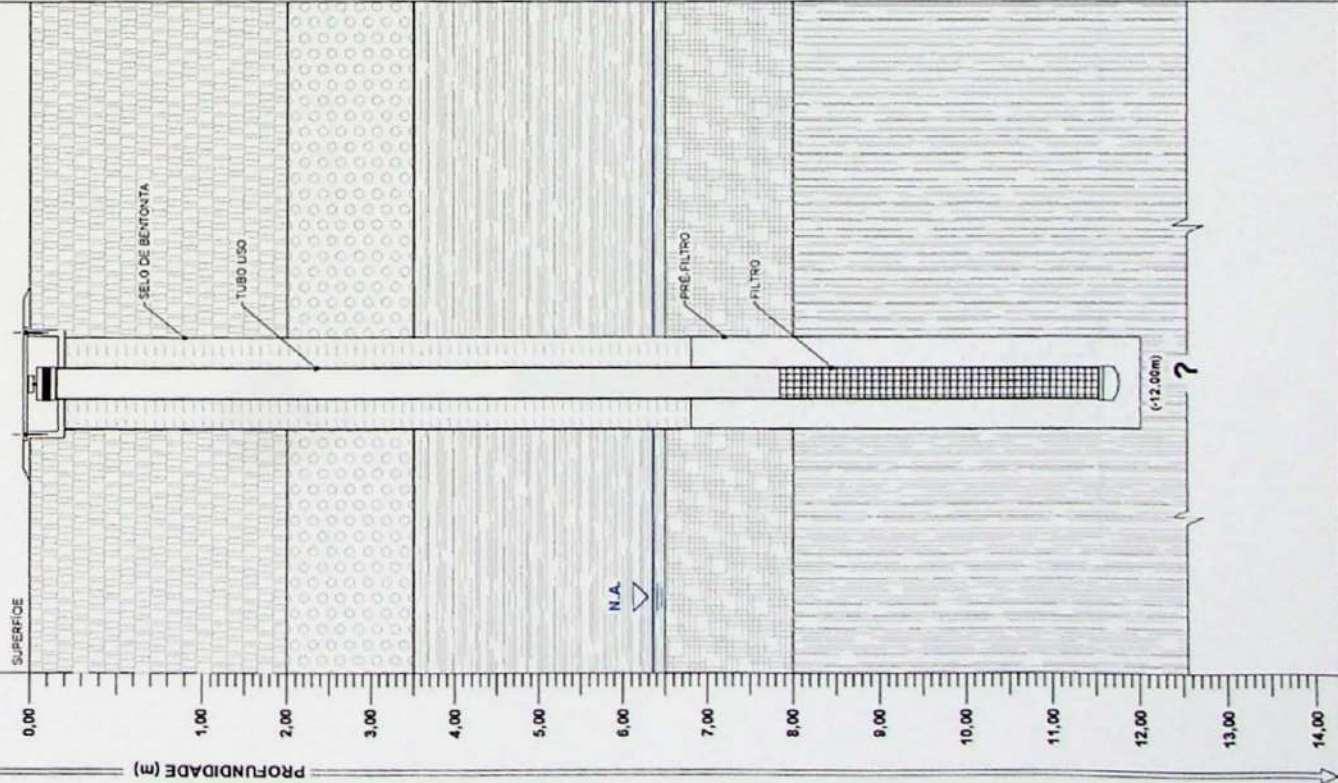
PM-28

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO DO PERFURAÇÃO 8" DIÂMETRO DE INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO HOLLOW STEM AUGER

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

PM-29

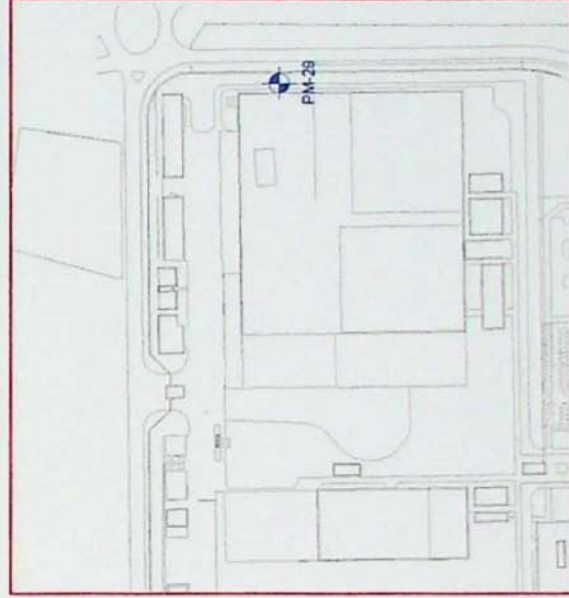


DESCRIÇÃO CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

CAMADA 1

- . 0.00 - 2.00m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.00 - 3.50m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 3.50 - 6.50m: Argila siltosa amarela.
- . 6.50 - 8.00m: Argila arenosa a siltosa.
- . 8.00 - 12.00m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



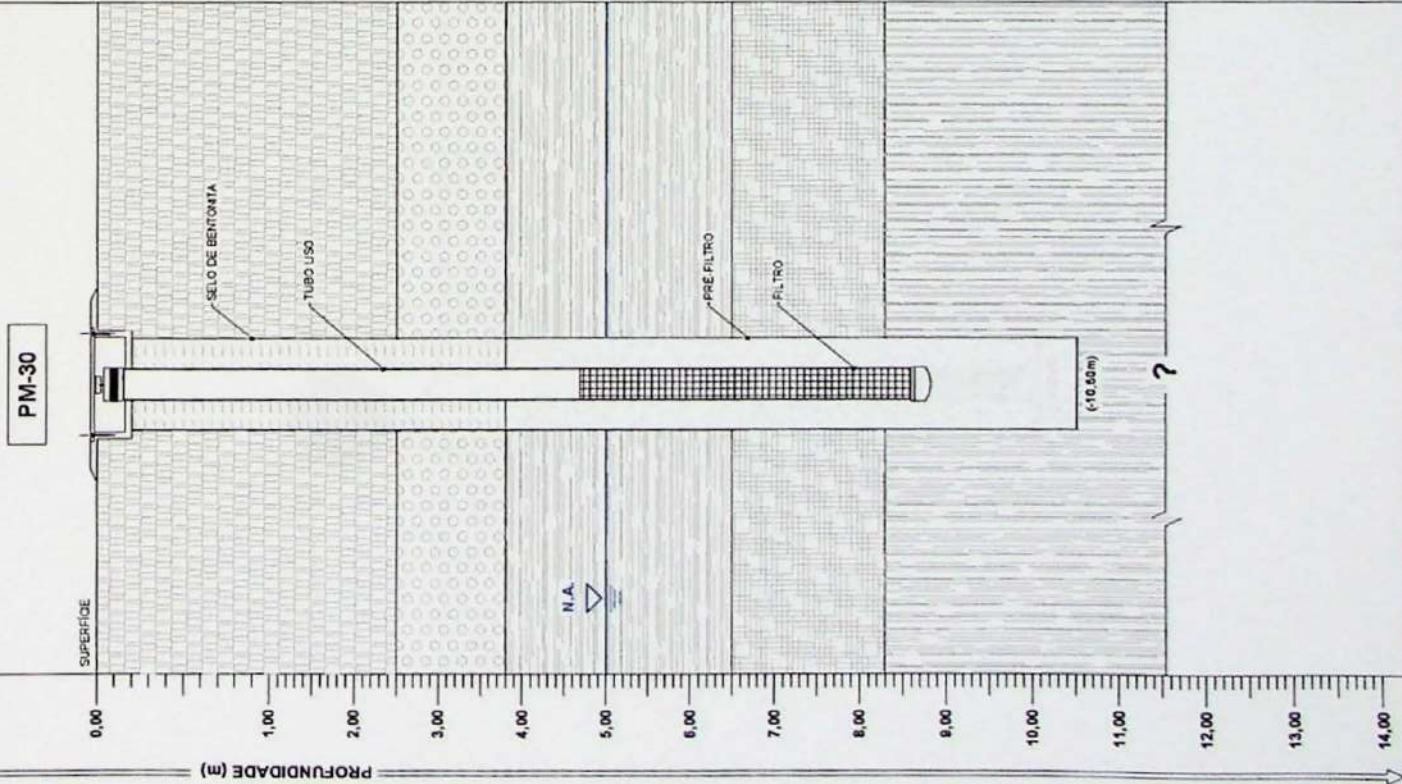
PM-29

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Ø PERFURAÇÃO 6" Ø INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO HOLLOW STEM AUGER



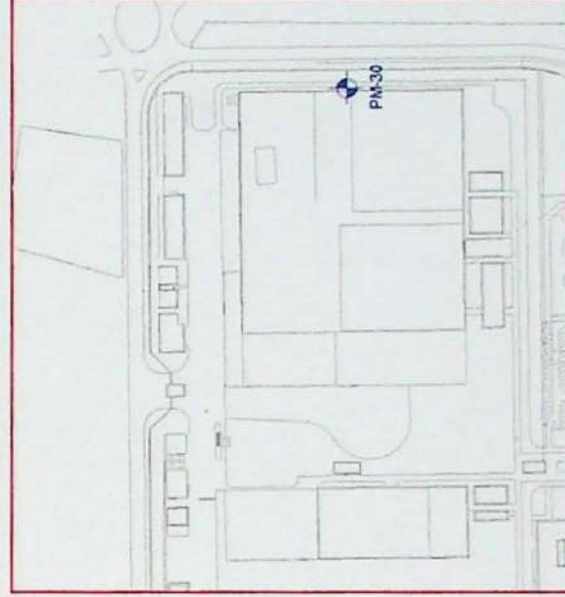
PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



CAMADA 1

- . 0.00 - 2.50m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 2.50 - 3.80m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 3.80 - 6.50m: Argila siltosa amarela.
- . 6.50 - 8.30m: Argila arenosa a siltosa.
- . 8.30 - 10.50m: Argila siltosa compacta, cinza.

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



PM-30

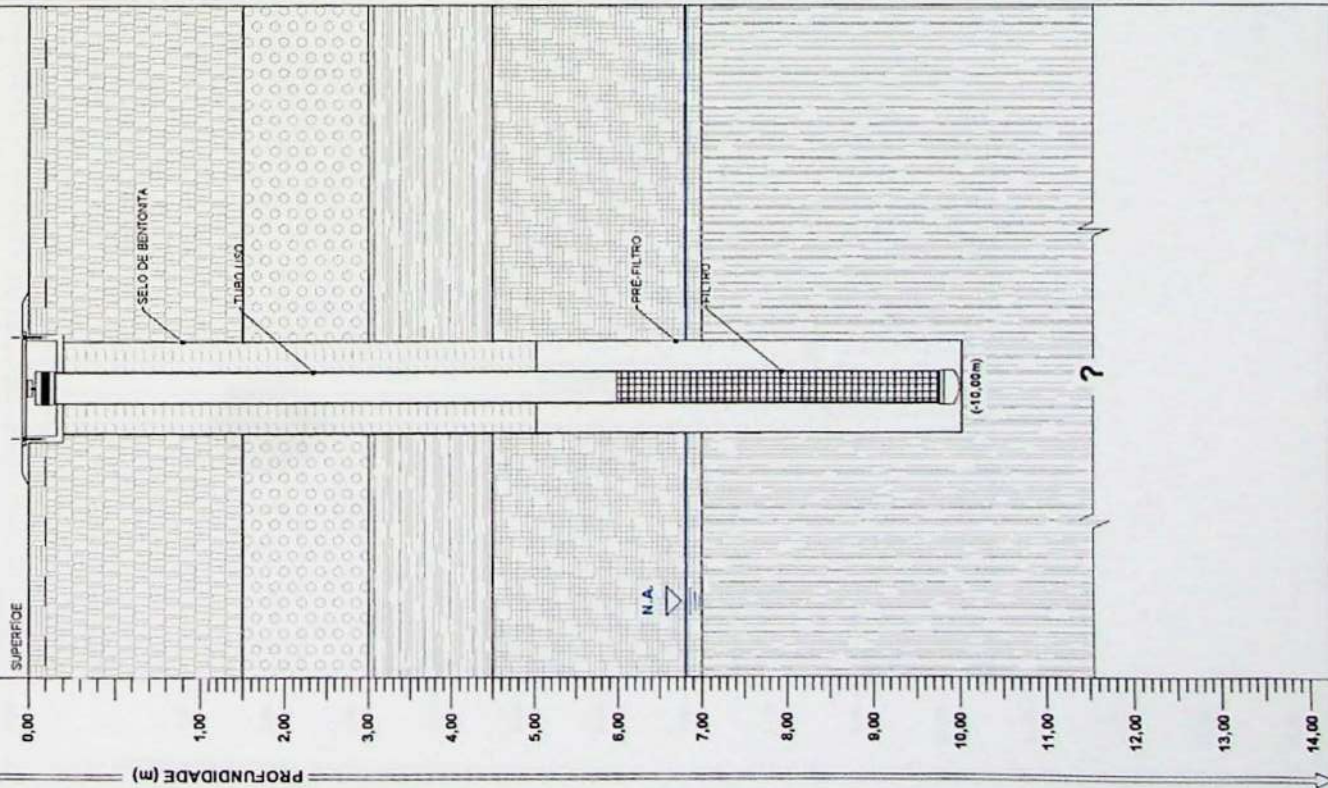
TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

Ø FURTIMUNÇÃO 8" Ø INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE FURTIMUNÇÃO HOLLOW STEM AUGER



PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

PM-31

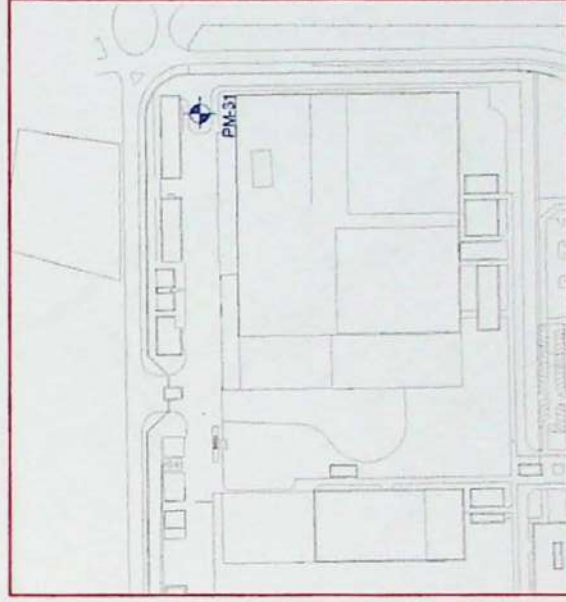


DESCRIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

CAMADA 1

- . 0.00 - 0.10m: Piso de concreto sobre brita.
- . 0.10 - 1.50m: Aterro argilo siltoso avermelhado.
- . 1.50 - 3.00m: Areia argilosa, com cascalho na base.
- . 3.00 - 4.50m: Argila siltosa amarela.
- . 4.50 - 7.00m: Argila arenosa a siltosa.
- . 7.00 - 10.50m: Argila siltosa compacta, cinza.

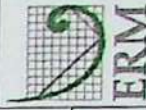
LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



PM-31

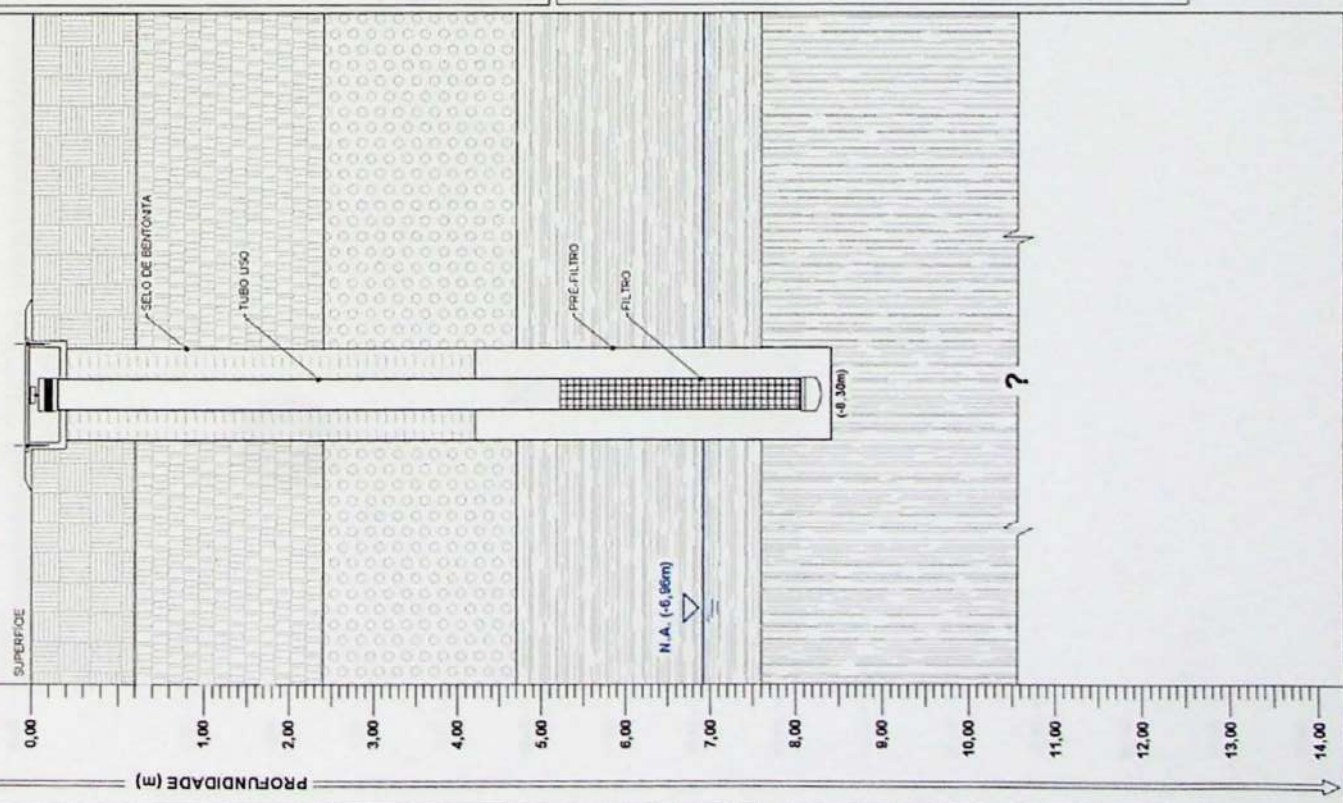
TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO DE PERFURAÇÃO 6" DIÂMETRO DE INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO HOLLOW STEM AUGER



PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

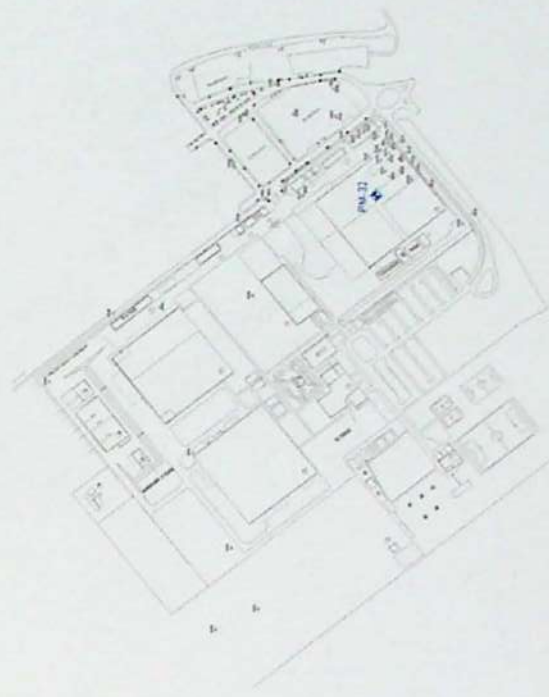
PM-32



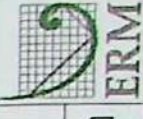
CAMADA 1

- . 0.00 - 0.60m: *Piso de concreto sobre brita.*
- . 0.60 - 2.40m: *Aterro argilo siltoso avermelhado.*
- . 2.40 - 4.60m: *Areia argilosa, com cascalho na base.*
- . 4.60 - 7.60m: *Argila siltosa amarela.*
- . 7.60 - 9.20m: *Argila siltosa compacta, cinza.*

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEMECALA



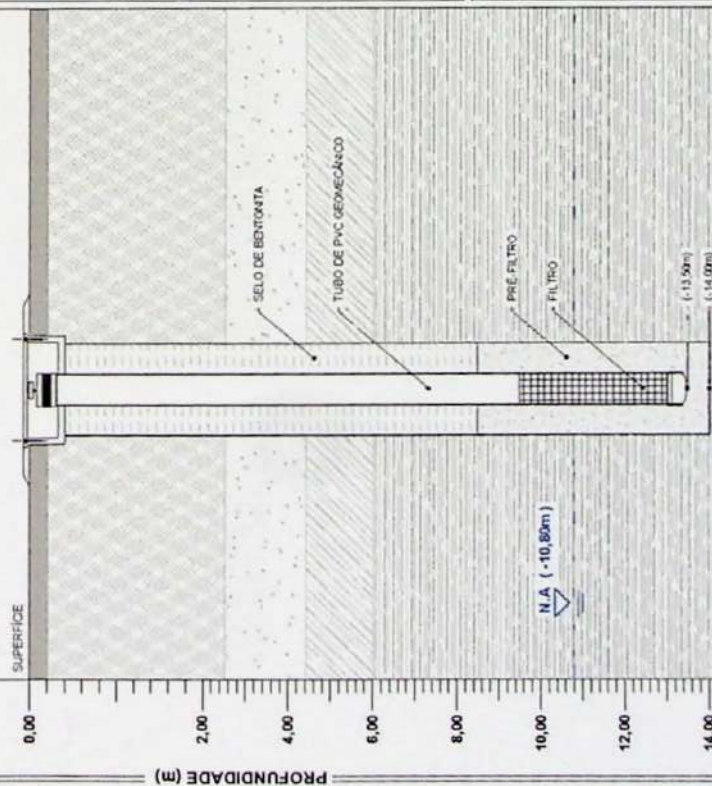
PM-32

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO	4"	INSTALAÇÃO	2"	MÉTODO DE PERFURAÇÃO	HOLLOW STEM AUGER
----------	----	------------	----	----------------------	-------------------

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

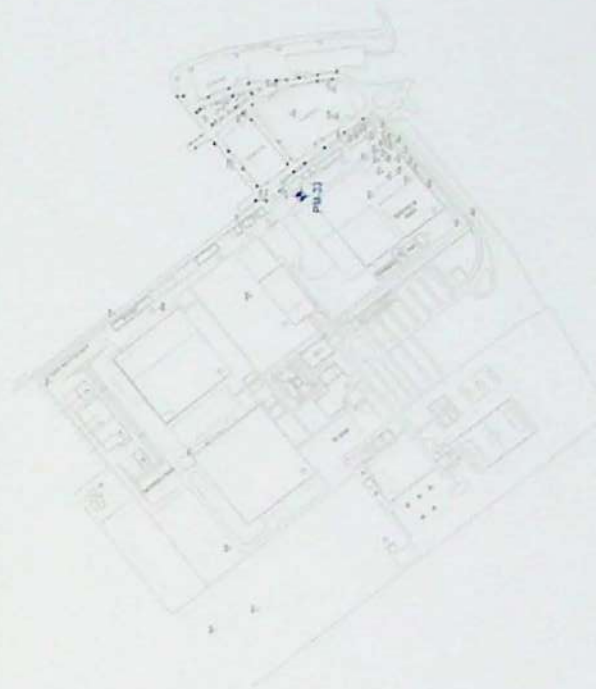
PM-33



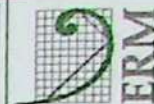
DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0,00 - 0,20m: Asfalto,
- . 0,20 - 2,50m: Aterro areno argiloso,
- . 2,50 - 4,40m: Areia grossa e cascalho,
- . 4,40 - 6,00m: Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
- . 6,00 - 16,50m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEM ESCALA



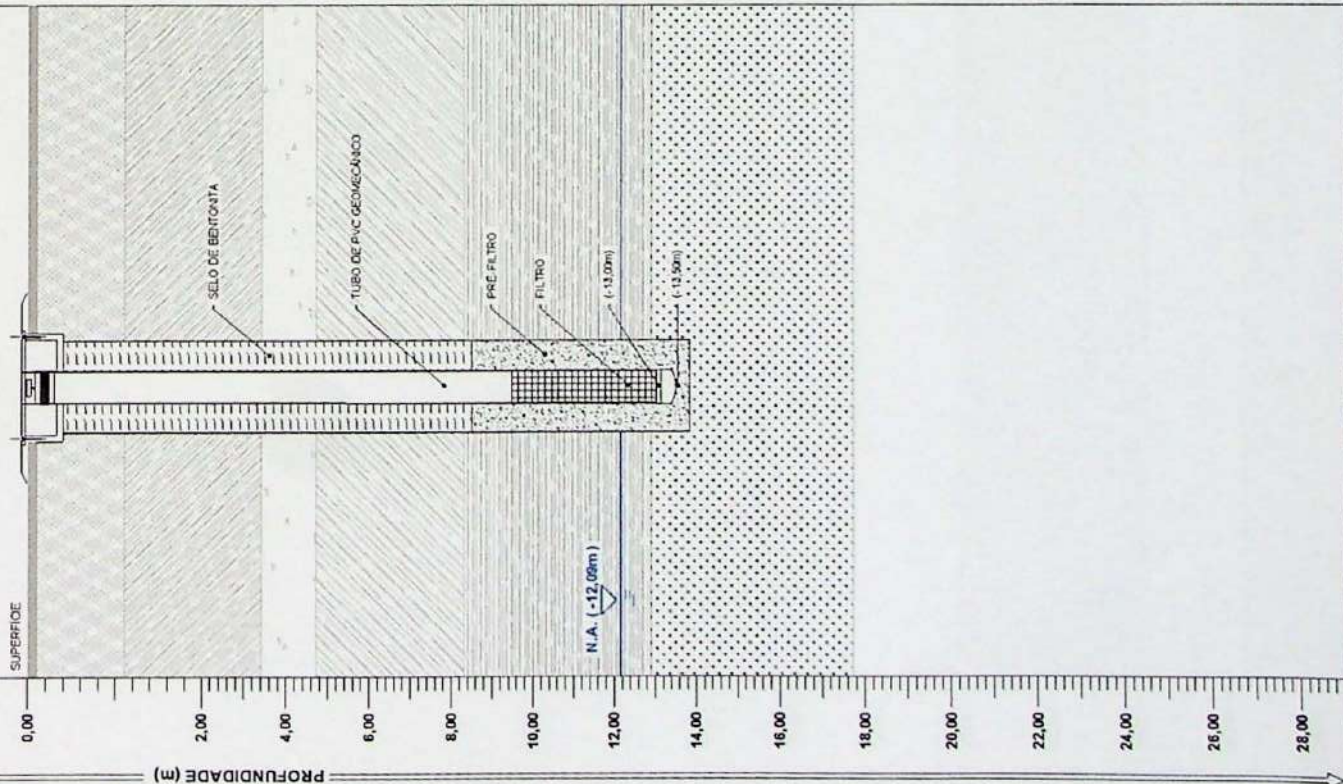
PM-33

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÁMETRO DE PERFURAÇÃO	DIÁMETRO DE INSTALAÇÃO	MÉTODO DE PERFURAÇÃO
4"	2"	HOLLOW STEM AUGER

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

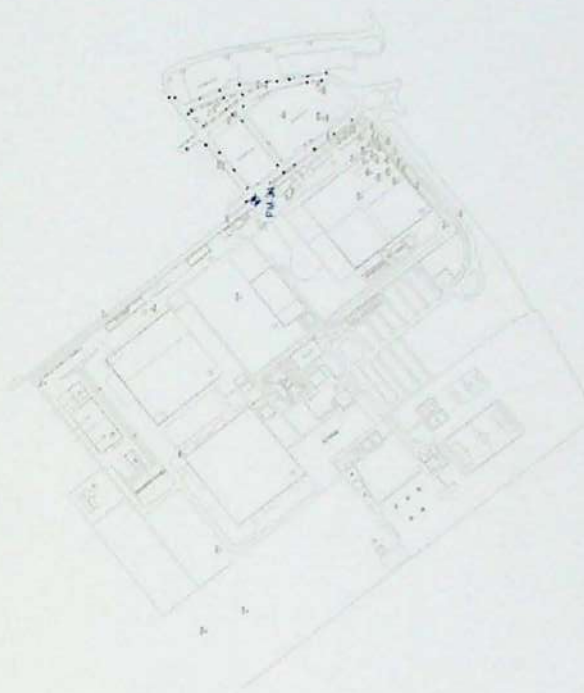
PM-34



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- 0,00 - 0,10m: Asfalto,
- 0,10 - 1,10m: Aterro areno argiloso,
- 1,10 - 3,40m: Argila siltosa marrom,
- 3,40 - 4,70m: Areia grossa e cascalho,
- 4,70 - 8,30m: Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
- 8,30 - 12,90m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- 12,90 - 17,70m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SENESCOLA

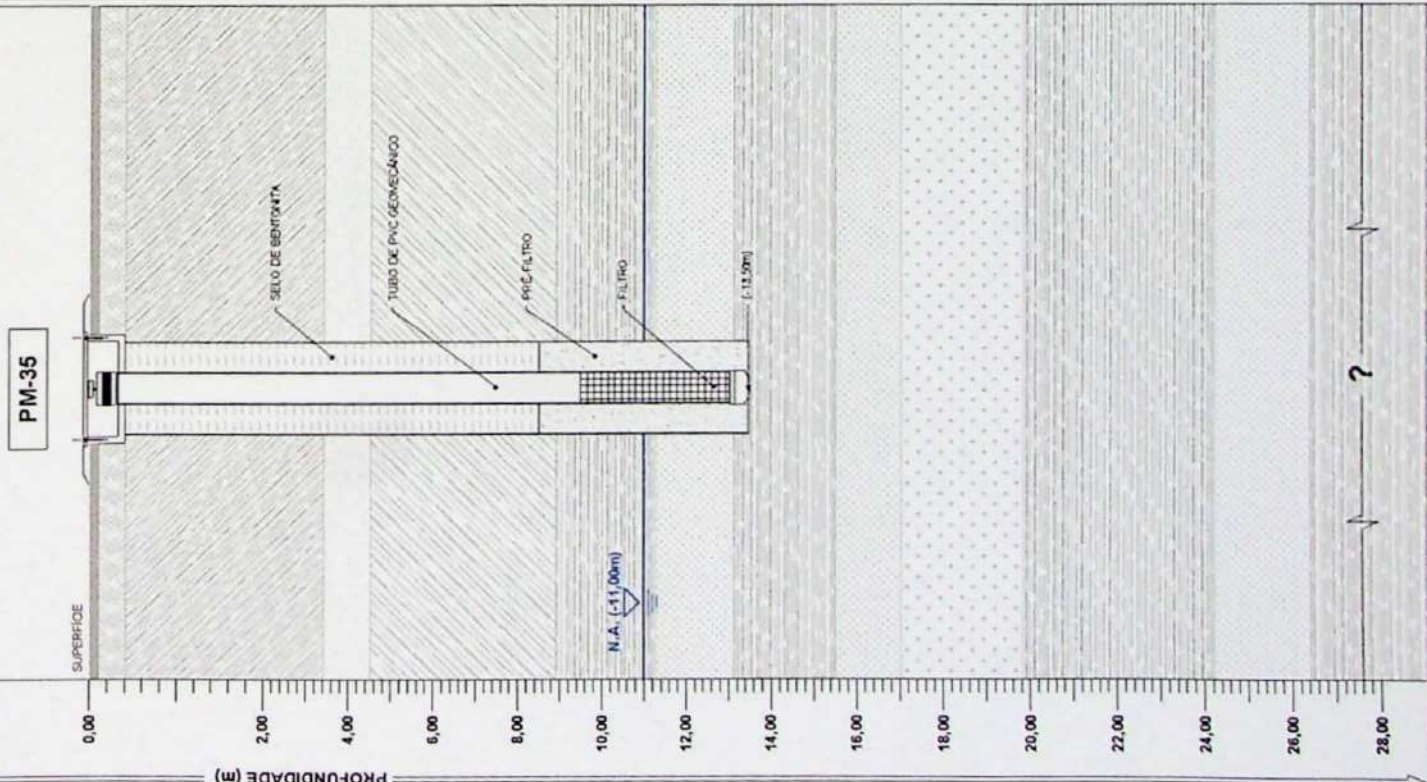
PM-34

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO DO POÇO 4" 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO HOLLOW STEM AUGER



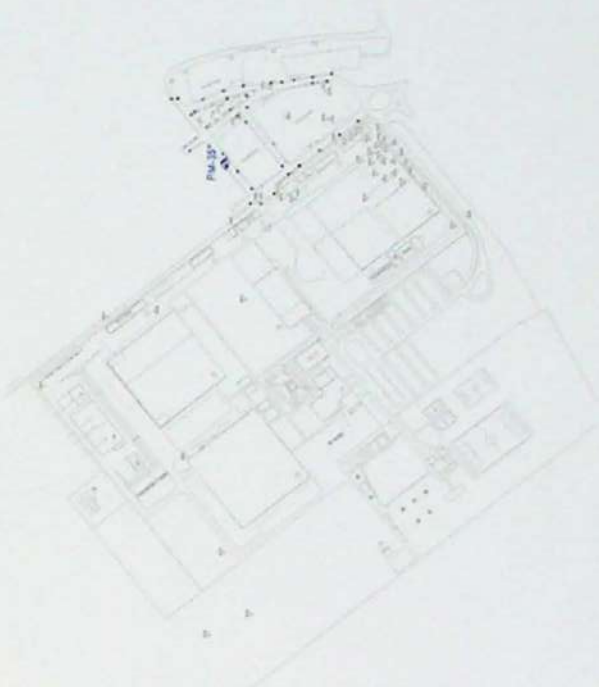
PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0,00 - 0,10m: Asfalto,
- . 0,10 - 0,40m: Aterro areno argiloso,
- . 0,40 - 3,40m: Argila siltosa marrom,
- . 3,40 - 4,50m: Areia grossa e cascalho,
- . 4,50 - 8,90m: Argila siltosa compacta de cor roxa marrom, amarela e cinza,
- . 8,90 - 11,25m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 11,25 - 13,10m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 13,10 - 15,50m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 15,50 - 17,00m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 17,00 - 19,80m: Areia média a grossa, friável, com arcósios,
- . 19,80 - 24,20m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 24,20 - 26,40m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 26,40 - 27,05m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEM ESCALA

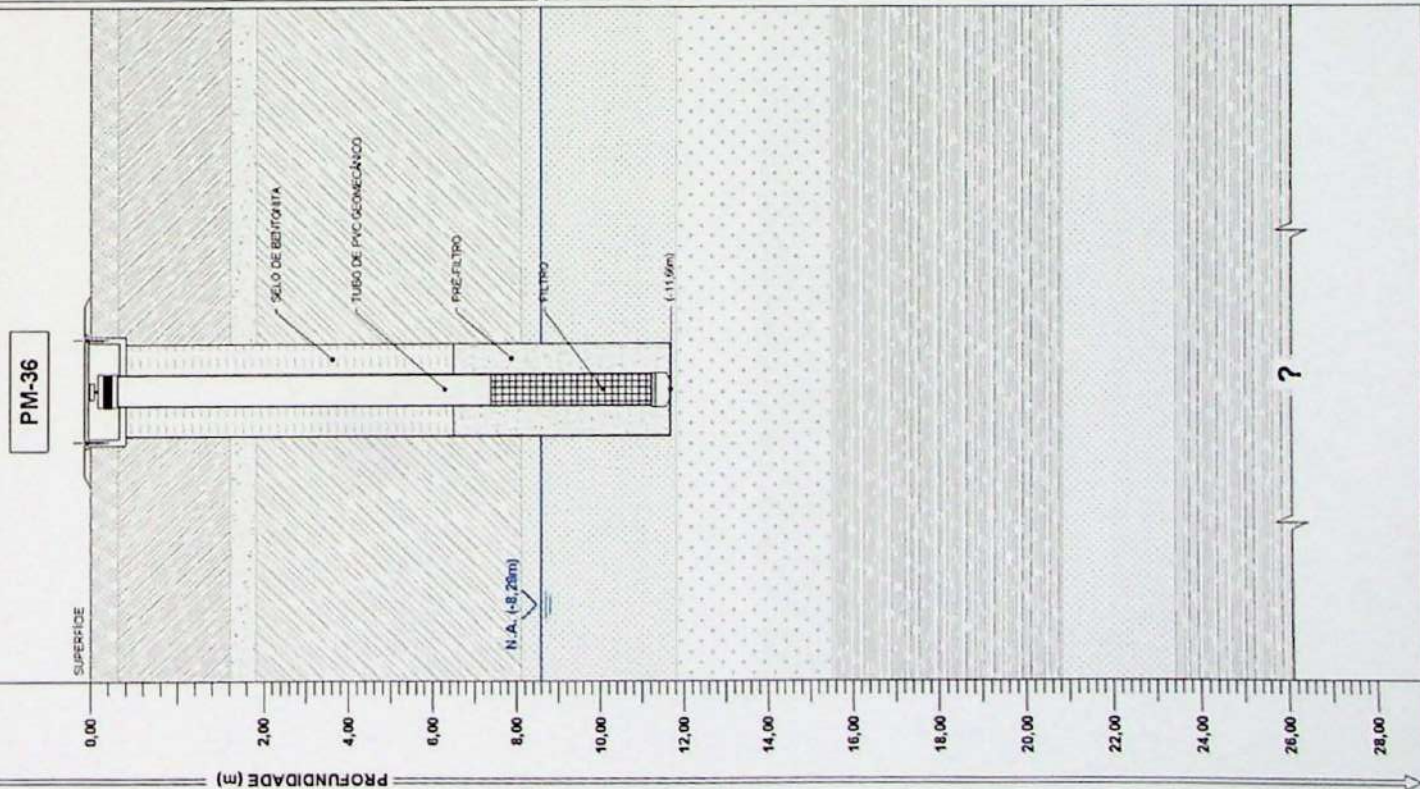
PM-35

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO 4" INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFORAÇÃO HOLLOW STEM AUGER



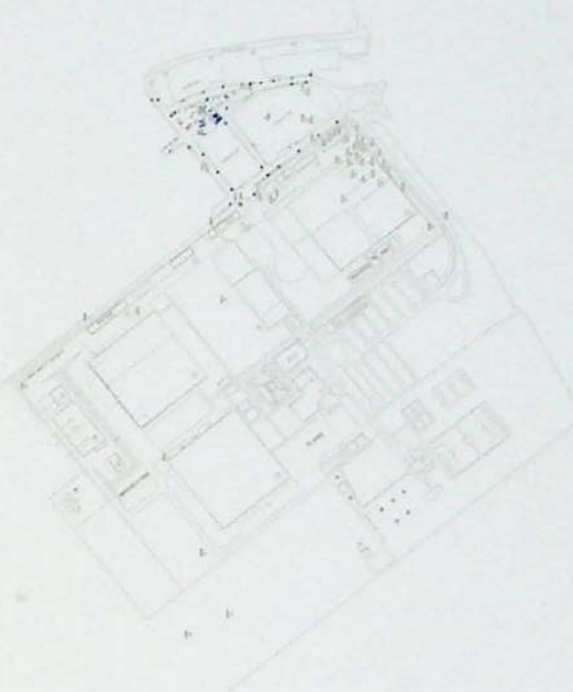
PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0,00 - 0,30m: Aterro areno argiloso,
- . 0,30 - 1,60m: Argila siltosa marrom,
- . 1,60 - 1,90m: Areia grossa e cascalho,
- . 1,90 - 8,10m: Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
- . 8,10 - 11,80m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 11,80 - 15,50m: Areia média a grossa, friável, com arcósios,
- . 15,50 - 20,80m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 20,80 - 23,40m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 23,40 - 25,00m: Argila siltosa compacta, de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEN ESCALA



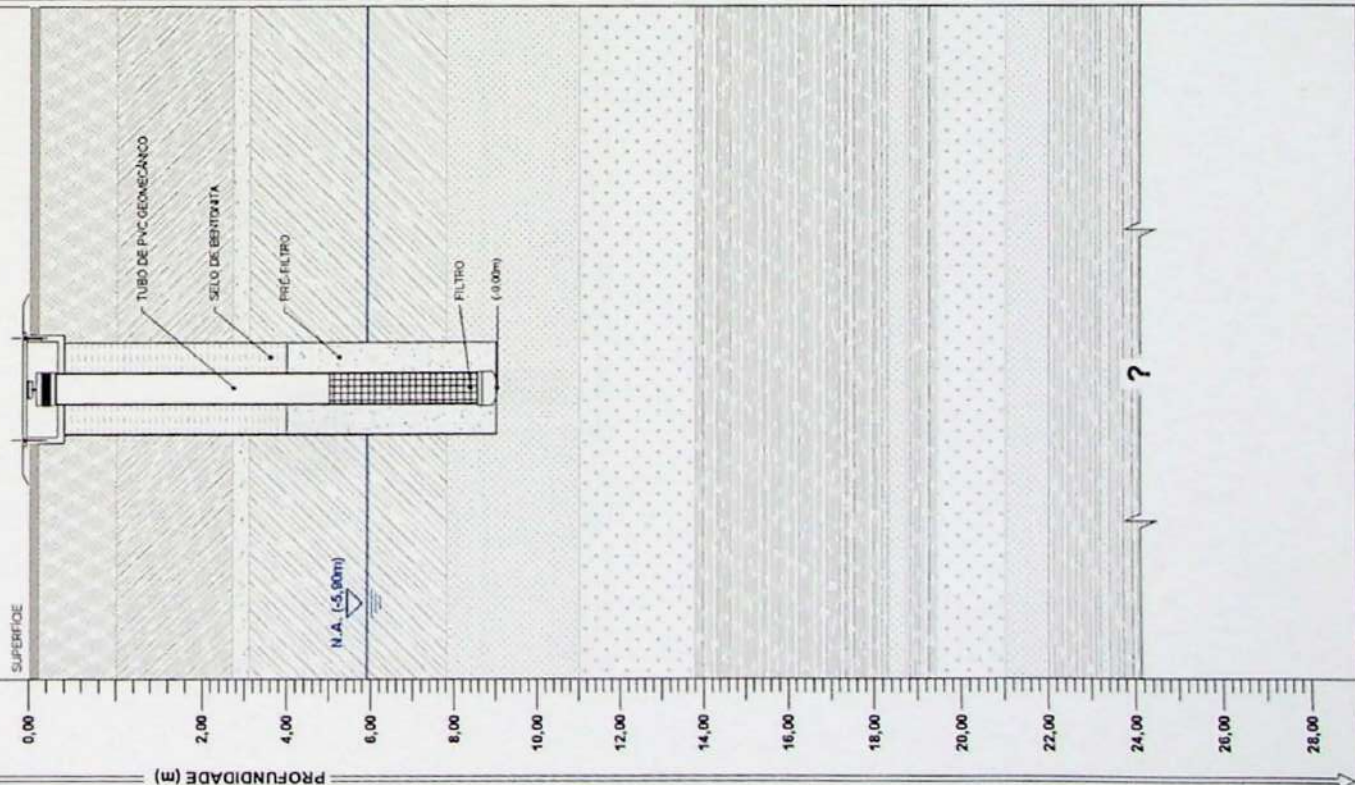
PM-36

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

PERFURÇÃO	INSTALAÇÃO	MÉTODO DE PERFURAÇÃO
4"	2"	HOLLOW STEM AUGER

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

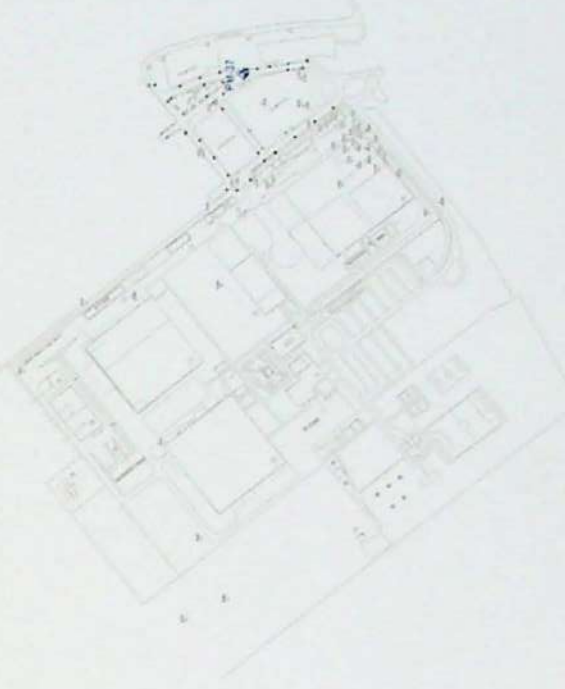
PM-37



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0,00 - 0,10m: Asfalto,
- . 0,10 - 1,00m: Alamo areno argiloso,
- . 1,00 - 2,70m: Argila silteosa marrom,
- . 2,70 - 3,10m: Areia grossa e cascalho,
- . 3,10 - 7,80m: Argila silteosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
- . 7,80 - 11,00m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 11,00 - 13,80m: Areia média a grossa, friável, com arcóssios,
- . 13,80 - 18,30m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 18,30 - 18,70m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 18,70 - 19,40m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 19,40 - 21,00m: Areia média a grossa, friável, com arcóssios,
- . 21,00 - 22,00m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 22,00 - 23,20m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 23,20 - 23,40m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 23,40 - 23,60m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEN ESCALA

PM-37

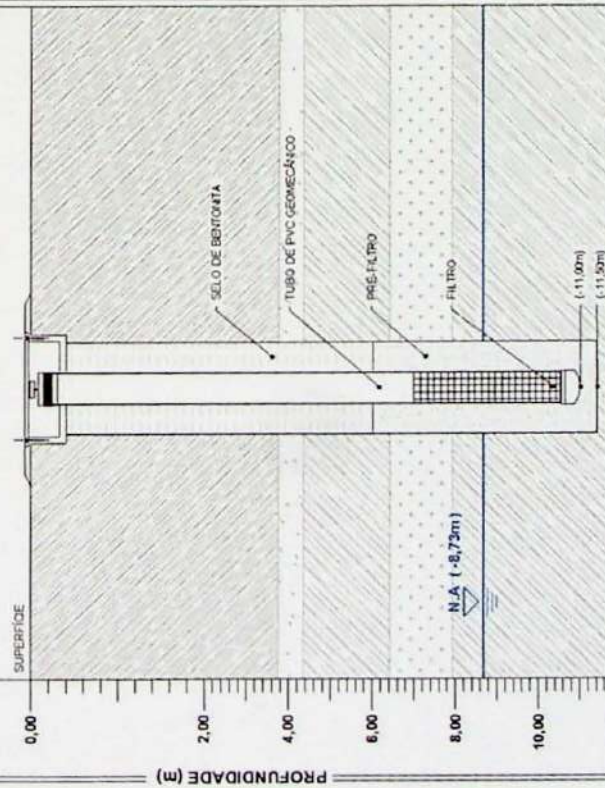
TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO DO POÇO 4" MÉTODO DE PERFURAÇÃO 2" HOLLOW STEM AUGER



PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

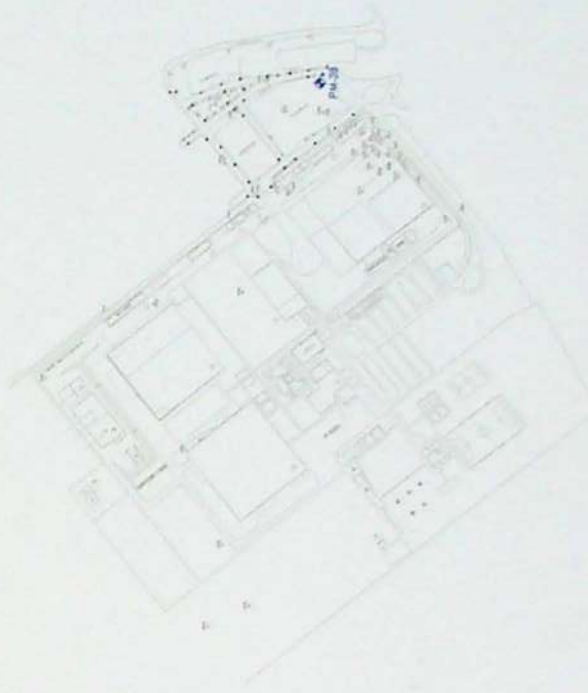
PM-38



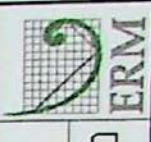
DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- 0,00 - 3,75m: Argila Siltosa Marrom,
- 3,75 - 4,35m: Argila grossa e cascalho,
- 4,35 - 6,40m: Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
- 6,40 - 7,90m: Areia média a grossa, friável, com arcósios,
- 7,90 - 11,70m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



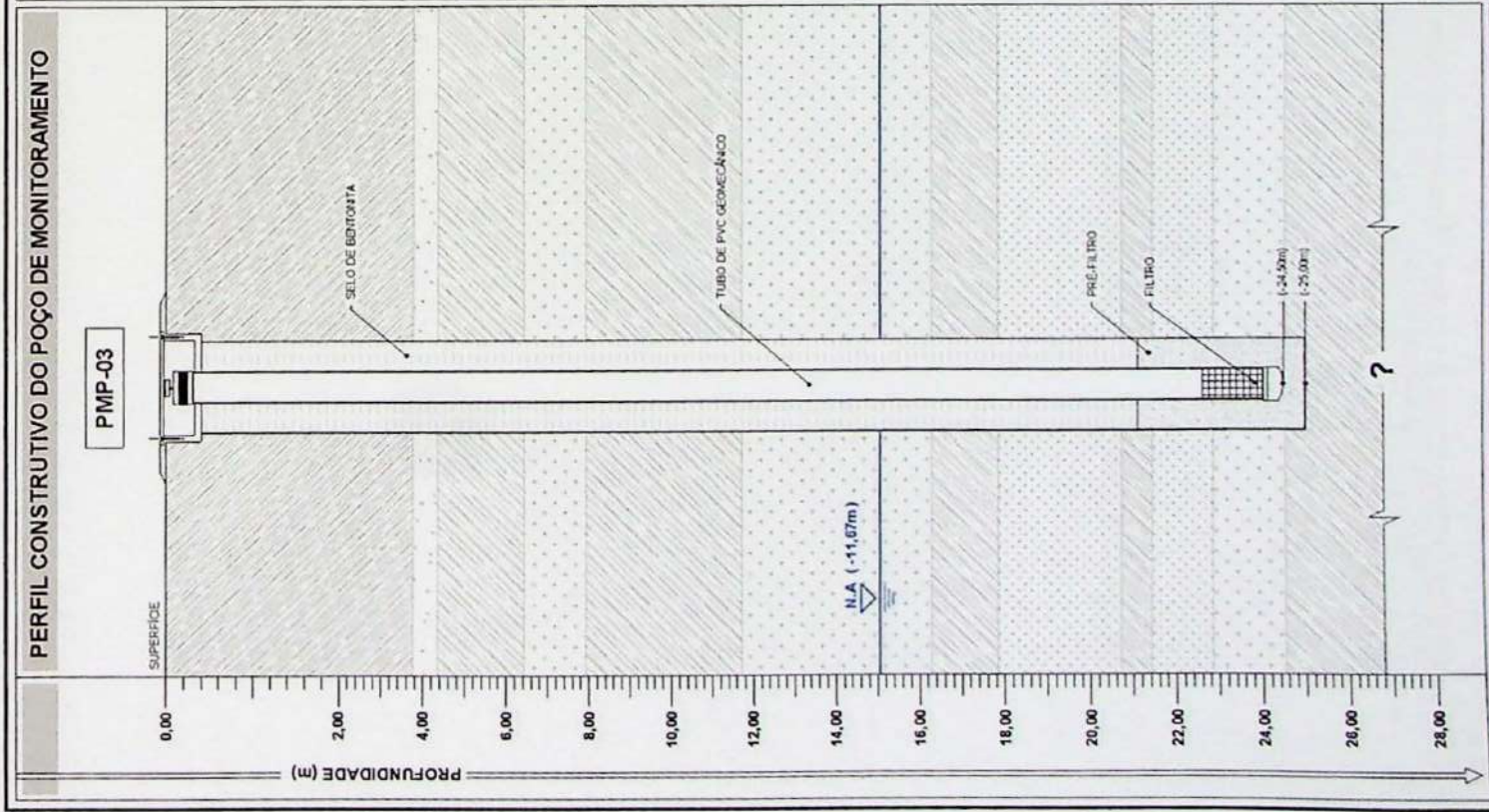
SEMI ESCALA



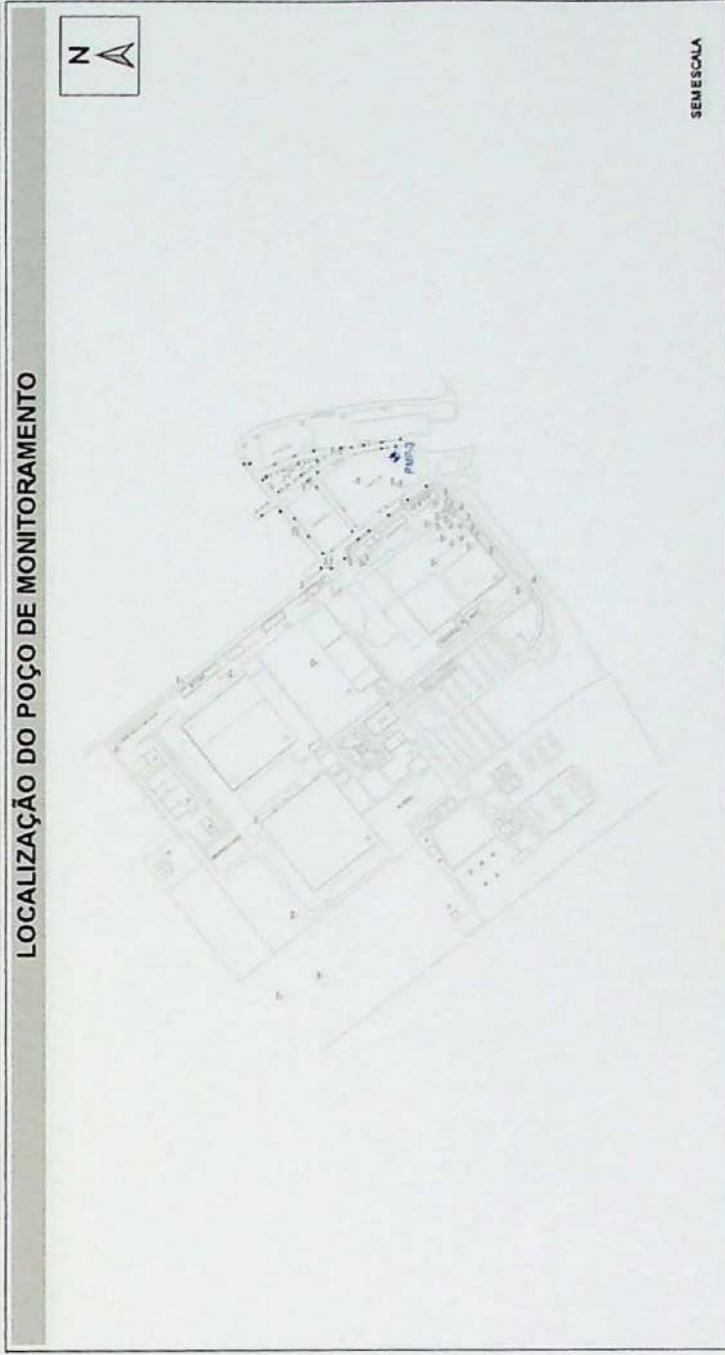
PM-38

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

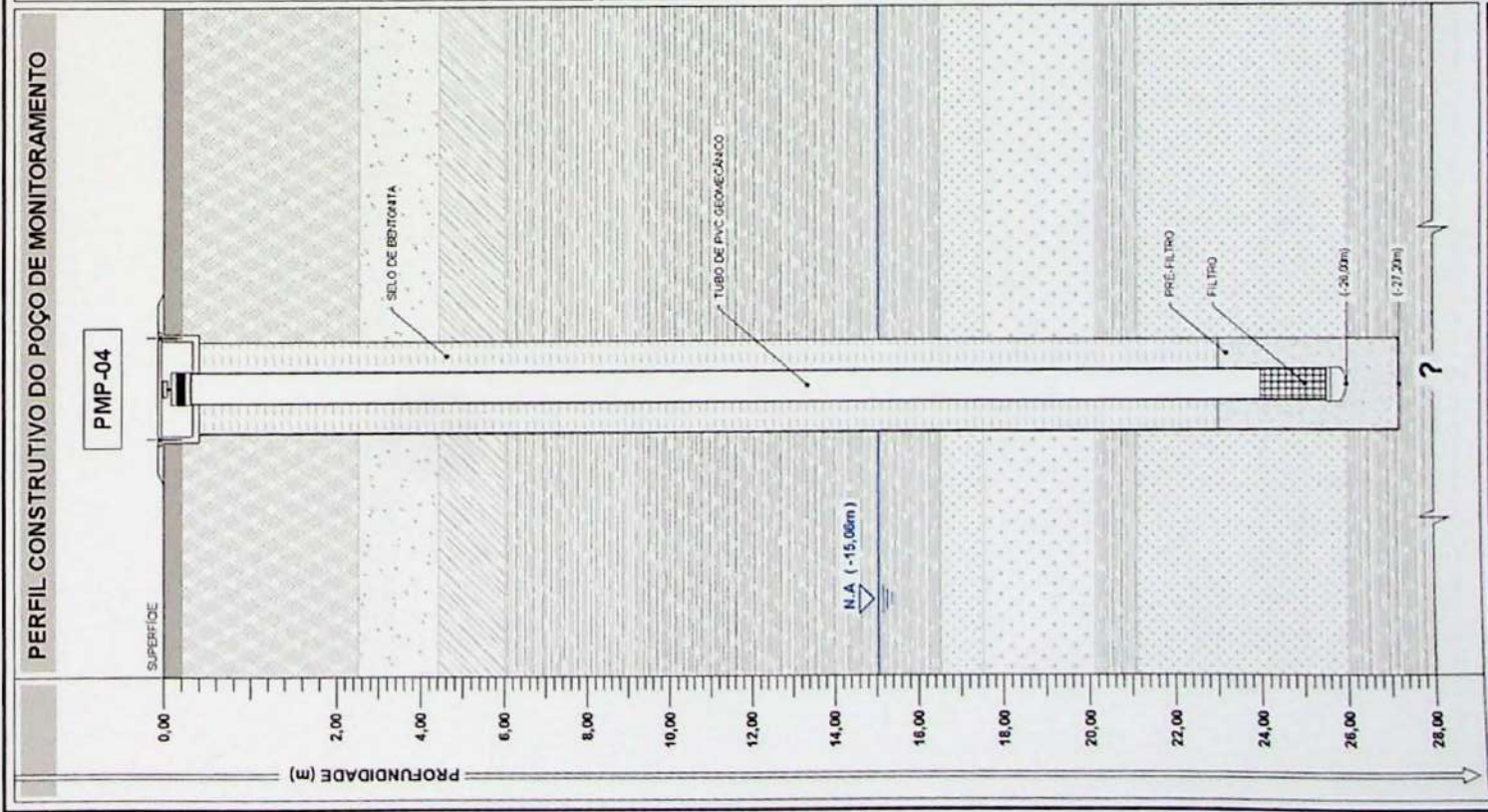
DI. PERFURAÇÃO	DI. INSTALAÇÃO	METODO DE PERFURAÇÃO
4"	2"	TRADO MANUAL



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)	
0,00 - 3,75m:	Argila Siltosa Marrom,
3,75 - 4,35m:	Argila grossa e cascalho,
4,35 - 6,40m:	Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
6,40 - 7,90m:	Areia média a grossa, friável, com arcósios,
7,90 - 11,70m:	Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
11,70 - 16,30m:	Areia média a grossa, friável, com arcósios,
16,30 - 17,80m:	Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
17,80 - 20,70m:	Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
20,70 - 21,40m:	Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
21,40 - 22,80m:	Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
22,80 - 24,50m:	Areia média a grossa, friável com arcósios,
24,50 - 25,00m:	Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,



PMP-03	
TRABALHO DE FORMATURA Instituto de Geociências	
DIÁMETRO DO POÇO	4"
DIÁMETRO DA INSTALAÇÃO	2"
MÉTODO DE PERFURAÇÃO	HOLLOW STEM AUGER



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

0,00 - 0,20m:	Asfalto,
0,20 - 2,50m:	Aterro areno argiloso,
2,50 - 4,40m:	Areia grossa e cascalho,
4,40 - 6,00m:	Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
6,00 - 16,50m:	Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
16,50 - 17,50m:	Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
17,50 - 20,10m:	Areia média a grossa, friável, com arcósios,
20,10 - 21,10m:	Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
21,10 - 26,00m:	Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
26,00 - 27,20m:	Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,



PMP-04

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

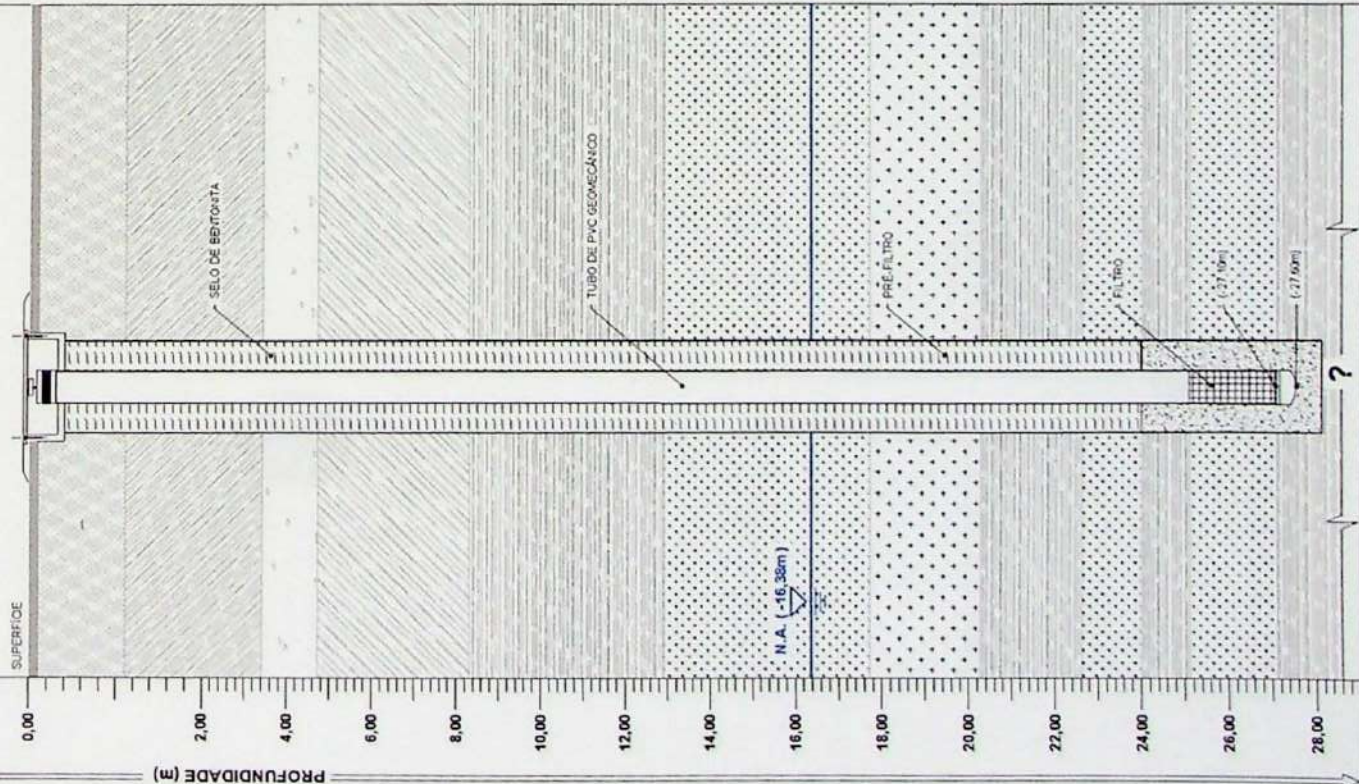
USP

ERM

DIÂMETRO	4"
INSTALAÇÃO	2"
MÉTODO DE PERFURAÇÃO	HOLLOW STEM AUGER

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

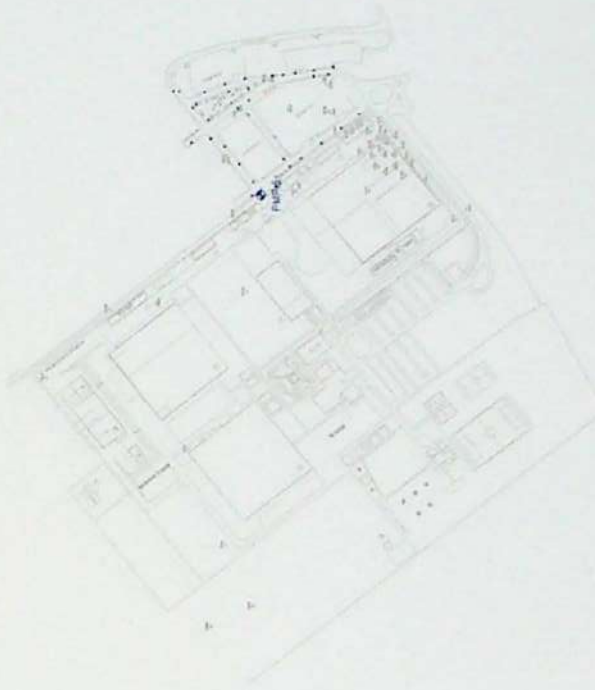
PMP-05



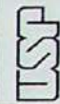
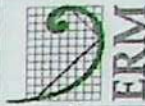
DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0,00 - 0,10m: Asfalto,
- . 0,10 - 1,10m: Aterro areno argiloso,
- . 1,10 - 3,40m: Argila siltosa marrom,
- . 3,40 - 4,70m: Areia grossa e cascalho,
- . 4,70 - 8,30m: Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
- . 8,30 - 12,90m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 12,90 - 17,70m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 17,70 - 20,25m: Areia média a grossa, friável com arcósios,
- . 20,25 - 22,60m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 22,60 - 24,00m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 24,00 - 25,10m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 25,10 - 27,10m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 27,10 - 28,15m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEM ESCALA



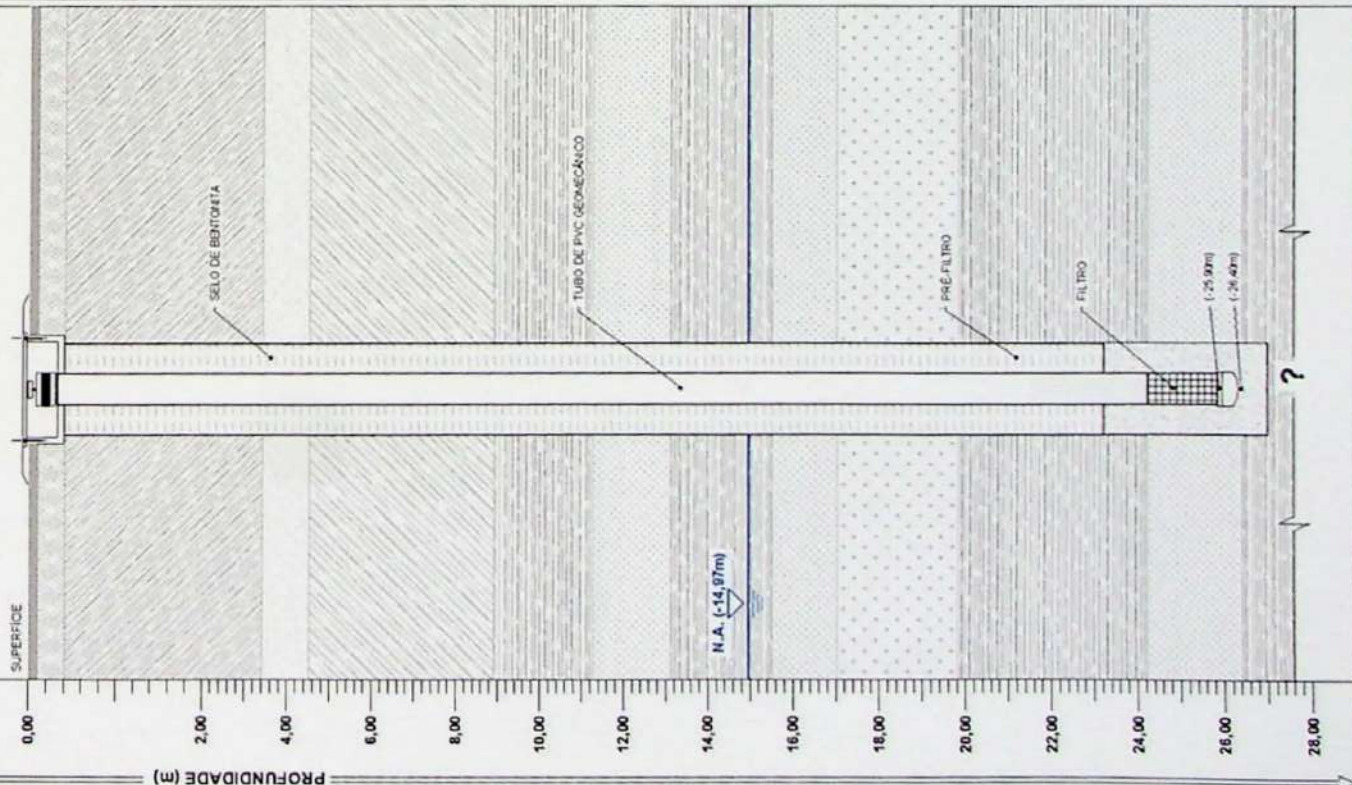
PMP-05

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO DE PERFURAÇÃO 4" MÉTODO DE PERFURAÇÃO 2" HOLLOW STEM AUGER

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

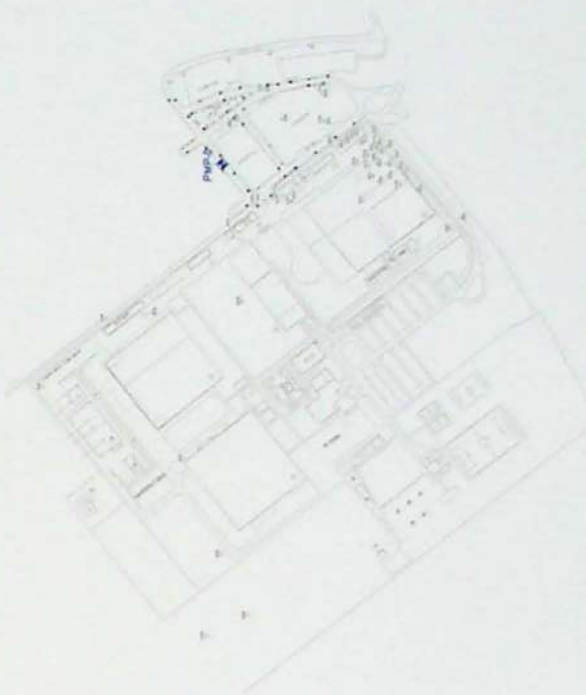
PMP-06



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- 0,00 - 0,10m: Asfalto,
- 0,10 - 0,40m: Aterro areno argiloso,
- 0,40 - 3,40m: Argila siltosa marrom,
- 3,40 - 4,50m: Areia grossa e cascalho,
- 4,50 - 8,90m: Argila siltosa compacta de cor roxa marrom, amarela e cinza,
- 8,90 - 11,25m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- 11,25 - 13,10m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- 13,10 - 15,50m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- 15,50 - 17,00m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- 17,00 - 19,80m: Areia média a grossa, frável, com arcósios,
- 19,80 - 24,20m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- 24,20 - 26,40m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- 26,40 - 27,05m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO

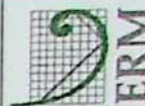


SEN ESCALA

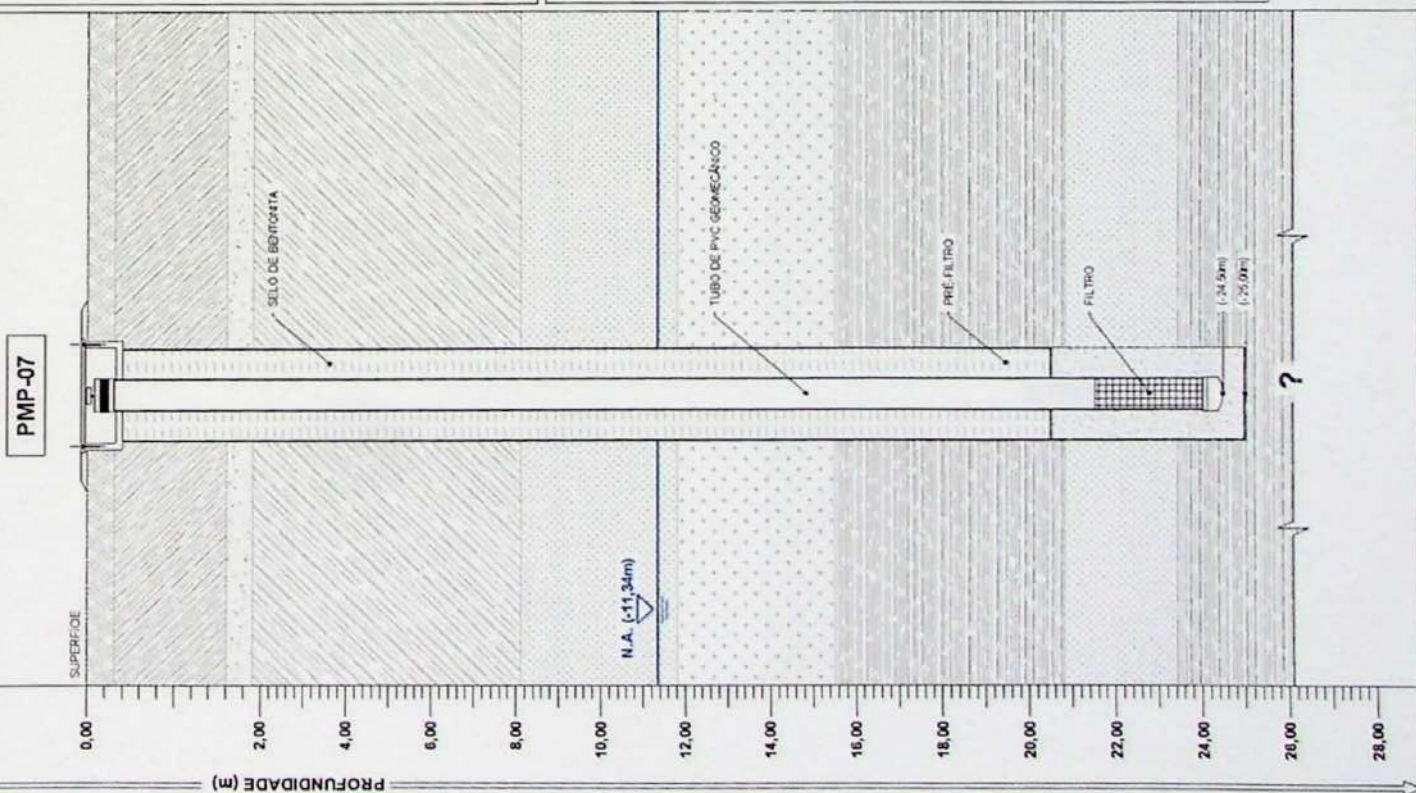
4"	2"	METODO DE PERFORAÇÃO HOLLOW STEM AUGER
----	----	---

PMP-06

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências



PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



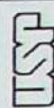
DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0,00 - 0,30m: Aterro areno argiloso,
- . 0,30 - 1,60m: Argila siltosa marrom,
- . 1,60 - 1,90m: Areia grossa e cascalho,
- . 1,90 - 8,10m: Argila siltosa compacta de cor roxa, marrom , amarela e cinza,
- . 8,10 - 11,80m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 11,80 - 15,50m: Areia média a grossa, friável, com arcósios,
- . 15,50 - 20,80m: Argila siltosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 20,80 - 23,40m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 23,40 - 25,00m: Argila siltosa compacta, de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEM ESCALA



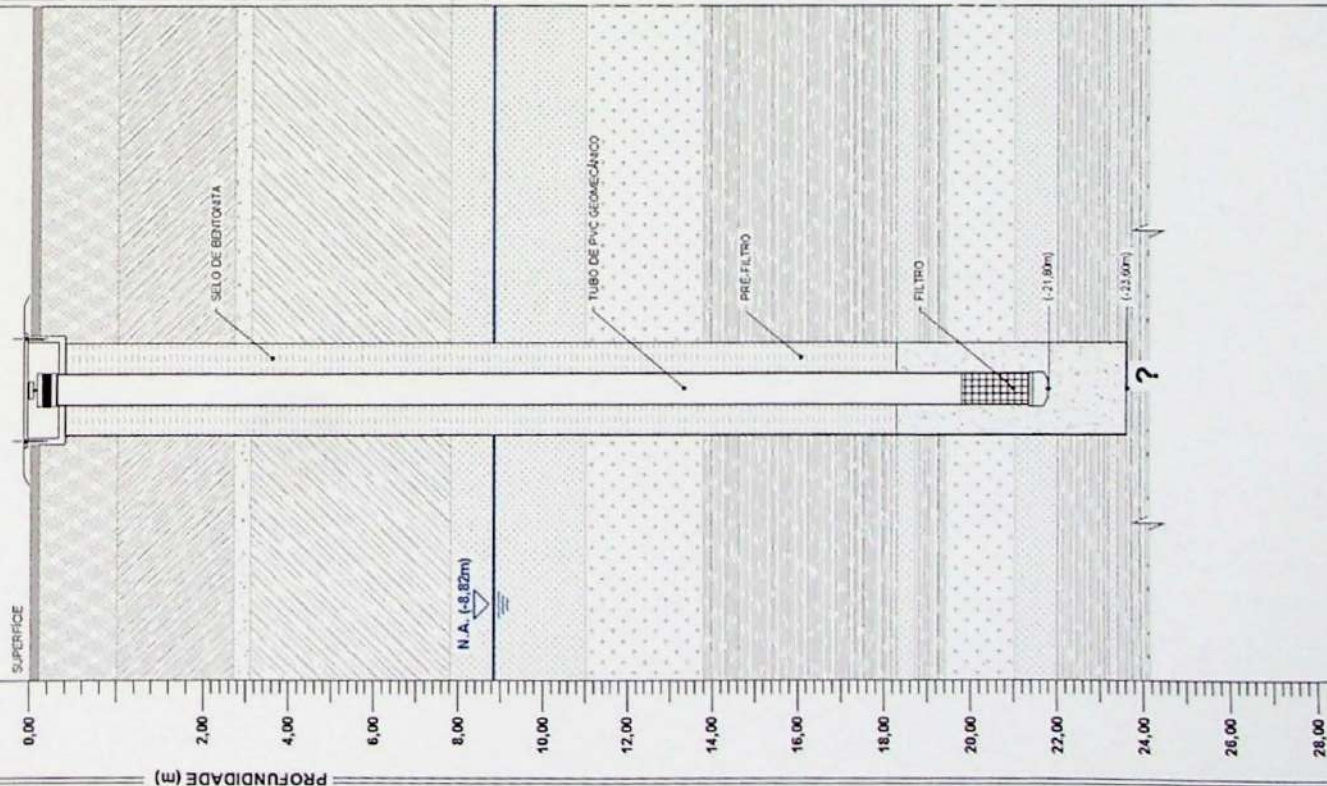
PMP-07

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

DIÂMETRO DE PERFURAÇÃO	DIÂMETRO DE INSTALAÇÃO	MÉTODO DE PERFURAÇÃO
4"	2"	HOLLOW STEM AUGER

PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO

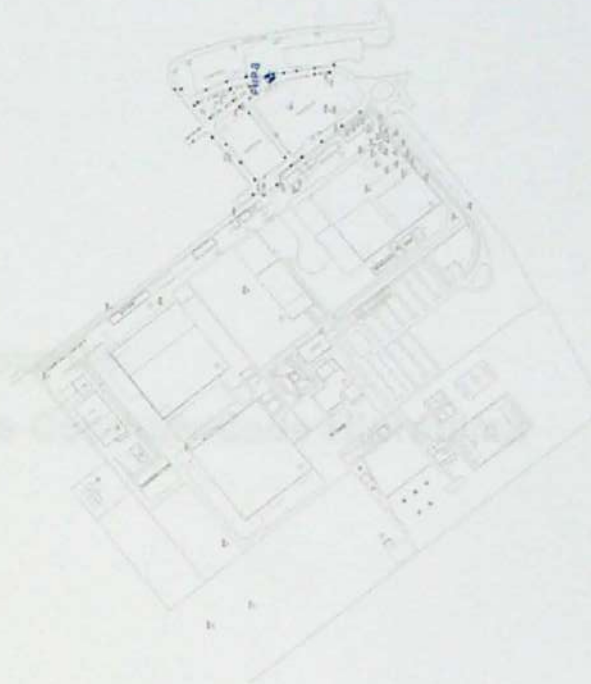
PMP-08



DESCRIÇÃO / CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (COR, TEXTURA, ESTRUTURA)

- . 0,00 - 0,10m: Asfalto,
- . 0,10 - 1,00m: Alamo areno argiloso,
- . 1,00 - 2,70m: Argila silteosa marrom,
- . 2,70 - 3,10m: Areia grossa e cascalho,
- . 3,10 - 7,80m: Argila silteosa compacta de cor roxa, marrom, amarela e cinza,
- . 7,80 - 11,00m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 11,00 - 13,80m: Areia média a grossa, friável, com arcóssios,
- . 13,80 - 18,30m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 18,30 - 18,70m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 18,70 - 19,40m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 19,40 - 21,00m: Areia média a grossa, friável, com arcóssios,
- . 21,00 - 22,00m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 22,00 - 23,20m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,
- . 23,20 - 23,40m: Areia fina argilosa compacta de cor cinza,
- . 23,40 - 23,60m: Argila silteosa compacta de cor cinza esverdeada,

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO



SEM ESCALA

PMP-08

TRABALHO DE FORMATURA
Instituto de Geociências

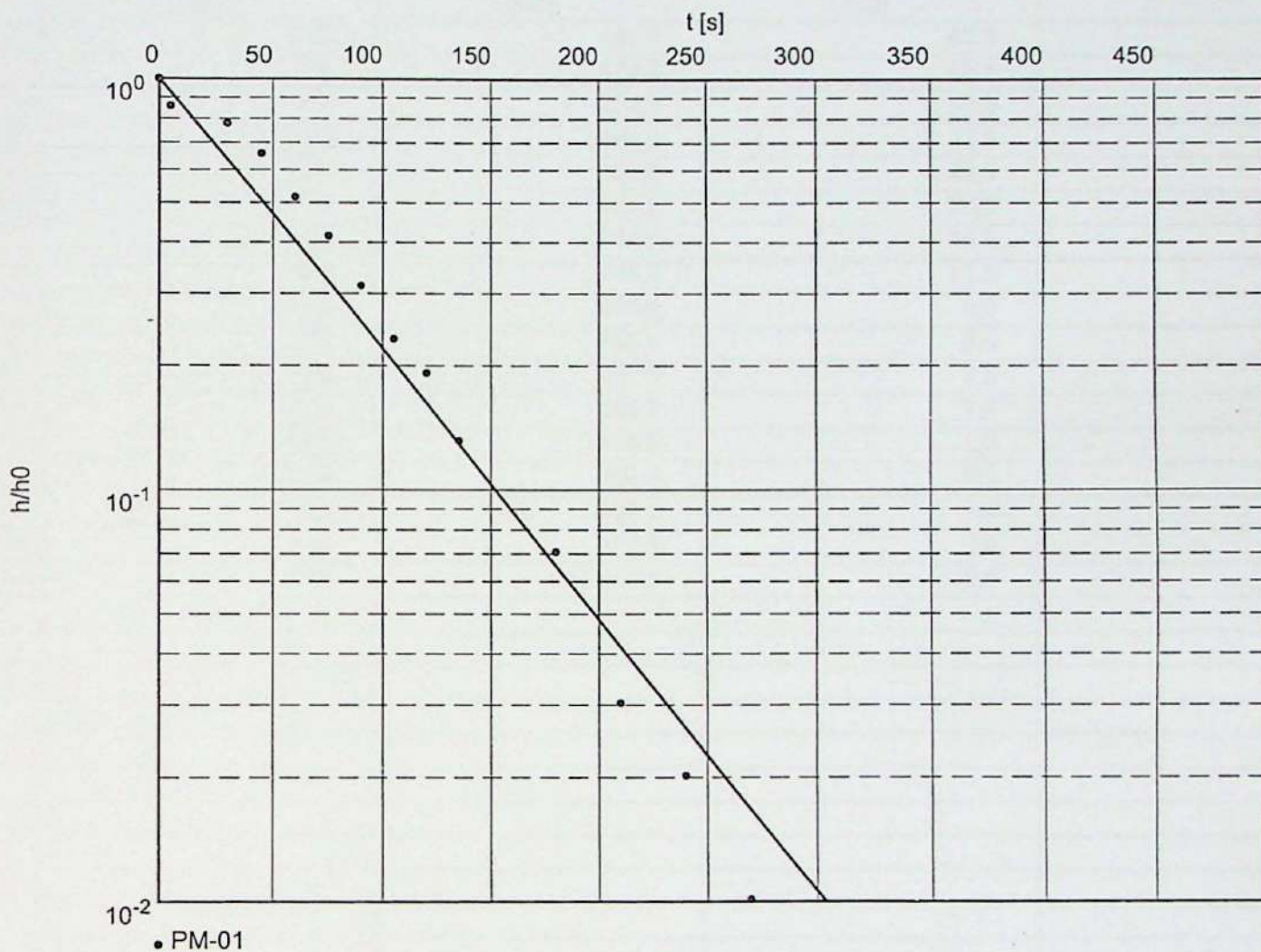
DIAMETRO 4" INSTALAÇÃO 2" MÉTODO DE PERFURAÇÃO HOLLOW STEM AUGER



Anexo 04

Planilhas dos Ensaios de Condutividade Hidráulica

ERM Brasil Ltda. USP - Instituto de Geociências	slug/bail test analysis BOUWER-RICE's method	Date: 17.03.2003	Page 1
		Project: Trabalho de Formatura	
		Evaluated by: Pedro H. A. Corrêa	
Slug Test No.		Test conducted on: 27/02/03	
PM-01			



Hydraulic conductivity [cm/s]: $1,38 \times 10^{-3}$

Test conducted on: 27/02/03

PM-01

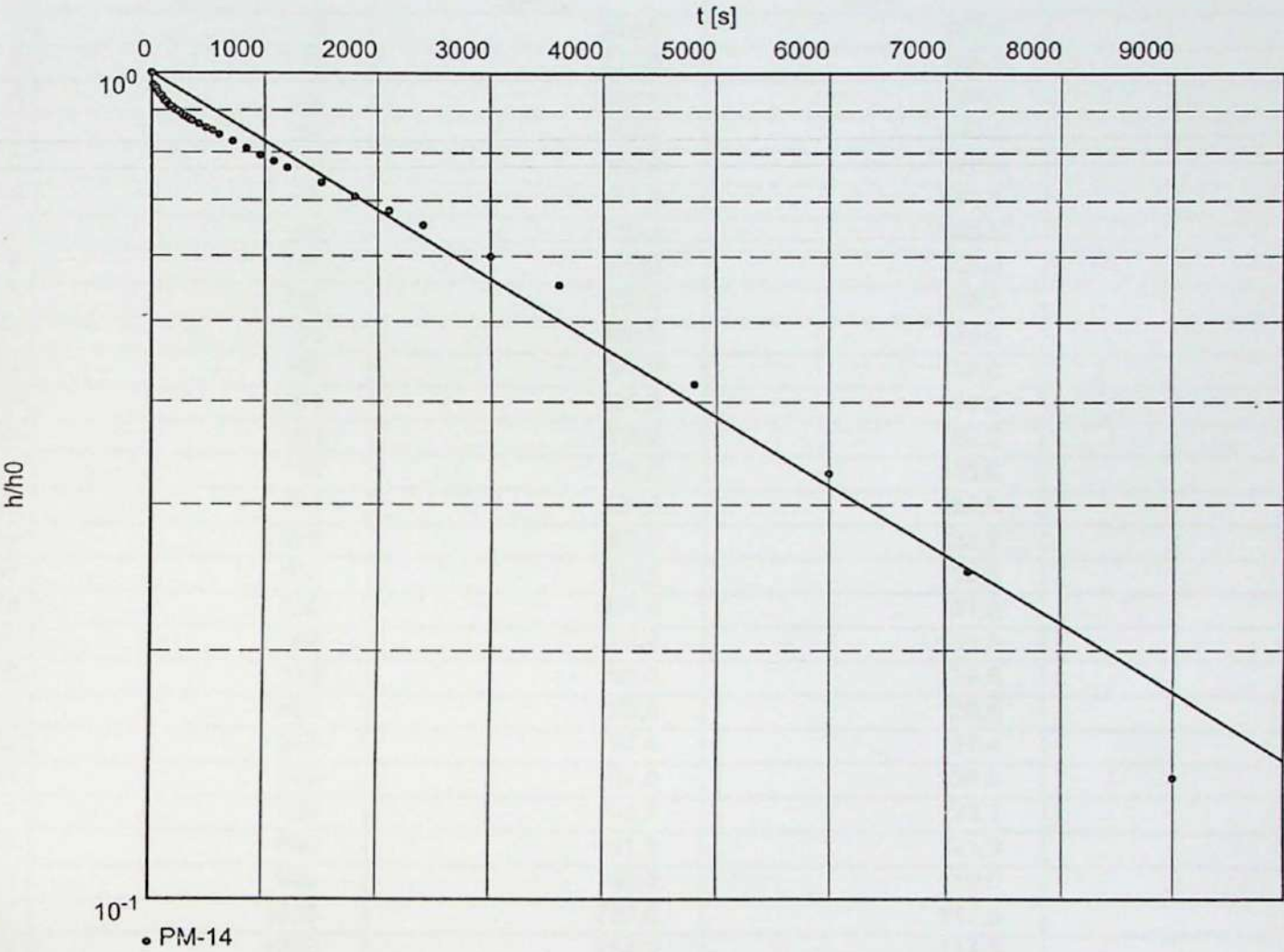
Static water level: 433,5 cm below datum

[illegible]

Slug Test No.

Test conducted on: 27/02/03

PM-14



Hydraulic conductivity [cm/s]: $1,42 \times 10^{-5}$

Slug Test No.

Test conducted on: 27/02/03

PM-14

PM-14

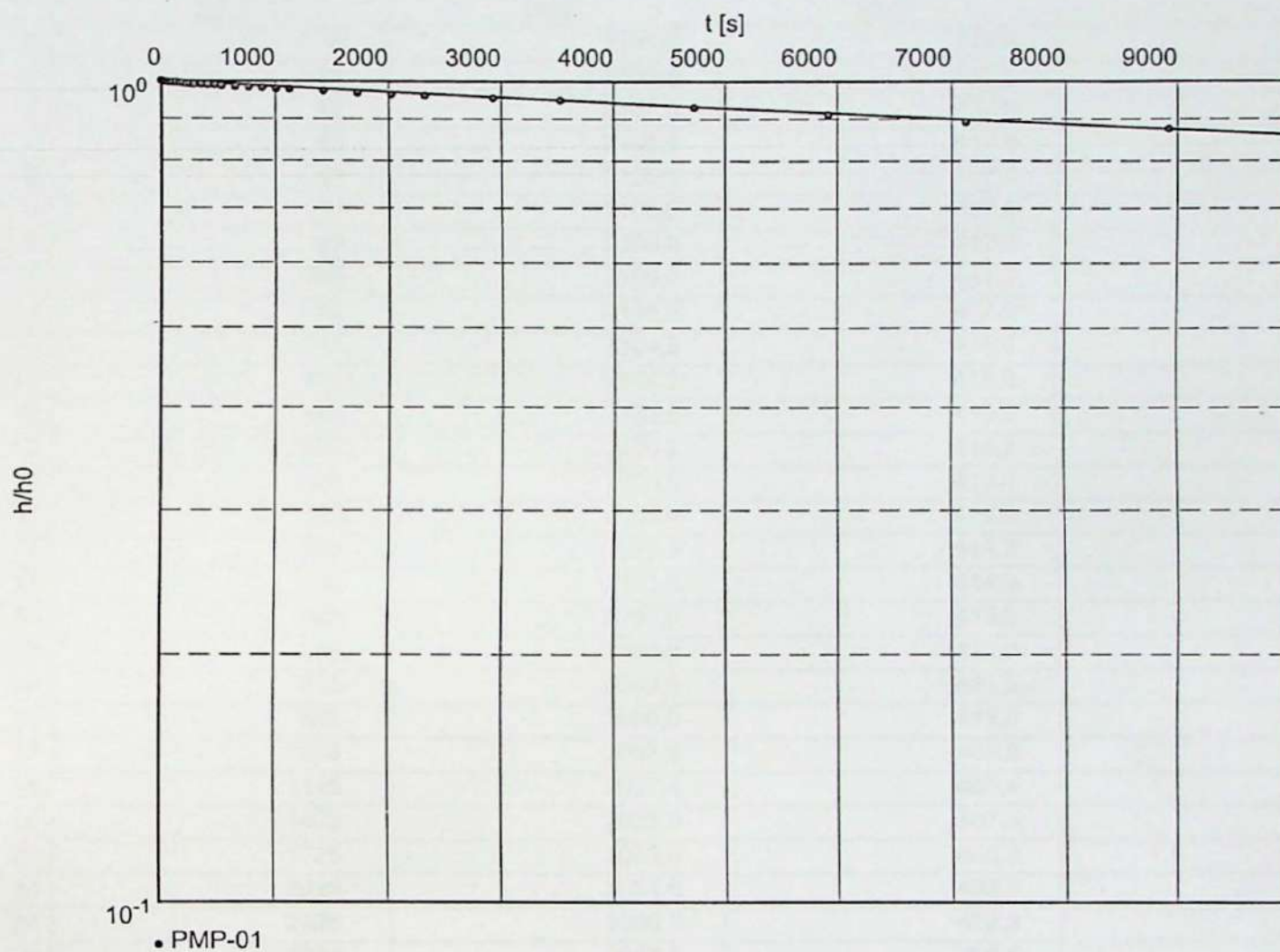
Static water level: 670,0 cm below datum

[illegible]

Slug Test No.

Test conducted on: 27/02/03

PMP-01



Hydraulic conductivity [cm/s]: $4,26 \times 10^{-7}$



... e isso é tudo pessoal!!!

