

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE AIR SPARGING PARA  
A REMEDIAÇÃO DE PLUMAS DE COMPOSTOS  
ORGÂNICOS: CONCEITOS E APLICAÇÕES**

Thiago Araújo

Orientador: Prof. Dr. Uriel Duarte  
Co-Orientador: Martim Afonso de Sousa

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2005/33)

SÃO PAULO  
2005



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900018064

**Utilização de Sistemas Air Sparging para a  
Remediação de Compostos Orgânicos: Conceitos  
e Aplicações**

**Thiago Araújo**



Monografia de Trabalho de Formatura

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Uriel Duarte

Prof. Dr. Reginaldo Bertolo

Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

São Paulo

2005



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE AIR SPARGING PARA  
A REMEDIAÇÃO DE PLUMAS DE COMPOSTOS  
ORGÂNICOS: CONCEITOS E APLICAÇÕES**

THIAGO ARAÚJO

TRABALHO DE FORMATURA  
TF nº 2005/33



Thiago Araújo

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Thiago Araújo', written over a horizontal line.

Dr. Uriel Duarte

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Uriel Duarte', written over a horizontal line.

Martim Afonso de Souza  
CREA 5060377792/D

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Martim Afonso de Souza', written over a horizontal line.

SÃO PAULO  
2005



TF  
AGG3  
T.u

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE AER SPRAYING PARA  
A REMEDIÇÃO DE PLUMAS DE COMPOSTOS  
ORGÂNICOS: CONCEITOS E APLICAÇÕES

TRABALHO AVANÇADO



TRABALHO DE FOMATURA  
11.01.2003

*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*

Thiago Araújo

Dr. Vinícius Duarte

Maria Aparecida Souza  
CRF 1000000000

SÃO PAULO  
2003



## AGRADECIMENTOS

Às Pais, Dr. 1988 Duane por sua orientação durante a elaboração deste trabalho.

À meu Coordenador, Márcio Almeida da Silva, pela orientação segura e correta e por todo conhecimento que pude adquirir sobre o tema.

A todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica.

A empresa C&O-GRUPO, por permitir um meio de trabalho profissional e por ceder dados para este trabalho.

À Curso de Graduação no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo por toda sua infra-estrutura oferecida à disposição.

A minha família pelo apoio incondicional durante todos estes anos de graduação.

A minha amada Lúcia por estar sempre ao meu lado, suportando meus caprichos e me motivar que nenhum sonho é impossível, basta acreditar no ele.

A todos amigos e amigas que adquiri nestes anos e que fazem parte da minha vida.

**À minha família e a todos aqueles que contribuíram para que um garoto pudesse se tornar um homem.**

E, por fim, a todos os colegas que estão ao meu lado e que contribuíram de alguma maneira para que este trabalho pudesse ser concluído.



## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Uriel Duarte por sua orientação durante a elaboração deste trabalho;

Ao meu Co-orientador Martim Afonso de Souza pela orientação segura e correta e por todo conhecimento que pude adquirir junto a sua pessoa;

A todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica;

À empresa CSD-GEOKLOCK por acreditar em mim como profissional e por ceder dados para este trabalho;

Ao Curso de Graduação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo por toda sua infra-estrutura colocada à disposição;

A minha família pelo apoio incondicional durante todos estes anos de graduação;

A minha amada Letícia por estar sempre do meu lado, incentivar meus estudos e me mostrar que nenhum sonho é impossível, basta lutarmos por ele;

A todos amigos e amigas que adquiri nestes anos e que levarei comigo para sempre;

E, por fim a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma maneira para que este trabalho pudesse ser realizado.



## RELAÇÃO DE FIGURAS

FIGURA 6. RELAÇÃO ENTRE A PERMEABILIDADE E A EFICIÊNCIA DO SISTEMA.

FIGURA 7.1. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO ONDE OCORREU A INFILTRAÇÃO DE FASE LIVRE.

FIGURA 7.2.1. ARRANJO FÍSICO E DISPOSIÇÃO GERAL DAS CONSTRUÇÕES NOS ARREDORES DO POSTO ALFA.

FIGURA 7.2.3. MAPA GEOLÓGICO REGIONAL.

FIGURA 7.2.3.1. MAPA POTENCIOMÉTRICO GERADO NA INVESTIGAÇÃO INICIAL.

FIGURA 7.2.5.2. MAPA DE INDÍCIOS DE PRODUTO NO SOLO.

FIGURA 7.2.5.3. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS DE RECONHECIMENTO.

FIGURA 7.2.6.1. PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO E BOMBEAMENTO.

FIGURA 7.2.6.2. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO.

FIGURA 7.2.6.3. SEÇÃO HIDROGEOLÓGICA A – A'.

FIGURA 7.2.6.4. PLUMA DE BENZENO MEDIDA NA CAMPANHA INICIAL.

FIGURA 7.3. PLUMA DE BENZENO ANTES DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO.

FIGURA 7.3.b. MAPA POTENCIOMÉTRICO ANTES DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO.

FIGURA 7.3.1. CURVA DE PRESSÃO MÁXIMA DE AIR SPARGING.

FIGURA 7.3.2. PERFIS LITOLÓGICOS E CONTRUTIVOS DOS POÇOS DE AS E EVS INSTALADOS.

FIGURA 7.3.1.1. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS/POÇOS DO ENSAIO PILOTO.

FIGURA 7.3.1.1.B. ARRANJO FÍSICO DOS POÇOS UTILIZADOS NO ENSAIO.



FIGURA 7.3.1.2. PERFIS LITOLÓGICOS DAS SONDAGENS DE RECONHECIMENTO E PERFIS CONSTRUTIVOS DOS POÇOS INSTALADOS DURANTE O ENSIO PILOTO.

FIGURA 7.3.1.3. SEÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DA ÁREA DO ENSAIO.

FIGURA 7.3.1.4. PERFIL VERTICAL DE DISTRIBUIÇÃO DOS COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS.

FIGURA 7.3.1.5. FLUXOGRAMA BÁSICO DO SISTEMA PILOTO.

FIGURA 7.3.1.6. VARIAÇÃO DA PRESSÃO E FLUXO DE INJEÇÃO DE AR.

FIGURA 7.3.1.7. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA DISPERSÃO DE PRESSÃO – HORIZONTE RASO.

FIGURA 7.3.1.8. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA DISPERSÃO DA PRESSÃO – HORIZONTE PROFUNDO.

FIGURA 7.3.1.9. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA ELEVAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA – HORIZONTE RASO.

FIGURA 7.3.1.10. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA ELEVAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA – HORIZONTE PROFUNDO.

FIGURA 7.3.1.11. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA LIBERAÇÃO DE OXIGÊNIO GASOSO NO WELL HEAD SPACE– HORIZONTE RASO.

FIGURA 7.3.1.12. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA LIBERAÇÃO DE OXIGÊNIO GASOSO NO WELL HEAD SPACE– HORIZONTE PROFUNDO.

FIGURA 7.3.1.13. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA ELEVAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO – HORIZONTE RASO.

FIGURA 7.3.1.14. PROJEÇÃO GRÁFICA DO RÁIO DE INFLUÊNCIA COM BASE NA ELEVAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO – HORIZONTE PROFUNDO.

FIGURA 7.3.1.15. VARIAÇÃO DO VÁCUO NOS POÇOS DE MONITORAMENTO.

FIGURA 7.3.1.16. PROJEÇÃO DO RÁIO DE INFLUÊNCIA – 40 cmca.



FIGURA 7.3.2.1. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS DE CIRCULAÇÃO DE VAPORES, POÇOS DE AIR SPARGING, POÇOS DE MONITORAMENTO DE VAPORES E UNIDADE DE CONTROLE OPERACIONAL.

FIGURA 7.3.3.1. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM.

FIGURA 7.3.2.2. ARRANJO FINAL DOS POÇOS DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO.

FIGURA 7.3.3.2. MASSA DE VOC REMOVIDA EM 5 MESES.

FIGURA 7.3.4.1. MASSA DE VOC REMOVIDA AO FIM DO SISTEMA.



## RELAÇÃO DE TABELAS

TABELA 6.1.1. CONSTANTES DA LEI DE HENRY

TABELA 7.2.3.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

TABELA 7.2.4. RESULTADOS DA ANÁLISE DE RISCO PARA SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA.

TABELA 7.2.5.1. RESULTADOS DE BEXE NA CAMPANHA INICIAL – SOLO.

TABELA 7.2.5.2. RESULTADOS DE PAH NA CAMPANHA INICIAL – SOLO

TABELA 7.2.6.1. MEDIÇÕES DE NÍVEL D'ÁGUA E ESPESSURA DE FASE LIVRE DURANTE A INVESTIGAÇÃO INICIAL.

TABELA 7.2.6.2. RESULTADOS DE BTXE NA INVESTIGAÇÃO INICIAL – ÁGUA SUBTERRÂNEA.

TABELA 7.2.6.3. RESULTADOS DE PAH NA INVESTIGAÇÃO INICIAL – ÁGUA SUBTERRÂNEA.

TABELA 7.3. RESULTADOS DE BTXE NA CAMPANHA DE MONITORAMENTO AO FINAL DA ETAPA DE BOMBEAMENTO – ÁGUA SUBTERRÂNEA.

TABELA 7.3.1. CÁLCULO DE PRESSÕES PARA AIR SPARGING.

TABELA 7.3.1.b. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO.

TABELA 7.3.1.1. MEDIÇÕES EFETUADAS NO ENSAIO PILOTO DE AIR SPARGING.

TABELA 7.3.1.2. MEDIÇÕES EFETUADAS NO ENSAIO PILOTO DE SVE

TABELA 7.3.2. LIMITES ESTABELECIDOS PELA ANÁLISE DE RISCO (RBSL) – RBCA.

TABELA 7.3.3. RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA ATÉ 5 MESES DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA – BTXE E TPH GRO.

TABELA 7.3.3.1. MONITORAMENTO DA SAÍDA DE GASES DURANTE 5 MESES DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.



TABELA 7.3.4.1. RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA ATÉ 7 MESES DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA – BTXE E TPH GRO.

TABELA 7.3.4.2. MONITORAMENTO DOS GASES DURANTE TODA OPERAÇÃO DO SISTEMA.

TABELA 7.3.4.3. RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DURANTE TODO O ANDAMENTO DO CASO – BTXE E TPH GRO.

TABELA 7.3.4.4. DADOS DAS AMOSTRAS DE SOLO E RESULTADOS ANALÍTICOS 10 MESES APÓS O DESLIGAMENTO DO SISTEMA.



## SIGLAS E ABREVIATURAS

**BAT** – BACIA ALTO TIETÊ

**BTEX** – BENZENO, TOLUENO, ETILBENZENO E XILENOS.

**EVS** – EXTRAÇÃO DE VAPORES DO SOLO

**PAH** – HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS

**RBSL** – RISK-BASED SCREENING LEVELS

**SVE** - SOIL VAPOR EXTRACTION

**SAC** – SISTEMA AQUÍFERO CRISTALINO

**SAS** – SISTEMA AQUÍFERO SEDIMENTAR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE *AIR SPARGING* PARA  
A REMEDIAÇÃO DE PLUMAS DE COMPOSTOS  
ORGÂNICOS: CONCEITOS E APLICAÇÕES**

THIAGO ARAÚJO

ORIENTADOR: PROF. DR. URIEL DUARTE

CO-ORIENTADOR: MARTIM AFONSO DE SOUSA

TRABALHO DE FORMATURA  
TF nº 2005/33

SÃO PAULO  
2005



## SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iii
Relação de Figuras.....	iv
Relação de Tabelas.....	vii
Siglas e Abreviaturas.....	ix
ABSTRACT.....	1
RESUMO.....	2
1 - INTRODUÇÃO.....	3
2 - OBJETIVOS.....	4
3 - JUSTIFICATIVA.....	5
4 - FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
5 - METODOLOGIA.....	7
6 - AIR SPARGING.....	7
6.1. Conceitos.....	10
6.1.1. Fatores associados à relação vapor/fase dissolvida.....	10
6.1.2. Fatores associados à Permeabilidade do solo.....	13
6.2. Mecanismos de remoção.....	15
6.2.1 <i>Air Stripping</i> .....	16
6.2.2. Volatilização induzida.....	16
6.2.3. Biodegradação.....	17
6.3. Aplicabilidade.....	18
6.4. Vantagens e desvantagens.....	19
7. ESTUDO DE CASO.....	20



7.1. Histórico .....	21
7.2. Avaliação Ambiental .....	22
7.2.1. Localização e caracterização do local .....	22
7.2.2. Motivação .....	23
7.2.3. Geologia e Hidrogeologia .....	24
7.2.3.1. Geologia e Hidrogeologia local .....	29
7.2.4. Análise de Risco .....	30
7.2.5. Contaminação no solo .....	31
7.2.6. Contaminação na água subterrânea .....	33
7.3. Sistema de remediação .....	34
7.3.1. Teste Piloto .....	35
7.3.1.1 Ensaio piloto de <i>Air Sparging</i> .....	39
7.3.1.2 Ensaio piloto de Extração de Vapores no Solo ( <i>SVE</i> ) .....	40
7.3.2. Sistema de Remediação .....	41
7.3.3. Monitoramento ambiental .....	43
7.3.4. Finalização do sistema .....	45
9. CONCLUSÃO .....	47
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49



## **Abstract**

This work shows conceptions and uses of the Air Sparging system to the correction of organic compounds. Conceptually, topics that dictate the efficiency and applicability of such system, the physical and chemist definition of the compounds of interest, the local geology and a physical and chemist list and description of the underground were broached. Some concepts about the utilization of the volatilization and microbiologic degradation as a mechanism of removal of the elements that are contaminated by the Sparging were analyzed.

This work besides intent this conceptual presentation shows a real case of using of this system monitored where it was utilized. With this it was intend to verify concretely the efficiency of this system and the advantages and disadvantages by using it.

The analyses of the case was compound of an investigation and implantation of one integrated system of air sparging and extraction of gas from the ground because of a realizing of a stream of organic compounds that has already reached an area out of the site .The monitoring covered topics as such test of the systems, utilization of injection pressure grafics, definition of the area of influence and final geometry of the system, operational and analytic monitoring during the functioning of the system, and the environmental assessment till the end of its activity.

The system was over after seven months operating being noticed that the concentrations were already under the expectation set to the area after five months functioning. One sample campaign was made at ten months after the end of the activeness of the system in order to verify its efficiency.



## RESUMO

O trabalho apresenta conceitos e a aplicação do sistema *Air Sparging* para a remediação de compostos orgânicos. Conceitualmente foram abordados tópicos que ditam sua eficiência e aplicabilidade como a caracterização física e química dos compostos de interesse e da geologia local e o detalhamento físico-químico do subsolo. Além deste foram discutidos alguns conceitos sobre a utilização não só da volatilização mas da degradação microbiológica como mecanismo de remoção dos contaminantes pelo *Sparging*.

Além de objetivar esta apresentação conceitual, foi realizado o acompanhamento de um caso real onde este sistema foi aplicado, com isto buscou-se uma verificação consolidada de sua aplicação e eficiência, assim como as vantagens e desvantagens de sua utilização.

O caso estudado consistiu na investigação e implantação de um sistema de remediação integrado de *Air sparging* e de Extração de Vapores do Solo devido a constatação de uma pluma de compostos orgânicos que já atingia uma área fora do site. O acompanhamento abordou tópicos como: ensaio piloto dos sistemas, utilização de ábaco de pressões de injeção, definição do raio de influência e da geometria final do sistema, monitoramento operacional e analítico durante seu funcionamento e a avaliação ambiental até sua desativação.

O sistema foi desativado após 7 meses de operação sendo que após 5 meses de funcionamento as concentrações já estavam abaixo da meta estabelecida para área. Uma campanha de amostragem a 10 meses foi realizada após o desligamento do sistema para a verificação da eficiência do sistema.



## 1 - INTRODUÇÃO

A aplicação das técnicas de remediação em águas subterrâneas normalmente, apresenta-se como uma tarefa complexa e que exige o envolvimento multidisciplinar, com profissionais qualificados e experientes para elaboração de diagnósticos ambientais precisos, capazes de subsidiar a escolha da tecnologia mais adequada a cada caso. Assim, o conhecimento de novas tecnologias de remediação e suas características como limitações, custo-benefício e aplicações em relação a natureza dos contaminantes e do meio são determinantes para o sucesso de uma remediação.

As alternativas que utilizam soluções mais naturais e com menores impactos ao subsolo vêm ganhando maior destaque nos últimos anos, principalmente aquelas que apresentam os menores custos em relação os métodos tradicionais e melhor eficiência para determinados contaminantes, principalmente as que apresentam com meio para alcançar seu objetivo a catalisação dos processos naturais, como a biodegradação.

Notadamente dentre as inúmeras fontes de contaminação das águas subterrâneas, uma das mais impactantes e comuns são os vazamentos de tanques subterrâneos de armazenamento de combustível. Este tipo de contaminação é um problema comprovado e vem sendo tratado com maior seriedade por governos do mundo inteiro. Para se ter uma idéia de suas proporções Oliveira (1991) fez um levantamento e afirmou que, em 1991, 80% dos tanques de armazenamento subterrâneo estavam vazando ou com iminência de vazamento no Município de São Paulo.

No contexto onde a crescente problemática de contaminação das águas subterrâneas por hidrocarbonetos de petróleo e a busca por técnicas de remediação mais baratas e eficientes, a adequação em técnicas já consagradas, como o sistema *Air Sparging*, às questões de bioestimulação (*Biosparging*) vem ganhando espaço e notoriedade em função dos resultados alcançados.



Esta é uma aplicação relativamente nova de uma técnica já consagrada para o tratamento de aquíferos contaminados por compostos orgânicos. Sua metodologia consiste na injeção de ar na zona saturada, com pressão e vazão controladas, buscando a volatilização dos contaminantes e o aumento das concentrações de oxigênio dissolvido, podendo ainda contar com a injeção de macronutrientes (N,P,K) para a bioestimulação da flora microbiana e com conseqüente aceleração dos processos de (bio) degradação.

Vale mencionar que, dependendo da complexidade do caso e da presença de diferentes contaminantes, a implantação de um único método de remediação pode tornar-se ineficiente exigindo a utilização de um sistema de remediação que consiste na operação conjunta de tecnologias que se completam.

## 2 - OBJETIVOS

O trabalho que está sendo proposto tem por finalidade:

- A apresentação conceitual do sistema *Air Sparging* para remediação de aquíferos contaminados por hidrocarbonetos leves, além das adaptações para sua utilização como *Biosparging*;
- A discussão dos fatores a serem levados em consideração para sua implantação, além dos seus benefícios, aplicações e limitações;
- Acompanhar um caso onde este sistema esteja implantado e avaliar sua aplicabilidade e eficiência;

Ao final deste trabalho objetiva-se uma verificação consolidada da utilização e eficiência deste sistema de remediação, assim como as vantagens e desvantagens inerentes a sua utilização.



### 3 - JUSTIFICATIVA

A necessidade deste tema vem sendo ditada pelo desenvolvimento do setor de remediação ambiental em nosso país. Novas tecnologias estão sendo criadas e utilizadas pelo mercado, dentre estas o *Air Sparging* vem se mostrando uma escolha segura quando falamos em contaminações por hidrocarbonetos leves.

Apesar de sua crescente utilização e de novas pesquisas sobre este assunto muitas empresas continuam relutantes frente à utilização deste método que pode gerar economias de até três vezes menos nos gastos com implantação e desenvolvimento, que os métodos de extração convencionais.

Tendo isto em vista, o tema proposto busca, de forma clara e prática, informar vantagens e desvantagens, aplicações e implicações da utilização deste método assim como o novo conceito de sua utilização, o *Bio Sparging*.

### 4 - FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

O ambiente de subsuperfície, ou subsolo, pode ser dividido em duas zonas principais; a zona não saturada e a zona saturada ((FREEZE, 1979; BITTON, 1984; CHAPELLE, 1992; SPILBORGHS,1997).

Segundo esta classificação a zona não saturada é aquela em que ocorre a presença de água e ar no interior dos espaços porosos, estando a água nesta região sob pressão hidráulica igual a pressão atmosférica (modificado de SPILBORGHS,1997).



Já a zona saturada é aquela em que a presença de água se dá em todos os espaços porosos do solo, estando esta sob pressão um pouco maior que a pressão atmosférica. Esta zona também pode ser denominada de aquífero.

É justamente no aquífero onde as principais contaminações por voláteis e semi-voláteis são atuantes e esta zona que será o foco principal dos estudos aqui propostos.

Dentre as diversas tecnologias de tratamento para contaminações da água subterrânea por hidrocarbonetos o *Air sparging* vem se destacando na última década como uma alternativa barata e eficiente.

Este sistema de remediação pode ser resumido na injeção de ar dentro da zona saturada com o intuito de promover a volatilização dos compostos orgânicos e/ou estimular a degradação microbiológica destes.

A pressão de injeção do ar deve ser controlada e obedecer dois parâmetros principais: a pressão mínima a ser utilizada deve ser a necessária para fazer com que o fluxo de ar vença a coesão do solo. NORRIS (1992), afirma que essa resistência ao fluxo é função da altura da coluna de água que precisa ser deslocada e a restrição do fluxo (permeabilidade ar/água) a coesão do solo.

A pressão de injeção de ar necessária para atingir o meio saturado pode variar de poucos centímetros de coluna d'água para cascalhos e areias grossas a muitos metros de coluna d'água em solo argilosos de baixa permeabilidade (JHONSON et al, 1993).

Segundo BROWN et al (1994) a tecnologia de *Air Sparging* proporciona dois benefícios principais: a) promove um aumento da oxigenação da água subterrânea que conseqüentemente estimula o processo de biodegradação, e, b) aumenta a remoção física dos compostos orgânicos voláteis.



## 5 - MÉTODOLOGIA

A metodologia a ser utilizada neste trabalho engloba duas etapas consecutivas sendo a primeira uma apresentação dos conceitos e técnicas utilizadas no sistema e a segunda onde o acompanhamento de casos reais em que este sistema tenha sido utilizado poderá apresentar resultados práticos dos conceitos apresentados anteriormente.

Na primeira etapa os principais métodos de estudo serão consultas bibliográficas tanto científicas como técnicas buscando abranger todos os fatores conceituais e científicos que englobam os sistemas *Air Sparging* e *Bio Sparging*.

A segunda etapa está associada ao acompanhamento operacional e na evolução ambiental de um caso de remediação onde este método estiver sendo utilizado, buscando a avaliação de sua eficiência desde a data de instalação do sistema até seu encerramento. Para isto serão utilizados procedimentos e etapas associados a uma investigação ambiental com a instalação de poços de monitoramento e de observação, coleta de amostras de solo e água subterrânea, análises químicas e confecções de plumas contaminantes. Além destas serão feitas etapas para instalação de um sistema de remediação como testes pilotos e confecção de ábacos de pressões, determinação de raio de influência e melhor geometria, instalação de poços de injeção e extração (Drenos) e o monitoramento analítico e ambiental do caso até sua finalização. Este acompanhamento proporciona uma visão ampla tanto da aplicação dos conceitos apresentados como dos resultados práticos desta aplicação.

## 6 - AIR SPARGING

O *Air Sparging* é uma técnica de remediação ambiental que vem sendo usada desde 1985. Sua aplicação é sugerida na presença de contaminantes orgânicos voláteis ou biodegradáveis na zona saturada do solo, onde certas condições de



permeabilidade são essenciais. Este processo de remediação pode ser definido como a injeção de ar comprimido, com pressão e volume definidos, dentro da zona saturada do solo.

No entanto, antes de nos aprofundarmos em conceitos construtivos e de implantação do sistema, devemos avaliar se o caso em questão possui potencial para a utilização deste sistema, ou seja, a eficiência do sistema não está associada unicamente a sua correta utilização, mas também no julgar de sua aplicação, onde fatores como presença de fase livre, estratificação e permeabilidade serão essenciais para sua eficácia.

Tendo isto em mente, devemos seguir uma seqüência lógica de questionamentos quanto à possibilidade de aplicação deste sistema de remediação.

O primeiro fator a ser levado em consideração, é a presença de fase livre, já que sua confirmação inviabiliza a implantação do sistema. Lajes ou impermeabilizações na superfície, esgotos e outras estruturas subterrâneas, se dispostas dentro da área de atuação, ou mesmo próxima dela, podem influenciar nos processos de descontaminação diminuindo a eficácia do sistema.

Isoladamente, a presença de lajes ou pisos, pode gerar graves problemas durante o funcionamento do sistema, principalmente no caso de confinamento e acúmulo dos gases gerados pela descontaminação, neste caso a utilização conjugada com um sistema de extração de vapores *SVE*, poderia amenizar e mesmo acabar com o problema.

O estudo físico do aquífero é muito importante, principalmente com relação a características confinantes do meio geológico. O *Sparging* deve ser utilizado apenas em aquíferos livres, nunca em confinados e semi-confinados já que se utiliza tanto dos processos de *Stripping* como de volatilização com conseqüente geração de gases que podem ficar confinados. Já no caso do *Bio Sparging* está inviabilidade não é aplicável já que tratamos de processos de biodegradação e dependendo das condições naturais do aquífero e das reações envolvidas no processo esta restrição seria contestável.



Da mesma forma se identificadas estratificações tanto dentro de camadas como entre estas, se deve duvidar quanto à aplicação do *Sparging*, já que sua presença pode tanto contribuir para o confinamento dos gases gerados, como na indução de caminhos e/ou planos preferências de distribuição do ar. Caso isto aconteça podem ocorrer dois efeitos principais, a diminuição da homogeneidade da área de influência e a possível dispersão dos contaminantes.

Outro cuidado que deve ser tomado é a caracterização dos contaminantes envolvidos, já que tanto o *Air sparging* como o *Bio Sparging* são indicados para contaminantes voláteis e alguns semi-voláteis. Mesmo dentro do grupo dos derivados de petróleo, contaminantes mais comuns em áreas urbanas, devem ser determinados os compostos presentes como querosene gasolina ou diesel, pois cada qual possui características particulares que podem ser decisivas na regulação e configuração do sistema.

A granulometria é outro dos fatores a ser levado em conta, pois pode influenciar nos diversos processos envolvidos na remediação proporcionada por este método. O *Sparging* apresentará melhores resultados quando empregado em áreas onde a granulometria for maior como, por exemplo, areias médias a grossas. Não que sua aplicação em meios onde estão presentes siltes e areias muito finas seja ineficaz, mas sua aplicabilidade ficará prejudicada caso o sistema não for regulado corretamente.

Associada a granulometria temos a permeabilidade do solo que será um fator importante para sabermos o quanto de ar pode ser injetado pelo sistema para que este seja eficaz. Além desta, a permeabilidade é um fator importante para a determinação da quantidade de massa transferida da fase dissolvida para a fase de vapor. A **Figura 6** apresenta uma relação básica entre permeabilidade, granulometria e eficiência do sistema.



## 6.1. Conceitos

Antes de sua utilização prática é necessário que alguns conceitos fiquem claros ao profissional principalmente aqueles inerentes a eficácia e aplicabilidade deste sistema.

As variáveis e componentes responsáveis pela determinação da eficácia do sistema podem ser divididos em dois grupos: os fatores relacionados à relação vapor/ fase dissolvida dos constituintes e os fatores associados à permeabilidade do solo. A combinação destes dois grupos de fatores é responsável pela determinação da massa que poderá ser removida do site. Além desta também são responsáveis pela determinação da geometria e do numero de pontos de injeção necessários para a volatilização da fase dissolvida.

### 6.1.1. Fatores associados à relação vapor/fase dissolvida

#### Lei de Henry

A característica mais importante para avaliarmos a relação entre fase dissolvida e gasosa é a constante de Henry. Esta pode ser definida como uma constante que quantifica a tendência dos compostos dissolvidos serem transferidos ou transformados para a fase gasosa. A lei de Henry assume que, para gases ideais e soluções em condições de equilíbrio, a reação entre a pressão dos constituintes da fase gasosa para a concentração dos constituintes da fase dissolvida é constante. Para a definição desta constante temos que:

$$P_a = H_a \cdot X_a$$

Onde:

$P_a$  = Pressão parcial dos constituintes no ar (atm)

$H_a$  = Constante da Lei de Henry (atm)



$X_a$  = Concentração dos constituintes em solução (fração molar)

As constantes dos principais constituintes encontrados nos subprodutos do petróleo estão relacionadas na **Tabela 6.1.1. (Anexo 2)** Os constituintes que apresentam constantes de Henry maiores que  $1 \times 10^{-5}$  atm.m<sup>3</sup>/mol são considerados mais fáceis de serem removidos pelo sistema *Air Sparging*.

### Composição do Produto e Ponto de Ebulição

Normalmente os derivados de petróleo são classificados por seu ponto de ebulição e sabendo que o ponto de ebulição de um composto pode ser utilizado para medir sua capacidade de volatilização, pode-se dizer que o coeficiente de partição da relação vapor/fase dissolvida pode ser estimado pelo limite do ponto de ebulição. No entanto como este coeficiente também é função da solubilidade e volatilização dos compostos, o ponto de ebulição só deve ser utilizado para uma estimativa deste coeficiente.

Deve-se levar em conta que, somente os derivados de petróleo possuem mais de 100 constituintes e que cada qual possui características distintas e responderão de modos diferentes ao *Sparging*. Esta distinção pode influenciar tanto na aplicação do sistema como também em diferentes graus de eficiência.

Ao levarmos em conta os pontos de ebulição dos principais hidrocarbonetos, os que apresentarem pontos de ebulição maiores que 200°C já possuem volatilização suficiente para a utilização do *Sparging*. Normalmente todos os compostos da gasolina, do óleo diesel e do querosene podem ser removidos pelo Air Sparging, mas os óleos lubrificantes não. Para estes últimos é mais indicado o *Biosparging* que utilizara, como forma de remediação, a degradação microbiológica.

### Pressão de Vapor

Assim como o ponto de ebulição a pressão de vapor associada a volatilização pode ser um dos parâmetros para que possamos determinar coeficiente de partição vapor/ fase dissolvida de um determinado composto. Podemos dizer que



quimicamente este é um valor que quantifica a tendência do composto de evaporar. Por definição a pressão de vapor é a pressão que o vapor pode exercer em equilíbrio com um líquido ou sólido.

Compostos que apresentam altas pressões de vapor tendem a mudar da fase dissolvida para vapor mais facilmente. Os compostos que apresentem pressões maiores que 0,5 mmHg já podem ser considerados abertos a utilização do *Sparging*.

### Concentração

Este é um parâmetro de grande importância, pois é a concentração dos compostos que ditará se o *Air Sparging* é uma tecnologia viável a ser utilizada. Além disto, será através das concentrações que serão estipulados os valores iniciais e finais da fase de remediação.

Não há um valor máximo ou mínimo em que possamos estipular se o *Sparging* possa ser utilizado ou não, mas cabe aqui uma ressalva quanto a presença de fase livre já que esta inviabiliza a utilização deste sistema, isto se deve pela provável dispersão do contaminante sobrenadante por causa da injeção do ar. Neste caso, a melhor saída seria a utilização de um sistema integrado entre o *Sparging* e outro de extração de fase livre, como o Pump and Treat, assim o *Sparging* só seria iniciado após a remoção da fase livre.

As concentrações finais ou níveis alvos, a serem atingidos irão variar de composto para composto e conforme valores estabelecidos por órgãos reguladores ou por análise de risco.

### Solubilidade

A solubilidade em água de um dado composto é uma medida importante, pois ditará o quanto que este pode ser dissolvido em água. A solubilidade assim como a já citada volatilização é um fator relacionado à relação vapor/fase dissolvida, no entanto é uma medida de menor importância para a determinação da eficiência do sistema, se compara a outros fatores como pressão de vapor e a Lei de Henry.



Quando consideramos que um determinado composto será removido pelo *Air Sparging*, devemos levar em conta que este sistema pode criar turbulência e conseqüentemente acarretar num aumento da solubilidade deste na zona saturada. Deve-se tomar cuidado, pois um composto que apresente alta solubilidade não, necessariamente, dificultará o processo. Compostos com alta solubilidade podem ser removidos eficientemente pelo *Sparging* caso estes apresentem alta relação vapor/fase dissolvida e alta pressão de vapor, um exemplo deste caso é o Benzeno que possui tais alta solubilidade mas vem sendo remediado eficientemente pelo sistema *ir Sparging*. No entanto, compostos, como o MTBE, que apresentam alta solubilidade e baixos valores na lei de Henry não são removidos eficientemente pelo *Sparging*.

#### 6.1.2. Fatores associados à Permeabilidade do solo

##### Permeabilidade Intrínseca

A Permeabilidade Intrínseca é uma medida da capacidade dos solos de transmitirem fluidos e é uma das mais importantes características do solo para determinarmos a eficiência da implantação de um sistema *Air Sparging*. Esta medida, conceitualmente, pode variar de  $10^{-16}$  a  $10^{-3} \text{ cm}^2$ , ou seja, treze ordens de magnitude.

Esta permeabilidade pode ser determinada por testes em campo e em laboratórios. As areias possuem altas permeabilidades enquanto materiais mais finos como siltes e argilas. Em solos com permeabilidades acima de  $10^{-9}$  o sistema *Sparging* será eficaz, entre  $10^{-9}$  e  $10^{-10}$  o sistema pode ser eficaz mas com algumas exceções e com permeabilidades abaixo de  $10^{-10}$  o sistema corriqueiramente será ineficaz.

Conforme citado acima, esta permeabilidade pode ser obtida através de testes em campo como, por exemplo, testes de bombeamento onde será medida a



condutividade hidráulica do aquífero. A partir desta é possível obter a permeabilidade conforme a seguinte equação:

$$k = K (\mu / \rho g)$$

onde:

$k$  = Permeabilidade Intrínseca ( $\text{cm}^2$ )

$K$  = Condutividade Hidráulica ( $\text{cm/s}$ )

$\mu$  = Viscosidade da água ( $\text{g/cm.s}$ )

$\rho$  = Densidade da Água ( $\text{g/cm}^3$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{cm/s}^2$ )

### Estruturas no solo e Estratificações

A presença de macro e micro estruturas no solo pode influenciar e mesmo controlar a injeção e dispersão do ar na zona saturada, ao utilizarmos o *Sparging*. Por exemplo, solos com micro estratificações e baixa granulometria exigem altas pressões de injeção, pois tais solos tendem a formar micro bolsões de acúmulo de ar o que minimiza a eficácia do sistema. Da mesma a utilização do *Air Sparging* em solos que apresentem estratificações contínuas e plano-paralelas pode apresentar problemas como uma dispersão lateral e preferencial tanto da água subterrânea como do contaminante.

Solos que contenham estratificações acentuadas e/ou grandes heterogeneidades podem apresentar grandes barreiras para o *Sparging*. Para uma visualização melhor da complexidade de cenários que podem ocorrer tomemos como exemplo um aquífero homogêneo constituído por areia média, excelente para aplicação do *Sparging*, no entanto este aquífero está sobreposto a um solo com forte estratificação residual. Neste caso o problema não se limitaria a uma possível dispersão do contaminante, mas sim na provável retenção dos vapores gerados pela volatilização, o problema poderia se agravar se este vapor comesse a migrar



pelos planos preferenciais e atingisse grande distancias laterais, podendo contaminar áreas fora da delimitada pela investigação.

### Concentração de Ferro dissolvido

Um acompanhamento detalhado da concentração de ferro dissolvido ( $\text{Fe}^{2+}$ ) na água subterrânea é muito importante, pois sua presença pode diminuir a permeabilidade da zona saturada durante a operação do *Sparging*. Quando o ferro dissolvido ( $\text{Fe}^{2+}$ ) é exposto ao oxigênio, ele é oxidado para o íon ( $\text{Fe}^{3+}$ ) que é insolúvel e de fácil precipitação, podendo preencher os espaços porosos da zona saturada diminuindo drasticamente a região a ser ocupada pelo ar e pela água subterrânea, ou seja, diminuindo a permeabilidade local. Esta precipitação ocorre preferencialmente próxima aos poços de injeção, podendo, a longo e médio prazo, obstruir as ranhuras do poço, bloqueando a saída de ar.

Para a determinação do total de ferro dissolvido na água subterrânea são necessários testes de laboratório. O sistema é eficiente com concentrações menores que 10 mg/L de ferro dissolvido, nos casos onde as concentrações fiquem entre 10 e 20 mg/L serão necessários testes periódicos no sistema. Já com concentrações acima de 20 mg/L não é recomendável a utilização do *Sparging*.

## **6.2. Mecanismos de remoção**

Podemos distinguir três mecanismos de remoção da massa de contaminantes durante a operação do sistema *Air Sparging*. O primeiro é chamado de *Air Stripping* e ocorre principalmente sobre compostos orgânicos voláteis dissolvidos na água subterrânea; o segundo está associado à volatilização do contaminante preso nos poros ou absorvido na zona saturada e/ou na franja capilar; por ultimo temos a biodegradação aeróbica tanto na fase dissolvida como na absorvida.



### 6.2.1 *Air Stripping*

Este termo *Stripping* é utilizado para denominar o mecanismo onde os contaminantes são forçados a volatilizar. Este é o processo dominante para a maioria dos contaminantes dissolvidos. Apesar de ser um processo de volatilização este não ocorre de forma natural e utiliza-se da movimentação de micro-partículas ou do próprio borbulhamento para a indução da passagem de fase dissolvida para fase gasosa.

A constante de Henry pode nos dar uma idéia do potencial de remoção de massa dissolvida durante o *Sparging* e está diretamente relacionada ao *Stripping*. Compostos como o Benzeno, Tolueno e Xilenos são considerados fáceis de serem removidos pelo *Stripping*, pois possuem constantes de Henry relativamente altas.

### 6.2.2. Volatilização induzida

Numa operação de um sistema *Air Sparging* este mecanismo será responsável pelo aumento da volatilização de contaminantes dissolvidos na água subterrânea estejam estes absorvidos ou mesmo presos nos poros da zona saturada. Esta volatilização induzida terá uma área proporcional à área limite de dispersão do ar injetado.

A capacidade de induzirmos a volatilização em vários compostos está associada à sua pressão de vapor. Sendo assim temos que todos os compostos voláteis podem ser facilmente removidos por volatilização.

O ar injetado na zona saturada dificilmente irá se dispersar homogeneamente, mas sim criando alguns dos chamados túneis de ar, que nada mais são do que caminhos preferenciais de dispersão do ar. Em regiões onde o solo já esteja saturado em ar ou onde os túneis de ar estejam muito próximos a zonas de retenção



de contaminantes, o processo será similar ao que ocorre em sistemas como o *SVE* ou *Bioventing*.

### 6.2.3. Biodegradação

Na maioria das situações, a biodegradação aeróbica é a alternativa com melhor relação custo/benefício e podendo apresentar ótimos resultados seja ela utilizada como agente principal ou secundário. A biodegradação de muitos compostos em ambientes aeróbicos irá depender de diversos fatores como estruturas químicas, parâmetros ambientais, como pH e temperatura, características físicas e biológicas.

Alguns compostos orgânicos voláteis são considerados fáceis de serem biodegradados em condições aeróbicas, como o Benzeno e o Tolueno, e outros não, como o tricloro-etileno.

Se analisarmos o oxigênio dissolvido, veremos que para águas subterrâneas não contaminadas o valor médio é de 4.0 mg/L. Este número pode ser um bom indicativo da presença de contaminantes pois, caso sejam medidos valores baixos, entre 0,4 e 0,8 mg/L, de oxigênio dissolvido esta anomalia pode estar associada a um ambiente anaeróbico induzido pela degradação de contaminantes presentes na água subterrânea.

O *Sparging* pode elevar o nível de oxigênio dissolvido, sob condições de equilíbrio, em até 10 mg/L. Será este aumento de oxigênio que beneficiará a biodegradação do contaminante. Este aumento da biodegradação é uma das vantagens da utilização do *Sparging*.

O principal processo de transmissão do oxigênio na água é a difusão. A difusão ocorre principalmente entre os túneis de ar onde não há passagem preferencial de ar. Deve-se tomar cuidado quanto a espessura destes túneis de ar,



pois se forem muito largos podem dificultar a difusão do ar, formando uma distribuição heterogênea e diminuindo a eficiência da biodegradação.

### 6.3. Aplicabilidade

Pode-se julgar a aplicabilidade de um sistema *Air Sparging* através da quantificação dos três mecanismos de remoção de contaminantes, listados anteriormente. Quando um dado composto apresentar alta susceptibilidade de remoção pelos três mecanismos pode-se ter certeza de que o sistema será aplicável ao caso. Por exemplo, o Benzeno apresenta alta volatilização, biodegradação e alta capacidade de ser removido por *Stripping*, o torna um composto com grande potencial de aplicação do sistema.

Como dito anteriormente, na prática, o critério para julgarmos quanto ao potencial de um dado composto ser removido pelo mecanismo de *Stripping* é a constante de Henry, ou seja, compostos com valores acima de  $1 \times 10^{-5}$  atm.m<sup>3</sup>/mol poderão ser removidos através deste mecanismo. Da mesma forma a facilidade de volatilização é controlada por compostos que apresentem pressões de vapor entre 0,5 e 1,0 mmHg. Já no caso da biodegradação os processos envolvidos são muito abrangentes e diversos fatores devem ser levados em conta para que tal mecanismo seja eficiente.

Seguindo esta linha de pensamento podemos separar diversos compostos em que a aplicação de sistema *Air Sparging* é a mais indicada, dentre estes estão o Benzeno, Tolueno, Xilenos, Etilbenzeno, TCE e PCE, ou seja, em geral os constituintes da gasolina apresentam alto potencial de aplicação deste sistema.

Muitos constituintes presentes nos subprodutos do petróleo apresentam baixo potencial de remoção pelos mecanismos de *Stripping* e volatilização, mas isso não é uma premissa de que o sistema não é aplicável já que estes compostos possuem alta capacidade de biodegradação aeróbica, feitas as adaptações necessárias



podem apresentar grande potencial de aplicação. Com isto tenta-se expressar que apesar de julgarmos a aplicação do sistema pelo potencial de remoção do contaminante através dos mecanismos por este utilizados, não é porque um ou mais mecanismos são ineficientes que o sistema não seja aplicável.

#### 6.4. Vantagens e desvantagens

Como todo método de remediação, o *Air Sparging* possui suas vantagens e desvantagens que poderão ditar a sua real implantação além da eficiência do sistema, no entanto, caberá ao profissional caracterizar corretamente o site em estudo e distinguir características favoráveis ou desfavoráveis à utilização deste método de remediação.

Como vantagens de sua utilização pode-se citar:

- facilidade de instalação do sistema;
- os equipamentos necessários para instalação são de fácil obtenção;
- implantação pode ser realizada com o mínimo de interferência nas operações do site;
- tempo de tratamento é curto, entre 1 e 3 anos, sendo que em condições ótimas este período pode chegar a menos de 1 ano;
- dispensa tratamentos secundários como estocagem e descarte de resíduos;
- pode custar até um terço do preço dos métodos de extração convencionais;
- pode ser integrado a outros métodos de remediação.



Como desvantagens tem-se:

- Não pode ser utilizado quando existir fase livre;
- Não pode ser utilizado no tratamento de aquíferos confinados;
- Solos estratificados podem causar ineficiência do sistema;
- Pode induzir migração dos compostos a serem remediados;
- Requer um teste piloto detalhado e monitoramento para controle de vapores e limite de migração;
- Algumas interações entre processos químicos, físicos e biológicos são muito complexas.

## 7. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consiste na apresentação dos resultados obtidos na instalação de um sistema de remediação num posto de gasolina para a descontaminação da água subterrânea.

A proposta de remediação englobou dois sistemas em conjunto o *Air Sparging* e o Sistema de Extração de Vapores (SVE). Além da implantação de um sistema de bombeamento emergencial por causa da fase livre que já atingia uma área off site.

Devido ao termo de confidencialidade não serão fornecidas informações que possibilitem a identificação do auto posto assim como sua localização. Sendo assim, optou-se pelo nome arbitrário Auto Posto Alfa apenas para utilização neste trabalho.



## 7.1. Histórico

As primeiras avaliações ambientais ocorreram 1 ano antes da instalação do sistema de remediação, onde foi realizado um trabalho de investigação, denominado de “Avaliação Preliminar da Presença de Combustível no solo e Aquífero Freático”. Essas investigações ocorreram devido à constatação de gasolina em fase livre no interior da garagem subterrânea do edifício residencial próximo ao Auto Posto Alfa, vide **Figura 7.1.** em **Anexo 1.**

Posteriormente, os trabalhos de investigação prosseguiram na área do posto, com a elaboração de uma “Análise de Risco (*RBCA*) – *Tier 1*, estabelecida através das normas ASTM E 1739-95 e ASTM PS 104-98. O objetivo desse trabalho consistiu na definição das concentrações limites para os compostos de interesse (*RBSL – Risk-Based Screening Levels*), de acordo com a existência ou não de seres humanos expostos à contaminação, caminhos de exposição considerados para o *site* e características físico-químicas e toxicológicas dos compostos estudados.

Os resultados da Análise de Risco indicaram que as concentrações máximas de benzeno obtidas tanto em amostras de solo como de água subterrânea, ultrapassaram o RBSL calculado para o composto, considerando-se o caminho de inalação de vapores provenientes do solo e águas subterrâneas em ambientes fechados pelos trabalhadores comerciais do posto.

Após esta constatação iniciou-se a operação de um sistema de remediação que operou continuamente na redução das concentrações de hidrocarbonetos presentes no solo e água subterrânea. Após um determinado período de operação, constatou-se que os objetivos/metasp de remediação foram atingidos, sendo o sistema paralisado 7 meses após a sua instalação.

Por fim foi realizada uma etapa de monitoramento, após 10 meses do término da fase de remediação. Com este estudo foi constatado que nenhum dos parâmetros



analisados ultrapassaram os limites estabelecidos para o fim da remediação, comprovando a remoção dos contaminantes.

## 7.2. Avaliação Ambiental

### 7.2.1. Localização e caracterização do local

O Auto Posto Alfa está localizado dentro do município de São Paulo, no bairro da Liberdade. No entanto, a localização exata das instalações do Auto Posto Alfa não poderão ser fornecidas, por causa do acordo de confidencialidade assinado entre a CSD-Geoklock e o responsável pelo posto. Assim as figuras não apresentarão indícios de sua real localização. A **Figura 7.2.1.** (vide **Anexo 1**) apresenta o Layout das instalações do auto posto Alfa.

Morfologicamente posto situa-se em uma encosta de baixa declividade, alterada pelos intensos cortes, aterros e arruamentos. Esta meia encosta corresponde a face norte do espigão central da cidade de São Paulo, e toda a drenagem local flui para a margem esquerda do Rio Tamanduateí, afluente do Rio Tietê.

As edificações vizinhas ao posto são residenciais e comerciais. A parte residencial é composta tanto por casas como edifícios. Alguns edifícios possuem garagens subterrâneas de um ou dois pavimentos, como é o caso do Condomínio Beta. O comércio é de pequeno e médio porte, altamente diversificado. Todos os cabos energizados são aéreos.

O auto posto Alfa ocupa uma área aproximada de 960 m<sup>2</sup>, e conta com uma edificação que abriga uma loja de conveniência. O escritório e os vestiários localizam-se acima do Box de Lavagem, junto ao edifício residencial, encontram-se 4 tanques de armazenamento subterrâneo de combustíveis, dos quais dois possuem



capacidade para 15.000 L e dois para 30.000 L (compartimentados em dois tanques de 15.000L cada) O combustível é comercializado através de 9 bombas de abastecimento, vide **Figura 7.2.1.** em **Anexo 1**

O Posto de Serviços conta ainda com troca de óleo, realizada através de dois elevadores hidráulicos. O óleo queimado é armazenado em um tanque subterrâneo de 500 litros.

### **7.2.2. Motivação**

A CSD-GEOKLOCK foi contratada em caráter emergencial para uma vistoria inicial nos equipamentos e instalações do posto, assim como uma vistoria na garagem do Prédio em ao lado do site.

Constatou-se a presença de forte odor de gasolina na garagem do segundo subsolo do Prédio. Com o auxílio de um explosímetro foi verificada a presença de 60% de explosividade em algumas caixas de drenagem do edifício e também a presença de fase livre de gasolina emergindo conjuntamente com água proveniente do aquífero freático, por um buraco aberto na parede do subsolo.

Realizou-se um mapeamento dos índices de explosividade em todas as caixas de drenagem existentes na garagem. Mantas absorventes de polipropileno foram colocadas na canaleta de drenagem das águas subterrâneas que apresentavam fase livre. Nas caixas de drenagem com elevados índices de explosividade foi colocado PEAT-SORB e realizada uma lavagem e sucção a vácuo para um caminhão.

Ainda em caráter emergencial, selou-se o buraco na parede da garagem do prédio e foram instalados 3 poços de monitoramento/bombeamento, com inclinação de 45°, nessa mesma parede para a realização do saneamento e monitoramento do freático nas proximidades.



Após o controle da situação emergencial iniciou-se uma campanha de investigação ambiental para caracterização e delimitação dos contaminantes.

### **7.2.3.Geologia e Hidrogeologia**

A área em estudo esta sobre a Bacia de São Paulo que é uma das unidades integrantes do denominado Rift Continental do Sudeste do Brasil (RICCOMINI, 1989).

A bacia de São Paulo esta localizada no denominado Planalto Paulistano e, conforme ALMEIDA (1958), este planalto apresenta relevo suavizado, de morros e espigões relativamente baixos, com as drenagens fluindo, preferencialmente, para o Rio Tietê. Além do Tietê a Bacia de São Paulo é drenada também pelos rios Pinheiros, Tamanduateí e seus tributários.

Trata-se de uma bacia em hemi-gabren que foi basculado para NNW e sua espessura máxima pode atingir 256m (TAKIYA, 1991) no entanto RICCOMINI (1989) descreveu um furo de sondagem para água subterrânea com uma profundidade de 263 m em sedimentos.

Neste trabalho optou-se por utilizar a litoestratigrafia proposta por RICCOMINI (1989) onde segundo este autor o quadro litoestratigráfico para os depósitos sedimentares continentais terciários da Bacia de São Paulo, compreende uma seqüência basal com as formações Resende, Tremembé e São Paulo, dentro do Grupo Taubaté, e recobertas, presumivelmente discordante, pela Formação Itaquaquecetuba.

O embasamento regional é caracterizado por terrenos pré-cambrianos que incluem uma ampla variedade de granitos, gnaisses, xistos, anfíbolitos, milonitos e rochas metassedimentares predominantemente pelito-psamíticas e, mais localmente, psefíticas e carbonáticas (COUTINHO, 1980).



A Formação Resende representa em torno de 80 % do preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo. Esta formação compreende depósitos de leques aluviais que gradam para à depósitos associados a planícies aluvionares de rios ,caracteristicamente, entrelaçados.

Segundo RICCOMINI e COIMBRA (1992) os depósitos de leques aluviais proximais incluem diamictitos e conglomerados com seixos, matacões e blocos angulosos a subarredondados, normalmente polimíticos, dispersos em matriz essencialmente lamítica a arenosa, de coloração no geral esverdeada, quando não alterada. Apresentam gradação normal a inversa, ocorrendo acunhamento dos pacotes rumo às porções mais centrais da bacia. Tais sedimentos sofrem variação em direção ao centro da bacia onde predominam depósitos aluviais como lamitos arenosos e arenitos que podem apresentar estratificação cruzada a cruzada acanalada e níveis conglomeráticos de quartzo e quartzito. Além destes podem aparecer pequenos depósitos de arenitos médio a grossos tabulares ou em forma de extensos lençóis associados às estratificações cruzadas acanaladas.

Já a Formação Tremembé é caracterizada por depósitos lacustres constituídos basicamente por argilas esverdeadas maciças podendo apresentar intercalações com argilas negras ricas em matéria orgânica. Esta formação pode atingir espessuras próximas de 60 metros e, segundo RICCOMINI (1989), possuem idade oligocênica.

A Formação São Paulo, que aflora, principalmente, ao longo do espigão central da cidade de São Paulo, corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante e, segundo RICCOMINI (1989) é constituída por duas litofácies principais.

A primeira engloba arenitos grossos a conglomeráticos com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos. Podem apresentar estratificações cruzadas à estruturas lenticulares. Pode apresentar ainda depósitos de meandro caracterizados pela presença de folhelhos ricos em matéria orgânica.



A segunda litofácies encerra arenitos médio a grossos com granodecrescência ascendente para sedimentos mais finos, chegando a siltitos e argilitos. Estruturalmente podem apresentar estratificações plano-paralelas horizontais com grande alcance lateral, *Climbing Ripples*, além de um caráter rítmico entre camadas.

Uma feição característica são crostas e concreções limoníticas que ocorrem entre sedimentos argilosos e arenosos e diminuem a permeabilidade dos pacotes.

A formação Itaquaquecetuba engloba depósitos de sistemas fluviais entrelaçados, no entanto, segundo RICCOMINI e COIMBRA (1992) há um aspecto fundamental que a diferencia das demais: ele encontra-se alojado em contato ora erosivo, ora tectônicos unicamente com rochas do embasamento pré-cambriano. Segundo a maioria dos autores que estudaram esta formação a caracterização mais plausível é a sua separação em cinco litofácies distintas.

A primeira compreende arenitos com estratificação cruzada acanala e tabular de grande porte e grande variedade de fragmentos vegetais e fósseis. Podendo apresentar ainda folhelhos ricos em matéria orgânica.

A segunda litofácies encerra para-conglomerados, com seixos bem arredondados de quartzo e quartzito. Esta litofácies alterna-se verticalmente e horizontalmente com a primeira.

Já a terceira compreende arenitos maciços com granulação média a fina podendo apresentar estruturas em *pillow*. Segundo RICCOMINI e COIMBRA estas estruturas correspondem a fluidificação de sedimentos de barras arenosas da fácies de arenitos com estratificação cruzada, com geração de estruturas almofadadas e destruição das estruturas fluviais originais.

A quarta litofácies encerra lamitos maciços, siltico-arenosos esverdeados, podendo conter seixos bem arredondados de quartzo e quartzito dispersos na matriz.



Por fim a quinta litofácies compreende blocos subangulosos de rochas do embasamento e megaclastos tabulares de folhelhos siltosos a areníticos com matéria orgânica. Estes depósitos são observados próximos a borda de falhas, limitando rochas do embasamento e os sedimentos da bacia. Além destes podem ocorrer ainda depósitos areníticos, siltíticos e argilíticos com características fluviais.

A **Figura 7.2.3. (Anexo 1)** apresenta o mapa geológico regional e a localização superficial do Auto Posto Alfa

Num contexto regional a área estudada está inserida na denominada Bacia do Alto Tietê (BAT) que é uma unidade hidrológica que engloba os domínios da Bacia sedimentar de São Paulo ( $1.452 \text{ Km}^2$ ) e as rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino ( $4.238 \text{ Km}^2$ ) que as circundam. O contexto geológico apresentado anteriormente define duas unidades aquíferas: o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS).

O Sistema Aquífero Cristalino ocorre nos domínios das rochas cristalinas do embasamento. Seus limites coincidem aproximadamente com os divisores de drenagem superficial, nas cotas de 800 e 1000m. Segundo o comportamento hidráulico das rochas é possível distinguir duas unidades neste sistema. O primeiro, relacionado às rochas intemperizadas, conforma um aquífero de porosidade granular bastante heterogêneo, de natureza livre, com espessuras médias de 50m.

Sob o manto de intemperismo e, muitas vezes conectado hidráulicamente, ocorre o aquífero cristalino propriamente dito, onde as águas circulam por descontinuidades rúpteis da rocha (fraturas e falhas abertas). Esta unidade é de caráter livre a semi-livre e heterogêneo e anisotrópico.

Embora recobrindo apenas 25% da área da Bacia do Alto Tietê, o Sistema Aquífero Sedimentar é o mais intensamente explorado. As altitudes médias das colinas situam-se nas cotas 760m com máximos de 840m no espigão da Av. Paulista e mínimo de 710m na soleira de Barueri, onde o sistema aquífero é livre a semi-confinado, de porosidade primária e bastante heterogêneo.



O modelo de circulação regional aceito para a Bacia Alto Tietê (BAT) mostra que as águas das chuvas recarregam os aquíferos em toda a sua extensão não impermeabilizada. Outra importante recarga ocorre pelas fugas da rede de abastecimento de água e de coleta de esgoto. Uma vez ingressando no aquífero, as águas fluem em direção às drenagens superficiais, suas áreas de descarga. O rio Tietê representa, junto à soleira de Barueri, o ponto de menor potencial hidráulico do aquífero e onde todas as águas drenadas dos dois sistemas finalmente fluem.

A Sabesp-Cepas(1994), estabeleceu a hidráulica de cada aquífero, utilizando neste trabalho quatro novas unidades hidrogeológicas: Aquífero de Rochas Granitóides, Aquífero de Rochas Metamórficas, Aquífero Resende e Aquífero São Paulo.

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) apresenta características produtivas diferenciadas segundo o tipo de litologias dos aquíferos. É possível distinguir duas unidades, aquela associada às rochas granitóides e filitos (Aquíferos de Rochas Granitóide), com capacidade específica (Q/s) média de  $0,20 \text{ m}^3/\text{h m}$  e aquela associada às rochas metamórficas, com Q/s de  $1,35 \text{ m}^3/\text{h m}$  (Aquífero de Rochas Metamórficas). DAEE (1975), analisando indistintamente ambos os aquíferos, obteve transmissividades entre 0,4 e  $14 \text{ m}^2/\text{dia}$ . Foi estabelecida, uma porosidade eficaz (Sy) de 3%, DAEE (1975).

As características hidráulicas da porção intemperizadas do SAC foram estudadas por Rebouças (1992), que mostra que a condutividade hidráulica é função do nível do perfil de alteração da rocha. As condutividades hidráulicas variam de muito baixas ( $1 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ), no terço superior do perfil de alteração, a muito alta ( $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ) na zona de transição entre a rocha relativamente alterada e a rocha sã.

No SAS foi possível identificar duas novas unidades: uma associada à Formação São Paulo, com Q/s médio de  $0,48 \text{ m}^3/\text{h m}$  e outra à Formação Resende, mais produtiva, com Q/s médio de  $0,91 \text{ m}^3/\text{h m}$ . Sabesp-Cepas (1994) atribuem para



o SAS uma porosidade eficaz ( $S_y$ ) média de 6%, e DAEE (1975) valores de transmissividade médios de  $50 \text{ m}^2/\text{dia}$ , variando de 15 a  $70 \text{ m}^2/\text{dia}$ . As formações neocenoicas, Tremembé e Itaquaquecetuba, não definem unidades aquíferas devido a sua pequena expressão em área.

#### 7.2.3.1. Geologia e Hidrogeologia local

As sondagens realizadas na área do referido posto permitem individualizar 3 litologias distintas (do topo para a base):

- Aterro argilo-arenoso de espessura média de 1,5 m, cor variegada bem compactado com maior porcentagem de argilas sendo a fração arenoso de granulometria fina a média.;
- Logo abaixo do aterro ocorrem argilas cinza amareladas com quantidades variadas da fração areia, que representam os sedimentos Terciários depositados no local;
- Localmente ocorrem estratos arenosos intercalando os sedimentos argilosos, possuem continuidade lateral, e são compostos por areia média a fina, pouco argilosa e cor esbranquiçada.

O aquífero local é livre, tendo em vista as litologias acima descritas. A superfície freática apresenta-se à profundidade média de 3,0 m na área do posto. Os valores de carga hidráulica foram interpolados em um Mapa Potenciométrico (**Figura 7.2.3.1. em Anexo 1**), curvas equipotenciais, permitindo o traçado do fluxo subterrâneo perpendicularmente as mesmas. A análise deste mapa evidencia um fluxo preferencial a partir da área de tancagem, em direção à garagem subterrânea do edifício (Sul/Norte). Junto à lateral da garagem do segundo subsolo, onde ocorre a surgência de fase livre, a parede de alvenaria age como uma barreira, infletindo a



direção do fluxo de água subterrânea de forma que fique torna-se perpendicular à direção original (Leste/Oeste).

A velocidade de migração das águas subterrâneas foi calculada em função do padrão de fluxo e dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero, de acordo com a Lei de Darcy. Adotou-se um gradiente hidráulico médio ( $I$ ) da ordem de 0,16 (16%). A porosidade efetiva média pode ser estimada em torno de 15% para este aquífero, valor típico de litologias argilo-arenosas (**FREEZE & CHERRY, 1979**). Para determinar a condutividade hidráulica foram realizados ensaios do tipo “Slug Test” nos poços de monitoramento relacionados na **Tabela 7.2.3.1**. Empregando-se a condutividade hidráulica média obtida nos poços ensaiados ( $k_{\text{médio}} = 6,12 \times 10^{-5}$  cm/s), estima-se a velocidade de 21 m/ano para a migração das águas subterrâneas na área estudada. Não foram considerados os aspectos de densidade, viscosidade e fluidez do combustível no cálculo da velocidade.

Os ensaios de permeabilidade do tipo carga variável, *Slug Test* ou *Bail Test*, são realizados a partir da extração de um volume de água do poço de monitoramento, acompanhando-se a recuperação do nível até sua estabilização. As medidas são efetuadas a cada 30 segundos, através de medidores elétricos com precisão de + ou – 0,5cm.

As fórmulas normalmente empregadas para a determinação da condutividade hidráulica consideram o meio homogêneo e contínuo, além da necessidade de haver regime de fluxo laminar. Neste caso, a Lei de Darcy é válida e a mais utilizada, produzindo resultados satisfatórios. Os memoriais de cálculo dos testes feitos nos poços relacionados na **Tabela 7.2.3.1**. estão no **Anexo 3**.

#### 7.2.4. Análise de Risco

Conforme solicitação do cliente, foi realizada uma análise de risco – RBCA para uma melhor adequação aos limites aceitáveis dos contaminantes dentro das especificações do empreendimento.



O RBCA é uma ferramenta auxiliar de tomada de decisões aplicado à contaminação de solos e águas subterrâneas que tem por base a proteção da saúde humana e recursos ambientais (ASTM, 1995). Às práticas tradicionais de remediação foram incorporadas a avaliação de risco com o objetivo de instrumentalizar a priorização de sites e escolha do grau de remediação em função dos riscos que representam aos habitats próximos à contaminação. A alocação de recursos, dessa forma, fica embasada em critérios científicos com a garantia da proteção aos indivíduos envolvidos (receptores).

A avaliação de risco é usada para definir os limites toleráveis das concentrações de contaminantes no site, para que o risco não seja extrapolado no ponto de exposição. Portanto, todo o processo se baseia em comparações entre as concentrações existentes e as previstas com base no risco. A seleção dos níveis de remediação é feita com base nesse gradiente de concentrações. Os parâmetros comparativos são as concentrações alvo as quais não podem ser extrapoladas na fonte (Finotti, 1997).

Os limites calculados para o solo e a água subterrânea estão relacionados na **Tabela 7.2.4. (Anexo 2)** e serviram como metas para a remediação da área.

#### **7.2.5. Contaminação no solo**

Durante a investigação foram realizadas 21 sondagens de reconhecimento, dispostas de maneira a cobrir a maior parte da área do posto e vizinhanças, permitindo delimitar a extensão da pluma de fase livre sobrenadante ao freático e caracterizar o subsolo. Foram constatados odores de gasolina em 4 destas sondagens. A ocorrência de vapores no solo se deve, quando distantes das fontes de contaminação, à volatilização dos compostos presentes na gasolina sobrenadante, ou ainda da volatilização de compostos da gasolina presente em fase dissolvida.



Durante a execução das sondagens foram recolhidas 4 amostras de solo para análises químicas em compostos de interesse (BTXE e PAH) que foram definidos em função do histórico de comercialização de diesel e gasolina no local.

Os intervalos de coleta foram definidos durante a execução das sondagens de reconhecimento, de forma a garantir a representatividade na correlação entre horizontes contaminados interceptados pelas perfurações. A **Figura 7.2.5.2. (Anexo 1)** apresenta o mapa de indícios de produto no subsolo e a **Figura 7.2.5.3 (Anexo 1)** o mapa de localização das sondagens de reconhecimento.

Durante a execução das sondagens foram previamente coletadas amostras a cada 1,0 m e realizadas medidas de VOC's. Das amostras que apresentaram valores mais elevados de compostos orgânicos voláteis, foram selecionadas cinco amostras para serem analisadas em laboratório.

As amostras de solo foram coletadas, acondicionadas e preservadas de acordo com o procedimento interno SQ 016-V01 (CSD-GEOKLOCK) e enviadas ao laboratório *Philip Analytical Services* (Canadá) para a análise dos parâmetros BTXE (Benzeno, Tolueno, Xilenos e Etilbenzeno) e determinação de PAH's (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos).

Os métodos analíticos utilizados são baseados no "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 19ª Edição publicada pela American Public Health Association, ou de acordo com os protocolos USEPA (Test Methods for Evaluating Solid Waste, physical / chemical Method, SW846), 3ª Edição.

Nesta primeira campanha de amostragem de solo os compostos BTXE estavam presentes com concentrações significativas em todos os pontos monitorados. As maiores concentrações foram detectadas no TR-05 para benzeno (11,0 mg/kg) e no TR-01 para tolueno (157,06 mg/kg), etilbenzeno e xilenos.



Os compostos PAH apresentaram-se em concentrações relevantes nas amostras de solo. Foi observada no TR-01 a máxima concentração para o naftaleno (58,0 mg/kg) e no TR-12 a máxima concentração para o fluoranteno.

A **Tabela 7.2.5.1** apresenta os resultados de BTXE para solo e a **Tabela 7.2.5.2** os resultados de PAH para solo. Estas encontram-se no **Anexo 2**.

Com base nos resultados apresentados verificou-se que as concentrações de benzeno estavam acima dos limites nas sondagens TR-01 e TR-05, além deste a sondagem TR-01 apresentou concentração de xileno acima do limite estabelecido pela análise de risco.

Nas quatro amostras de solo foram encontradas concentrações de PAH's acima do padrão calculado. Dentre todos os compostos o Naftaleno foi o que apresentou maiores concentrações.

#### **7.2.6. Contaminação na água subterrânea**

Dentre as 21 sondagens executadas foram instalados 8 poços de monitoramento de duas polegadas e 1 poço de bombeamento com quatro polegadas de diâmetro. O perfil construtivo e litológico dos poços instalados estão na **Figura 7.2.6.1. (Anexo 1)** e sua localização pode ser vista na **Figura 7.2.6.2. (Anexo 1)**.

Nos poços de monitoramento instalados foram realizadas medições de nível d'água e espessura de fase imiscível utilizando-se um medidor denominado INTERFACE METER. A **Tabela 7.2.6.1 (Anexo 2)** resume os valores obtidos, apresentando o cálculo de carga hidráulica (H) corrigida em função da cota topográfica relativa e da espessura da fase livre de combustíveis quando existentes.

A partir dos resultados de campo e dos cálculos das cargas hidráulicas foi possível confeccionar um mapa potenciométrico para área. A **Figura 7.2.3.1. (Anexo 1)** apresenta o mapa potenciométrico mencionado. Além deste foi confeccionada



uma seção hidrogeológica para uma melhor visualização da superfície equipotenciométrica e de sua interação com garagem subterrânea do edifício ao lado. Esta seção encontra-se na **Figura 7.2.6.3. (Anexo 1)**.

Na primeira campanha de amostragem das água subterrâneas foram coletas 7 amostras para análise de BTXE e PAH's. estas amostras foram realizadas em todos os poços de monitoramento com exceto no PM-01. As amostragem forma realizadas segundo Norma Técnica ABNT/NBR 13.895 (Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem). Anteriormente à coleta, foi removido um volume aproximado de 30 litros em cada poço, objetivando a renovação da água estagnada e garantir a representatividade das amostras coletadas.

As tabelas **7.2.6.2. e 7.2.6.3. (Anexo 2)** apresentam os resultado analíticos das amostras coletadas para os parâmetros BTXE e PAH's, respectivamente.

Os compostos BTXE forma detectados em todos os poços de monitoramento, no entanto apenas no poço PM-02, PM-04, PM-07 e PM-08 as concentrações ultrapassaram os limites estabelecidos para a área. O naftaleno estava presente em todos os poços monitorados com exceção do PM-06.

A partir dos resultados analíticos foi possível delimitar a pluma de contaminação na água subterrânea. A **Figura 7.2.6.4 (Anexo 1)** apresenta a pluma de contaminação delimitada na investigação inicial.

### **7.3. Sistema de remediação**

Depois de constata a presença de fase livre no solo e na água subterrânea, devido ao caráter emergencial, foi instalado um sistema de bombeamento na área com a utilização de dois poços o PB-01 que apresentou 51 cm de fase livre e no PM-05 para a retirada do combustível que migrava para o interior da garagem do prédio.



O efluente bombeado passava por uma caixa separadora de água/óleo e posteriormente foi reinfiltrado no solo a montante da área contaminada. Após 8 meses de funcionamento o sistema foi desligado devido a diminuição significativa da fase livre.

Com a finalização desta fase de bombeamento iniciou-se as etapas para a implantação de um sistema de remediação que utilizaria, como mecanismo principal, a indução da volatilização dos compostos ao mesmo tempo em que consideraria a potencialização direta do processo de biorremediação na porção central da contaminação ao aquífero, ou seja, na área de abastecimento e tancagem de combustíveis do Auto Posto Alfa. A ação na área central da pluma elimina o aporte de contaminantes para áreas jusantes, além de propiciar o fluxo de águas oxigenadas para estas áreas estimulando os processos de atenuação natural.

A proposta foi que a remediação seria totalmente realizada *in-situ*, através da metabolização da contaminação pela microbiota bacteriana local, sem geração de matrizes contaminadas e, principalmente, pela volatilização dos compostos no solo e água subterrânea. O Sistema de Remediação do Posto de Serviços Alfa visou a oxigenação do meio através das técnicas de *SVE* e *Air Sparging* (*Boisparging*).

Antes do ensaio piloto e das etapas construtivas do sistema foi realizada uma campanha de monitoramento, final da fase de bombeamento, com a coleta de 9 amostras de água subterrânea. A **Tabela 7.3 (Anexo 2)** apresenta os resultados analíticos das amostras assim como a **Figura 7.3 (Anexo 1)** apresenta a pluma de contaminação para este período e a **Figura 7.3.b (Anexo 1)** o mapa potenciométrico do período..

### 7.3.1. Teste Piloto

Após a escolha do sistema de remediação mais eficiente segundo as condições geológicas e ambientais do local foi realizado um ensaio piloto de *Air Sparging* e um ensaio piloto de Extração de Vapores no Solo (*SVE*).



No entanto antes da execução do ensaio piloto foi confeccionado um ábaco de pressão por profundidade para uma idéia prévia das pressões máximas e mínimas de injeção no solo, assim como a calibração correta dos aparelhos utilizados no ensaio.

Este ábaco foi confeccionado utilizando-se dados previamente recolhidos durante a investigação inicial e formulas teóricas para o cálculo das pressões do solo e da água.

Para a confecção para o cálculo foi utilizado um peso específico do solo de 2,2 ,uma porosidade de 0,45 e a profundidade da seção filtrante variável até 20 metros. Para o cálculo da pressão do solo foi utilizada a seguinte fórmula:

$$P_s = ( \Lambda ) \times \delta_s \times ( 1-\Phi_s ) \times ( 9,8 \text{ kN/m}^3 )$$

Onde:

$P_s$  = Pressão do solo ( $\text{kN/m}^2$ )

$\Lambda$  = Profundidade da seção filtrante (m)

$\Phi_s$  = Porosidade do solo

$\delta_s$  = Peso específico do solo

Com relação ao cálculo da pressão hidrostática utilizou-se 1 para o peso específico da água, 0,45 para a porosidade e a mesma variação na profundidade da seção filtrante. A fórmula que possibilita o cálculo da pressão hidrostática é a seguinte:

$$P_w = (P_{Rsf} - P_{Rna}) \times (\delta_a) \times (\Phi_s) \times (9,8 \text{ (kN/m}^3))$$



Onde:

$P_w$  = Pressão hidrostática ( $\text{kN/m}^2$ )

$PR_{sf}$  = Profundidade do topo da seção filtrante (m)

$PR_{na}$  = Profundidade do nível d'água (m)

$\Phi_s$  = Porosidade do solo

$\delta_a$  = Peso específico da água

A pressão total foi calculada somando-se a pressão do solo com a pressão hidrostática. A **Tabela 7.3.1. (Anexo 2)** apresenta os resultados dos cálculos das pressões conforme a profundidade da seção filtrante.

O objetivo principal da utilização deste ábaco, além de servir para nortear o ensaio piloto, foi estabelecer as pressões máximas de injeção de ar conforme a profundidade, pois excedendo-se este máximo podem ocorrer fraturamentos no subsolo que ocasionariam caminhos preferenciais de percolação do ar. A **Figura 7.3.1. (Anexo 1)** apresenta o ábaco de pressões para injeção de ar no aquífero.

Para a execução do ensaio foi utilizado um sistema piloto composto por compressor radial e tanques, e uma estrutura subterrânea composta por poços de extração, injeção e monitoramento. O ensaio é executado com elevado nível de controle e monitoramento das respostas do aquífero em função da aplicação de diferentes condições de operação.

Os resultados obtidos com o ensaio piloto forneceram a base de dados necessária ao dimensionamento do sistema, que foi projetado de forma a atuar por toda a área contaminada, definindo-se a locação e a quantidade de poços necessária ao sistema de remediação.

O ensaio piloto também forneceu subsídios ao cálculo das taxas de remoção de contaminantes do sistema, permitindo estimar o período de tempo de operação necessário a atingir os objetivos do projeto.



Para permitir a execução dos ensaios foram instalados um poço de injeção de ar (AS-01), um poço de extração de vapores (EV-01) e 4 poços de observação (PO-01 a PO-04), locados conforme as **Figuras 7.3.1.1. e 7.3.1.2. (Anexo 1)**.

A **Tabela 7.3.1.b. (Anexo 2)** resume as características dos poços instalados para a execução do ensaio, onde se observa a construção de poços de observação com seções filtrantes posicionadas em dois níveis diferentes (zona saturada e zona não-saturada). Os perfis construtivos e litológicos dos poços estão na **Figura 7.3.1.2. (Anexo 1)**

A **Figura 7.3.1.3. (Anexo 1)** ilustra a seção geológica da área do ensaio. Já a **Figura 7.3.1.4. (Anexo 1)** apresenta as isoconcentrações de VOC's em perfil no solo. As plumas foram elaboradas através da interpolação linear das medições efetuadas com um aparelho GASTECH 1238 ME, durante as sondagens para instalação dos poços.

Para permitir a execução do ensaio foi instalado um sistema de extração de vapores composto por um compressor radial CRE-05 ELAM (com 7,5 cv de potência), tanques dessecadores de 200 L (TQ-01 e TQ-02) e quadros de válvulas em PVC (diâmetro de 75 mm). O sistema foi conectado ao poço EV-01 através de um tubo de amostragem em PVC (diâmetro de 110 mm) dotado de válvulas para amostragem de gases e tomadas para medição de vazão.

O poço de injeção AS-01 foi conectado ao sistema de ar comprimido do Posto; uma ramificação do sistema foi construída, e a linha de injeção do poço foi montada com mangueiras de ½", um filtro regulador de pressão (PI-01, com manômetro), um rotâmetro (FI-01) e um manômetro (PI-02, na boca do poço). Nos poços de monitoramento foram instaladas válvulas de amostragem que permitem a coleta de vapores imediatamente acima da zona saturada concomitante à inserção de aparelhos de medição no poço (para medições como, por exemplo, nível d'água e oxigênio dissolvido). A **Figura 7.3.1.5. (Anexo 1)** apresenta o fluxograma do ensaio piloto.



#### 7.3.1.1 Ensaio piloto de *Air Sparging*

O ensaio piloto de AS teve a duração total de 48 horas, ocorrendo a injeção de ar no AS-01 e monitoramento da pressão, índices de VOC's, oxigênio gasoso e dissolvido e variação do nível d'água nos poços de observação e poços de monitoramento/bombeamento. Foram efetuadas as medições listadas na **Tabela 7.3.1.1. (Anexo 2)**.

O gráfico da **Figura 7.3.1.6. (Anexo 1)** ilustra a variação da pressão de injeção de ar (no sistema e no poço) e do fluxo de ar injetado. Observa-se que o fluxo injetado na aquífero foi de, em média,  $8,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , à pressão aproximada de 29 PSI. O poço de injeção AS-01 respondeu de maneira anômala, tendo sido observados neste ponto valores de pressão estática da ordem de 5 PSI.

As **Figuras 7.3.1.7. e 7.3.1.8. (Anexo 1)** ilustram a pressão estática observada nos poços de observação a diferentes distâncias do poço AS-01, no horizonte raso e no horizonte profundo. A geração de pressão estática ocorre quando o ar injetado atinge o poço de observação e o mesmo encontra-se fechado. Observa-se que foi detectada pressão nos poços de observação no horizonte profundo somente a menos de 2 m de distância do AS-01 (PO-02P). Já no horizonte raso, foi observada influência até aproximadamente 6 m de distância do AS-01.

As **Figuras 7.3.1.9. e 7.3.1.10. (Anexo 1)** ilustram a elevação do nível d'água obtido durante o ensaio de AS. Esta elevação é reflexo do aumento de volume da zona saturada por consequência da injeção de ar. Foi observada elevação no nível d'água em todos os poços de observação profundos e poços de monitoramento/bombeamento, em diferentes ordens de grandeza (distância máxima de 7,25 m). No horizonte raso, foi observada elevação somente até 2,0 m de distância do AS-01; a 5 m, a elevação foi zero.

As **Figuras 7.3.1.11. e 7.3.1.12. (Anexo 1)** mostram o incremento obtido nos índices de oxigênio presentes no interior dos poços de observação. O oxigênio incrementado nesses poços é proveniente da injeção de ar no aquífero, se



acumulando no interior dos poços de observação após migrar pela zona saturada. Observou-se incremento no horizonte profundo até 2 m de distância do AS-01, e em até 5 m no horizonte raso.

As **Figuras 7.3.1.13. e 7.3.1.14. (Anexo 1)** referem-se ao incremento obtido nas taxas de oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas, que é um indicador direto da quantidade de oxigênio disponibilizado às bactérias. Observou-se incremento a até 2 m de distância do poço AS-01, nos horizontes raso e profundo.

Ao final do teste piloto verificou-se que o *Air Sparging* possuía aplicabilidade na remediação da área com o raio de influência de 5m, sob injeção de ar à vazão de 8,5 m<sup>3</sup>/h (por poço) e à pressão de 29 PSI.

#### 7.3.1.2 Ensaio piloto de Extração de Vapores no Solo (SVE)

O ensaio piloto de EVS foi realizado através da extração de vapores a partir do poço EV-01 durante 180 minutos. Neste período de tempo foram monitorados o vácuo e o fluxo de vapores gerado no poço de extração, concomitantemente à determinação do vácuo, nível d'água e índices de oxigênio gasoso nos poços de observação rasos. A **Tabela 7.3.1.2. (Anexo 2)** apresenta estes resultados.

A **Figura 7.3.1.15. (Anexo 1)** integra as medições de vácuo efetuadas nos poços de observação ao longo do ensaio. Observa-se maior equilíbrio e estabilidade nas medições efetuadas entre 25º e 85º minutos do ensaio. Estas medições foram normalizadas em função da distância e do vácuo gerado no poços de extração, ditando assim a dinâmica de dispersão do vácuo no aquífero.

A **Figura 7.3.1.16. (Anexo 1)** traz a distribuição do vácuo em gerado em função da distância do poço EV-01. Os valores lançados correspondem aos índices de vácuo nos poços de observação durante o período de maior estabilidade no ensaio. Observa-se, pela linha de tendência gerada, a influência do vácuo a até 5 m



de distância do EV-01, caracterizando este valor como raio de influência para aplicação do EVS na área.

Os valores de fluxo de extração e concentrações de VOCs nos vapores extraídos permitem estimar a taxa de remoção de compostos voláteis através de EVS na área. Este valor foi estimado em 1,4 kg/dia, tomando-se como composto de referência o hexano (gás utilizado na calibração do aparelho GASTECH 1238 ME).

### **7.3.2. Sistema de Remediação**

Com base nos dados obtidos através da execução do ensaio piloto, determinou-se as características operacionais do sistema, dimensionado segundo as seguintes premissas.

Para o Sistema de Extração de Vapores do Solo:

- 05 poços de EVS;
- Vazão de extração de ar de 10 m<sup>3</sup>/h;
- Vácuo operacional nos poços de 1,5 mca;
- Raio de influência de 5 metros;

Para o Sistema de Air Sparging:

- 05 poços de AS;
- Vazão de injeção de ar de 1,5 m<sup>3</sup>/h por poço;
- Raio de influência de 5 metros;



Os limites alvo da remediação serão as concentrações estabelecidas pela análise de risco, a **Tabela 7.3.2. (Anexo 2)** apresenta as concentrações alvo da remediação.

O sistema de remediação implantado foi a Extração de Vapores do Solo (SVE) em conjunto com *Air Sparging*.

A técnica de SVE utiliza um exaustor para geração de vácuo na zona não saturada através dos poços de extração. O ar é extraído à uma vazão total média de 50 m<sup>3</sup>/h do solo e é descartado na atmosfera através de uma chaminé. O vácuo gerado provoca a migração de ar através dos poros do solo, promovendo assim a retirada dos hidrocarbonetos oriundos da volatilização dos mesmos em fase dissolvida, e favorecendo a biodegradação dos compostos orgânicos voláteis (VOC's) presentes.

A técnica de *Air Sparging* utiliza um compressor para injetar ar no aquífero, através dos poços de injeção, na vazão de 1 m<sup>3</sup>/h @ 6-8 psi. A injeção de ar promove a oxigenação do meio e o arraste dos compostos orgânicos voláteis, presentes em fase dissolvida, em direção à zona-não-saturada. O aumento das concentrações de oxigênio no aquífero potencializa a biodegradação aeróbia do meio. O fluxo do ar injetado no solo é ajustado através de válvulas reguladoras de pressão.

Os perfis construtivos e litológicos dos poços de SVE e AS instalados se encontram na **Figura 7.3.2.. A Figura 7.3.2.1. (Anexo 1)** apresenta a localização dos poços do sistema de remediação.

A distribuição dos poços foi determinada através da zona de influência estabelecida pelos ensaios pilotos e pela delimitação da área fonte da contaminação. A **Figura 7.3.2.2. (Anexo 1)** apresenta o arranjo final do sistema.



### 7.3.3. Monitoramento ambiental

Em razão da meta de consumo estabelecida pelo cliente, a operação dos equipamentos do sistema de remediação se deu de forma controlada, operando 14 horas por dia e desligando automaticamente à noite para observância da meta de consumo estipulada.

Durante a campanha de monitoramento foram coletadas 4 amostras de água subterrânea, provenientes dos poços PM-04, PM-05, PM-06 e PM-08 (**Figura 7.3.3.1. no Anexo 2**). A coleta seguiu o procedimento interno de amostragem de águas subterrâneas e superficiais SQ-011 (CSD-GEOKLOCK). As amostras foram enviadas a laboratórios especializados para a análise de BTXE e TPH C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>

Os resultados analíticos das águas subterrâneas provenientes dos poços de monitoramento foram comparados com as concentrações limites estabelecidas pela Análise de Risco (RBSL) e também com aquelas obtidas nas campanhas anteriores. A **Tabela 7.3.3. (Anexo 2)** apresenta os resultados analíticos de BTXE e TPH C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub> obtidos em todas as campanhas realizadas para os poços de interesse, assim como os valores RBSL calculados.

Os pontos amostrados sofreram significativa redução nas concentrações de hidrocarbonetos presentes em fase dissolvida na água subterrânea, com exceção do PM-05, que apresentou ligeira elevação nas concentrações de benzeno, tolueno e etilbenzeno, sem contudo superar os valores limites calculados na Análise de Risco. Todos os resultados analíticos das águas subterrâneas amostradas apresentaram concentrações inferiores aos RBSL calculados.

Um dos principais objetivos desta etapa do monitoramento visa quantificar a massa de combustível removida em fase vapor.

A quantificação da fase vapor removida, compreendendo os compostos orgânicos voláteis (VOC's), presentes na composição do combustível, foi realizada



através de medições periódicas na saída da bomba de vácuo. Estas medições foram realizadas com o auxílio de um ionizador de chamas, marca GASTECH<sup>®</sup>, o qual fornece leituras de VOC's em ppm-v. O citado medidor é calibrado com hexano, de peso molecular 86 g/g mol, sendo que os cálculos de massa de VOC's removida são expressas em equivalentes de hexano, através da seguinte equação:

$$Q = Q \times C$$

Onde:

Q = taxa máxima removida (Kg/h)

Q = vazão dos gases na saída da bomba de vácuo (m<sup>3</sup>/h)

C = concentração de VOC's (Kg/m<sup>3</sup>)

A concentração de VOC's é obtida através da seguinte equação:

$$C = PM \times \text{ppm-v} / 24,45$$

Onde:

C = concentração de VOC's em mg/m<sup>3</sup>

PM = peso molecular do equivalente hexano (86 g/g mol)

ppm-v = leitura obtida através do ionizador de chamas

24,45 = volume molar em litros (760 mmHg @ 25° C)

As medições periódicas das concentração de VOC's, em ppm-v, juntamente com as medições das vazões, permitiram calcular através das equações acima, a massa de compostos orgânicos em fase de vapor, removidas do *site* através dos poços de extração. Neste período, esta massa foi calculada em aproximadamente 179,9 Kg. A **Tabela 7.3.3.1. (Anexo 2)** apresenta os resultados das medições



durante cinco meses de operação do sistema. A **Figura 7.3.3.2. (Anexo 1)** apresenta o gráfico com a evolução da remoção da massa de contaminantes.

#### **7.3.4. Finalização do sistema**

Sete meses após o início da operação do sistema foi realizada uma nova campanha de amostragem das águas subterrâneas, com a coleta de 4 amostras nos poços de interesse (PM-04, PM-05, PM-06 e PM-08). Os resultados das análises químicas desta campanha e das anteriores estão apresentados na **Tabela 7.3.4.1 (Anexo 2)**.

Ao final destes 7 meses de operação foram removidos 250,6 Kg de massa de contaminantes através da extração de vapores. A **Tabela 7.3.4.2 (Anexo 2)** apresenta os dados do monitoramento de gases durante estes sete meses. A **Figura 7.3.4.1 (Anexo 1)** apresenta o gráfico com a evolução da remoção da massa de contaminantes.

Os resultados das análises mostram que todos os compostos analisados estão abaixo dos limites estabelecidos para a área (RBSL). Sendo significativa a diminuição das concentrações desde o *start-up* do sistema..

Assim verificou-se que após 7 meses de funcionamento do sistema de remediação as concentrações de compostos orgânicos de interesse, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, nas águas subterrâneas, foram continuamente reduzidas atingindo concentrações inferiores aos valores de RBSL definidos pela Análise de Risco. Além disto o sistema de remediação atuou de forma efetiva removendo 250,6 kg de VOC's através do sistema de extração de vapores. Com isto o sistema de remediação foi desativado 7 meses após sua instalação.

Foi realizada mais uma campanha de monitoramento de água subterrânea em 10 meses após a desativação do sistema. A **Tabela 7.3.4.3 (Anexo 2)** apresenta os resultados desta campanha. Em nenhuma das amostras foram



observadas concentrações acima do limite estabelecido pela análise de risco na área, corroborando a eficácia do sistema.

Os resultados desta amostragem após o desligamento de sistema apresentou um pequeno aumento nas concentrações em relação a campanha anterior, isto pode ser explicado por um possível efeito de *rebound* na área, ou seja, com o desligamento do sistema o meio precisa de um tempo para alcançar um novo equilíbrio físico-químico e as novas condições estabilizadas podem favorecer a mobilização de alguma massa restante de contaminante que podia estar adsorvida ou absorvida no solo da zona saturada ou insaturada.

Optou-se em realizar, nesta mesma data, uma nova campanha de amostragem de solo para a verificação de possíveis contaminações residuais no solo. Para tal foram realizadas 3 sondagens dentro da área de interesse com a coleta de 3 amostras de solo.

Os resultados obtidos demonstram que a área representada pela sondagem S-03 e localizada entre as bombas de abastecimento do posto encontra-se remediada com relação a contaminação por combustíveis, uma vez que os compostos Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e a somatória dos Xilenos não foram detectados na amostra coletada. A análise para TPH<sub>GRO</sub> acusou 0,2 mg/kg para essa amostra, próximo ao limite de detecção do método utilizado (0,1 mg/Kg). O mesmo ocorre para a amostra retirada da S-02, localizada próxima à lavagem. Neste ponto os compostos BTXE também não foram detectados, e a análise para TPH<sub>GRO</sub> apresentou uma concentração de 17,4 mg/Kg. A amostra coletada na S-01 (próxima à calçada e ao PM-07) acusou concentrações detectáveis de BTXE e TPH<sub>GRO</sub>, entretanto essas concentrações encontram-se abaixo dos limites calculados na análise de risco e que servirem de concentrações alvo para a remediação. A **Tabela 7.3.4.4. (Anexo 2)** apresenta os dados das amostras coletadas assim como os resultados analíticos obtidos,



## 9. CONCLUSÃO

A apresentação conceitual foi de grande valia para o entendimento dos mecanismos atuantes que devem ser observados frente à utilização deste sistema, contudo observou-se uma deficiência de estudos científicos brasileiros que discutam os tópicos abordados.

Apesar do sistema *Air Sparging* ser uma tecnologia já consagrada em âmbito mundial, sua adaptação frente a novas questões como a bioestimulação merecem grande destaque, principalmente pelos resultados positivos que vêm apresentando,

O acompanhamento de um caso real gerou a possibilidade de utilizar na prática os tópicos abordados. Em relação a este estudo de caso, após o desligamento do sistema e a campanha de amostragem após 10 meses deste foi possível concluir que:

- O sistema de remediação atuou de forma efetiva na redução das concentrações de hidrocarbonetos presentes nas águas subterrâneas, removendo 250,6 kg de VOC's através do sistema de extração de vapores.
- As concentrações de compostos orgânicos de interesse, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, nas águas subterrâneas, foram continuamente reduzidas durante a operação do sistema de remediação, atingindo concentrações inferiores aos valores de RBSL definidos pela Análise de Risco.
- Após cinco meses de funcionamento estas concentrações alvo estabelecidas para a remediação local já haviam sido atingidas.
- A amostragem de solo realizada após o desligamento do sistema, mostrou que nenhum constituinte excedia os limites estabelecidos para o solo local comprovando a remoção da massa impactante no solo.



Todos os dados aqui expostos levam a concluir que o caso apresentado corroborou a idéia inicial proposta neste trabalho onde a aplicação correta do sistema *Air Sparging* pode ser uma escolha confiável e eficiente para a remediação de plumas de compostos orgânicos.

Após os ensaios pilotos foi realizada uma estimativa para a taxa de remoção de Benzeno, principal composto contaminante, até os níveis desejados, esta projeção apontou um intervalo de tempo de 12 meses, após a instalação do sistema, para a meta estipulada. Esta projeção foi baseada no potencial de volatilização natural dos compostos e no aumento desta taxa com a indução proporcionada pelo método. No entanto, as metas foram atingidas praticamente na metade do tempo proposto. Isto se deve ao fato da biodegradação ter um papel decisivo no aumento da eficiência do sistema. Apesar de não ter sido possível um acompanhamento da taxa de degradação dos contaminantes, o excelente resultado foi fruto de sua ação junto a volatilização dos compostos.



## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. (1958). O Planalto Paulistano. In: A Cidade de São Paulo. Associação dos Geógrafos Brasileiros. p. 113-167. Sao Paulo.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), 1995. **Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites**. Designation E 1739-95.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1997. **Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem**. ABNT/NBR 13.895.
- BASS, D.H., HASTINGS, N.A.A, BROWN, R.A. (2000). Performance of Air Sparging Systems: A review of Cases Studies. Journal os Hazardous Materials, (72) 101-119p.
- BITTON, G. & GERBA, C.P. (1984). **Groundwater Pollution Microbiology**. John Wiley & Sons. N.Y. 377p.
- BROWN; HICKS, R.J. and HICKS, R.M. (1994) Use of air sparging for in situ bioremediation. In: Proceeding, HINCHEE, R. E. (1994) Air sparging for site remediation. P.38-55. Lewis Publishers. Boca Raton.
- CHAPELLE, F.H. (1992) **Groundwater microbiology & geochemistry**. New York. John Wiley & Sons Inc. 424p.
- COUTINHO, J.M.V. (1980). Carta geológica da região metropolitana da Grande São Paulo, 1:100.000. São Paulo, EMPLASA, 2 folhas.



FEENSTRA, S. D.; Mackay, M. and Cherry, J. A., 1991. A Method of Assessing Residual NAPL Based on Organic Chemical Concentrations in Soil samples. **Groundwater Monitoring Review**: 128-136.

FINOTTI, A. R. (1997). Estudo de Aplicabilidade do Modelo da Ação Corretiva Baseada no Risco (RBCA) em Contaminações Subterrâneas com Gasolina e Etanol. UFSC, **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental** (Dissertação de Mestrado). Brasil, Santa Catarina, Florianópolis:112.

FREEZE, R. A. & CHERRY (1979). **Groundwater**. Englewood Cliffs, Prentice Hall. 604p.

JOHNSO, P. C.; McWHORTER, D. B.; HINCHE, R. E.; GOODMAN, I. (1993). An overview of in situ Air Sparging. **Ground Water Monitoring Review**, 13(4); 127-135.

NORRIS, R.D.; HINCHEE, R. E.; BROWN, R.; McCARTY, P. L.; SEMPRINI, L.; WILSON, J.T.; KAMPBELL, D. H.; REINHARD, M.; BOUWER, E. J.; BORDEN, R. C.; VOGEL, T. M.; THOMAS, J. M.; WARD, C. H. (1992). **A review of technologies**. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory Office Of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. ADA, Oklahoma. pp. 157.

OLIVEIRA, E. de; CLEARY, R. W.; CUNHA, R. C. A.; PACHECO, A. (1991). Gasoline Hydrocarbons: Groundwater Pollution Potencial in Metropolitan São Paulo. **Water Science and Technology**, 11: 189-200.

RICCOMINI. C. (1989). O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 256p., São Paulo.

RICCOMINI. C. & COIMBRA, A.M. Geologia da Bacia Sedimentar. In: .Solos da Cidade de São Paulo, São Paulo, 1992.



SPILBORGHS, M.C.F. (1997) *Biorremediação de Aquífero Contaminado com Hidrocarbonetos*. São Paulo, 147 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

SUTHERSAN. SUTHAN. S. (1996) Remediation Engeering: design concepts. **Library of Congress Cataloging-in-Publication Data**, p, 27-185. EUA

TAKIYA, H. (1991). Aplicação de métodos quantitativos especiais a dados geológicos da Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 109p., São Paulo

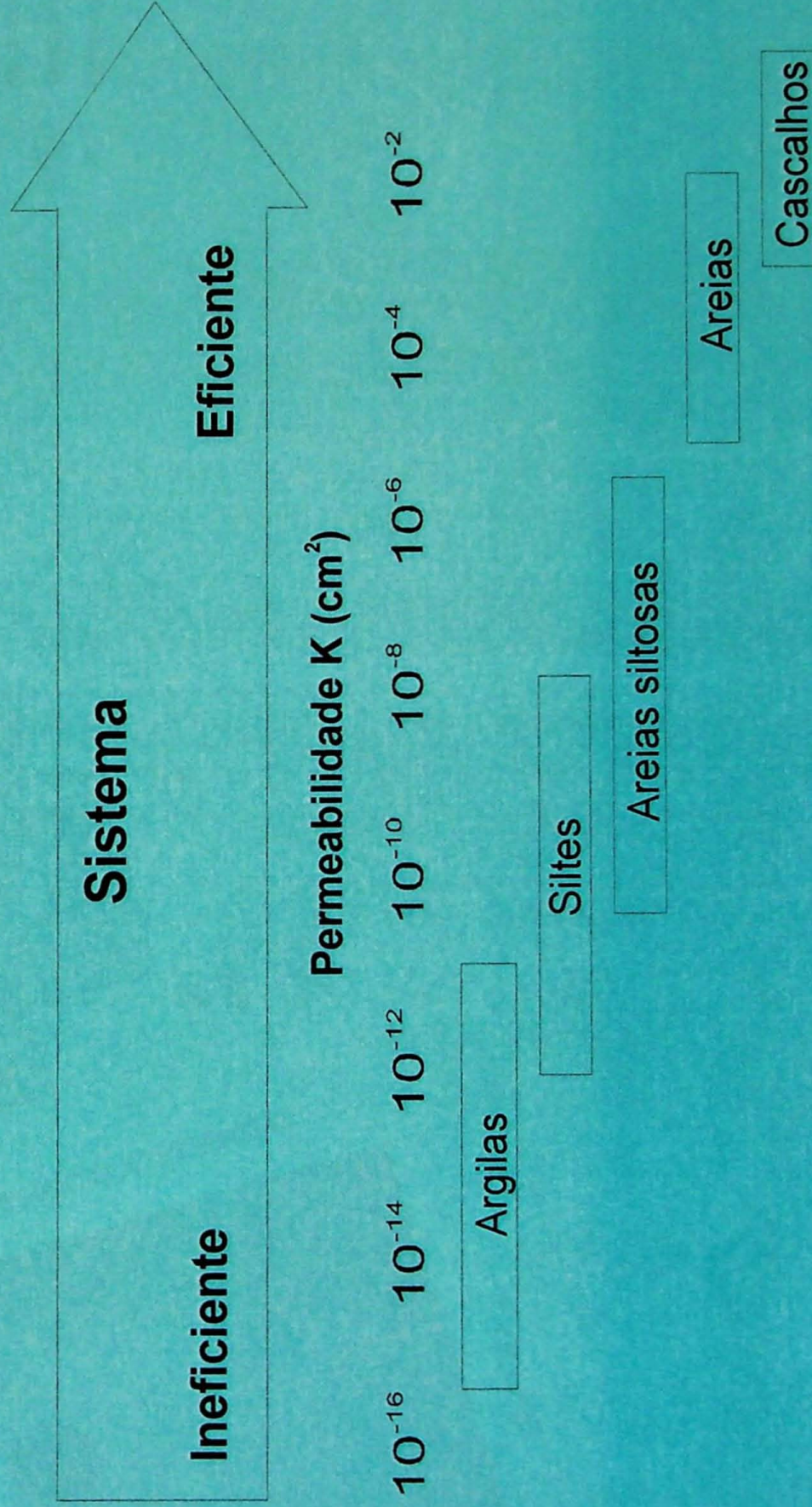


**ANEXO 1**

**FIGURAS**

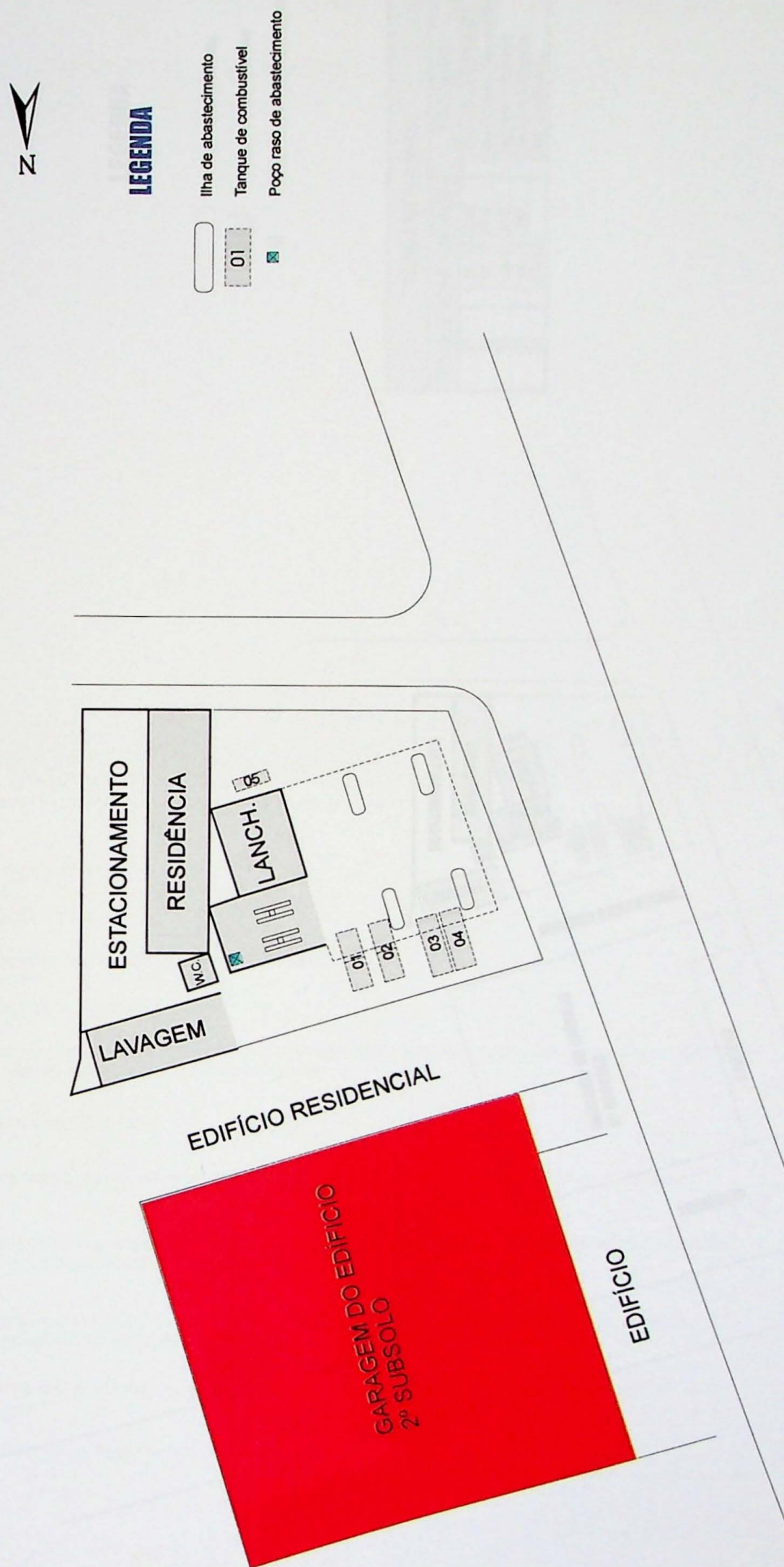


**Figura 6 - Relação entre Permeabilidade e Eficiência do sistema**





**Figura 7.1. - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO ONDE OCORREU INFILTRAÇÃO DE FASE LIVRE.**



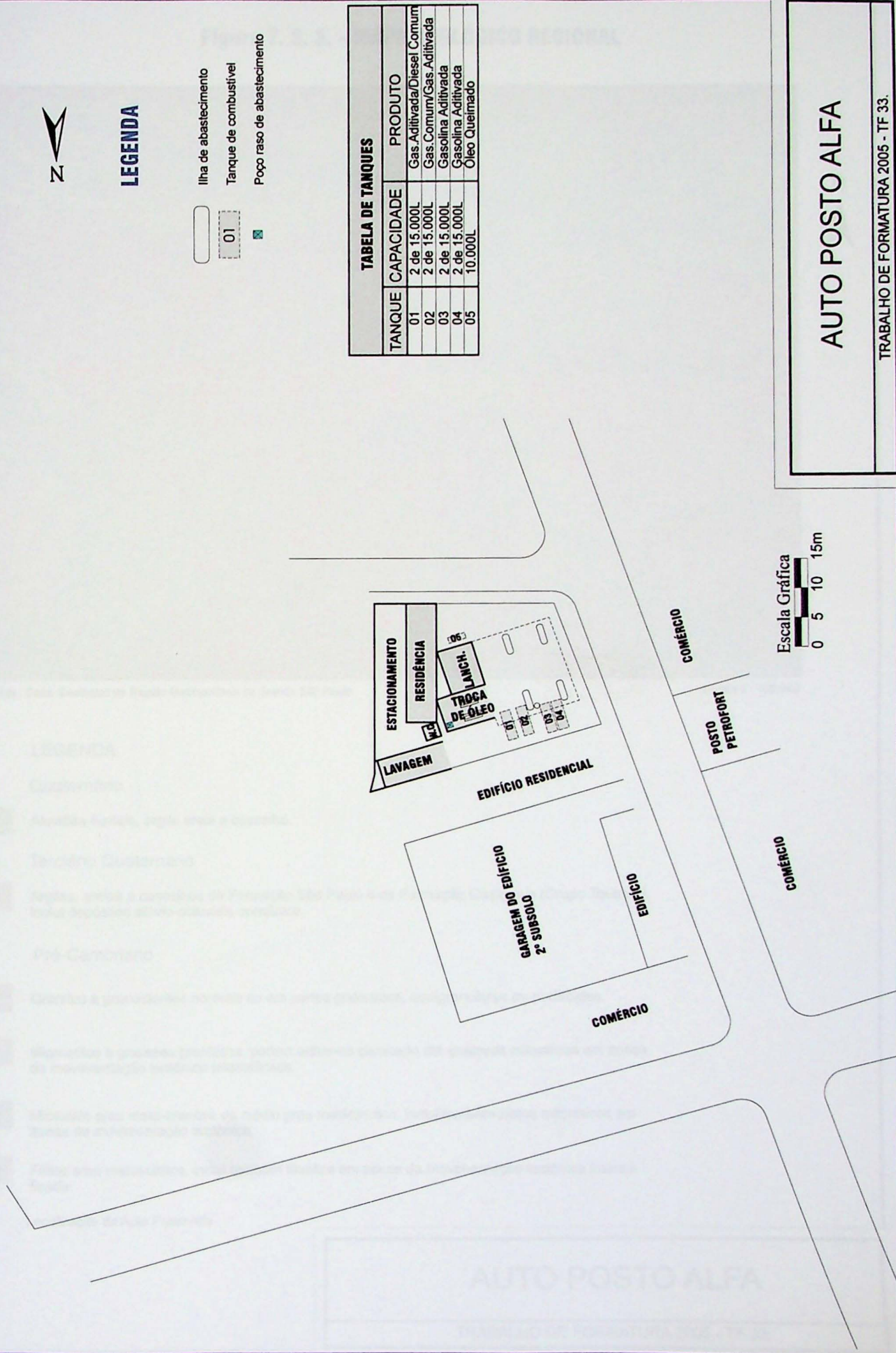
Escala Gráfica  
0 5 10 m

AUTO POSTO ALFA

TRABALHO DE FORMATURA 2005 - TF 33.



Figura 7.2.1. - ARRANJO FÍSICO E DISPOSIÇÃO GERAL DAS CONSTRUÇÕES NOS ARREDORES DO POSTO ALFA





**Figura 7. 2. 3. - MAPA GEOLÓGICO REGIONAL**



Fonte : Carta Geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo

Escala 1 : 100.000

## LEGENDA

### Quaternário

**Qa** Aluviões fluviais, argila areia e cascalho.

### Terciário Quaternário

**TQa** Argilas, areias e cascalhos da Formação São Paulo e da Formação Caçapava (Grupo Taubaté). Inclui depósitos elúvio-coluviais correlatos.

### Pré-Cambriano

**pCAg** Granitos a granodioritos normais ou em partes gnáissicos, equigranulares ou porfiróides.

**pCAmg** Migmatitos e gnaisses graníticos, podem achar-se cisalhado até gnaisses miloníticos em zonas de movimentação tectônica intensificada.

**pCAmx** Micaxisto e/ou meta-arenitos de médio grau metamórfico, inclui também xistos miloníticos em zonas de movimentação tectônica.

**pCAfm** Filitos e/ou metassiltitos, inclui também filonitos em zonas de movimentação tectônica intensificada.

**●** Localização do Auto Posto Alfa

**AUTO POSTO ALFA**



**FIGURA 7.2.3.1. - MAPA POTENCIOMÉTRICO GERADO NA INVESTIGAÇÃO INICIAL.**

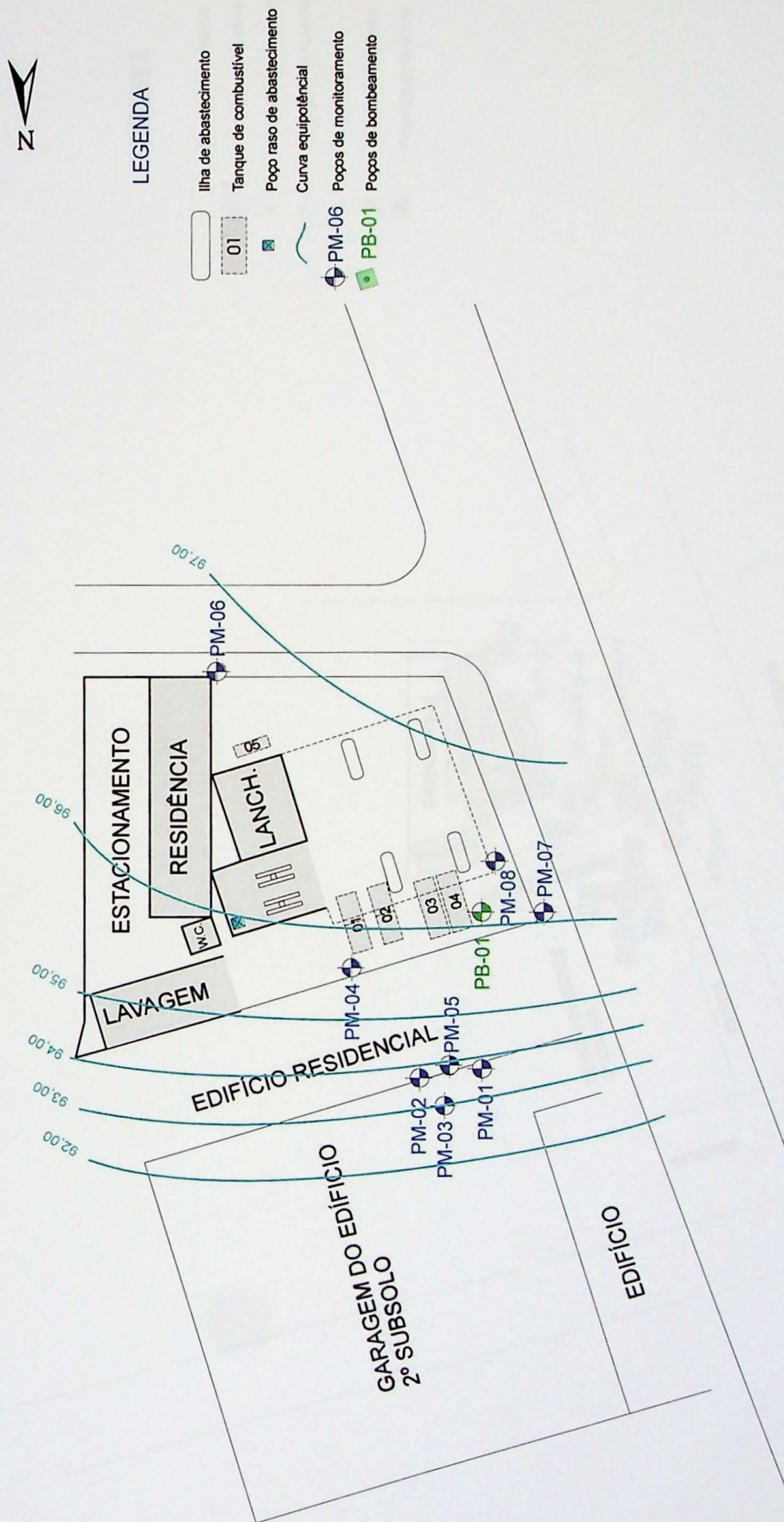




Figura 7.2.5.2. - MAPA DE INDÍCIOS DE PRODUTO NO SUBSOLO

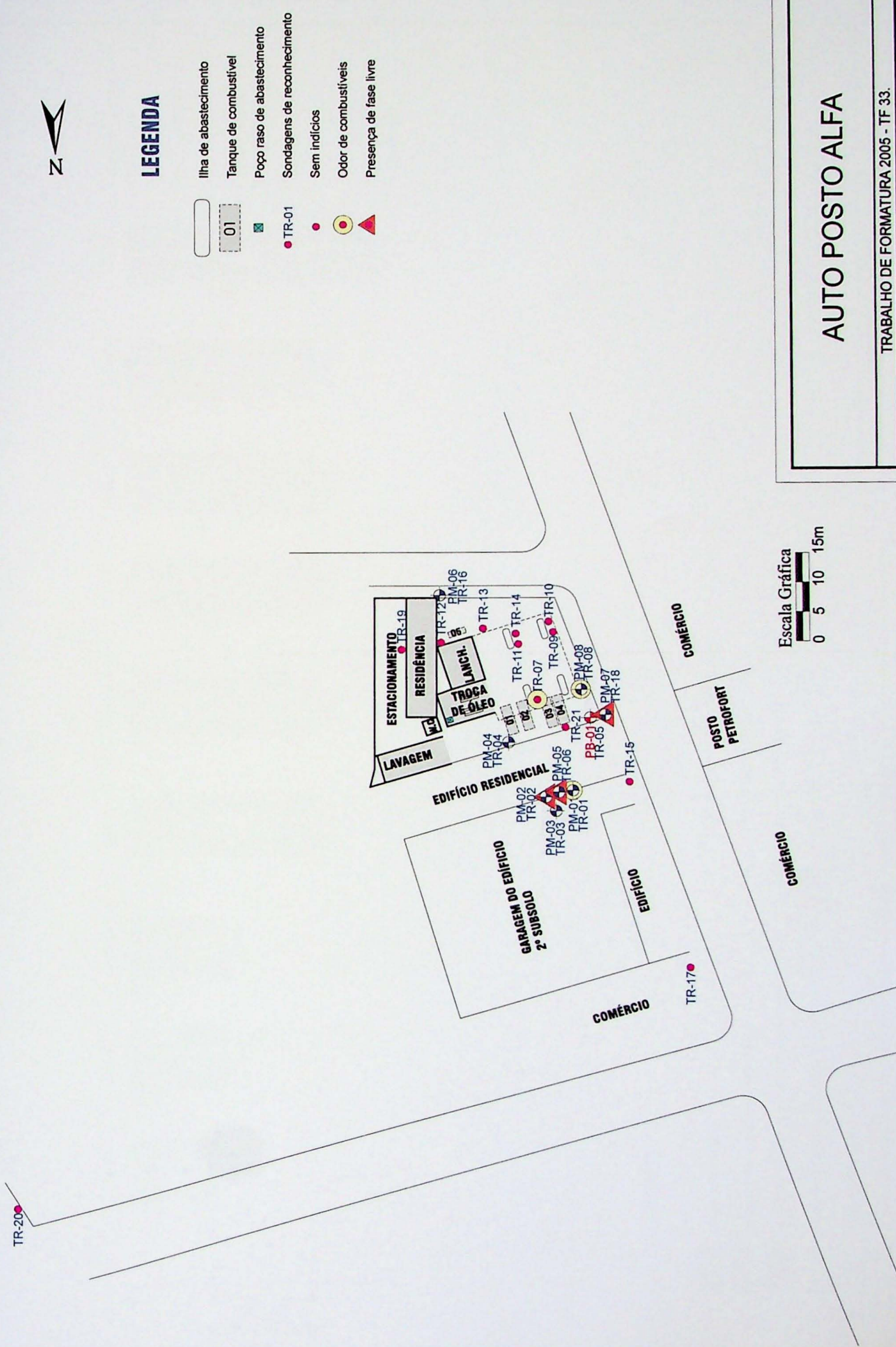
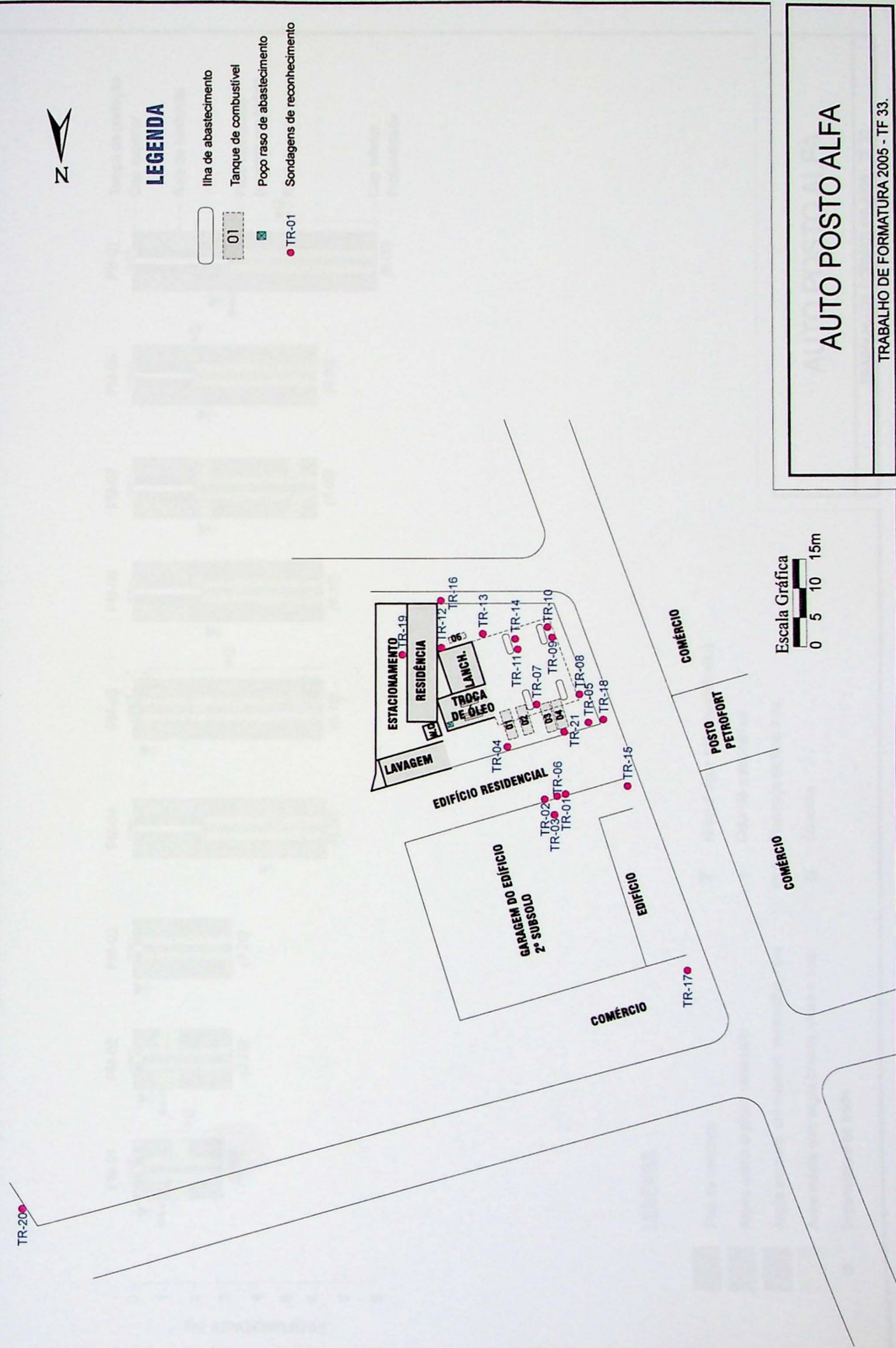


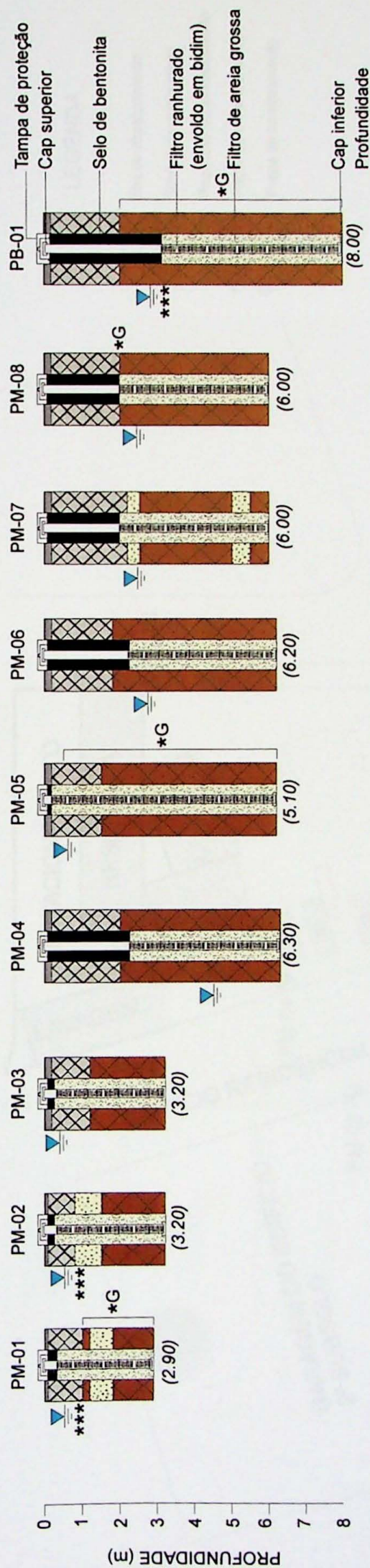


Figura 7.2.5.3.- MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS DE RECONHECIMENTO





**Figura 7.2.6.1. - PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO E BOMBEAMENTO**



### LEGENDA

	Piso de concreto		Nível d' água (não estabilizado)
	Aterro areno argiloso variegado		Odor de combustível
	Argila arenosa, cor marrom, vermelho, ocre		Presença de fase livre
	Areia média com argila branca, cinza e ocre		Gasolina
	Impenetrável ao trado		

**AUTO POSTO ALFA**

TRABALHO DE FORMATURA 2005 - TF 33.



FIGURA 7.2.6.2. - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO

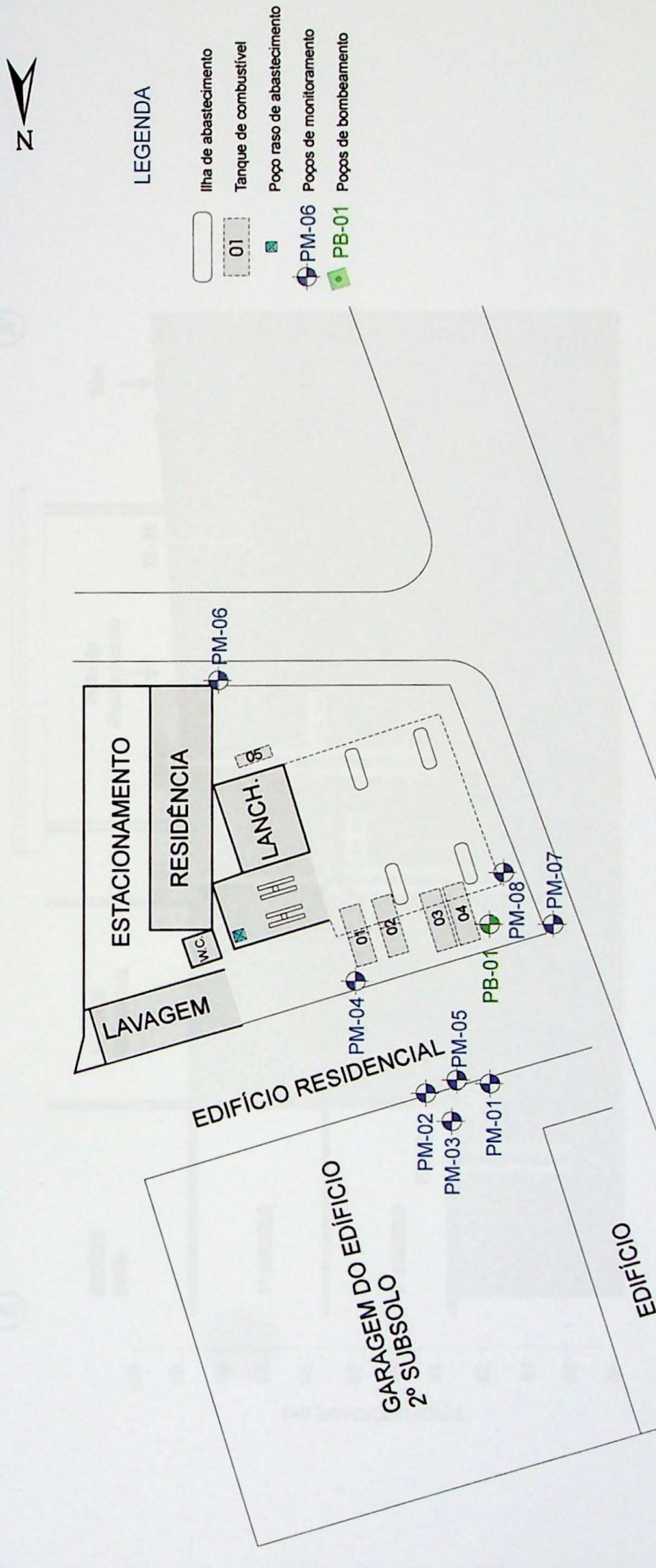
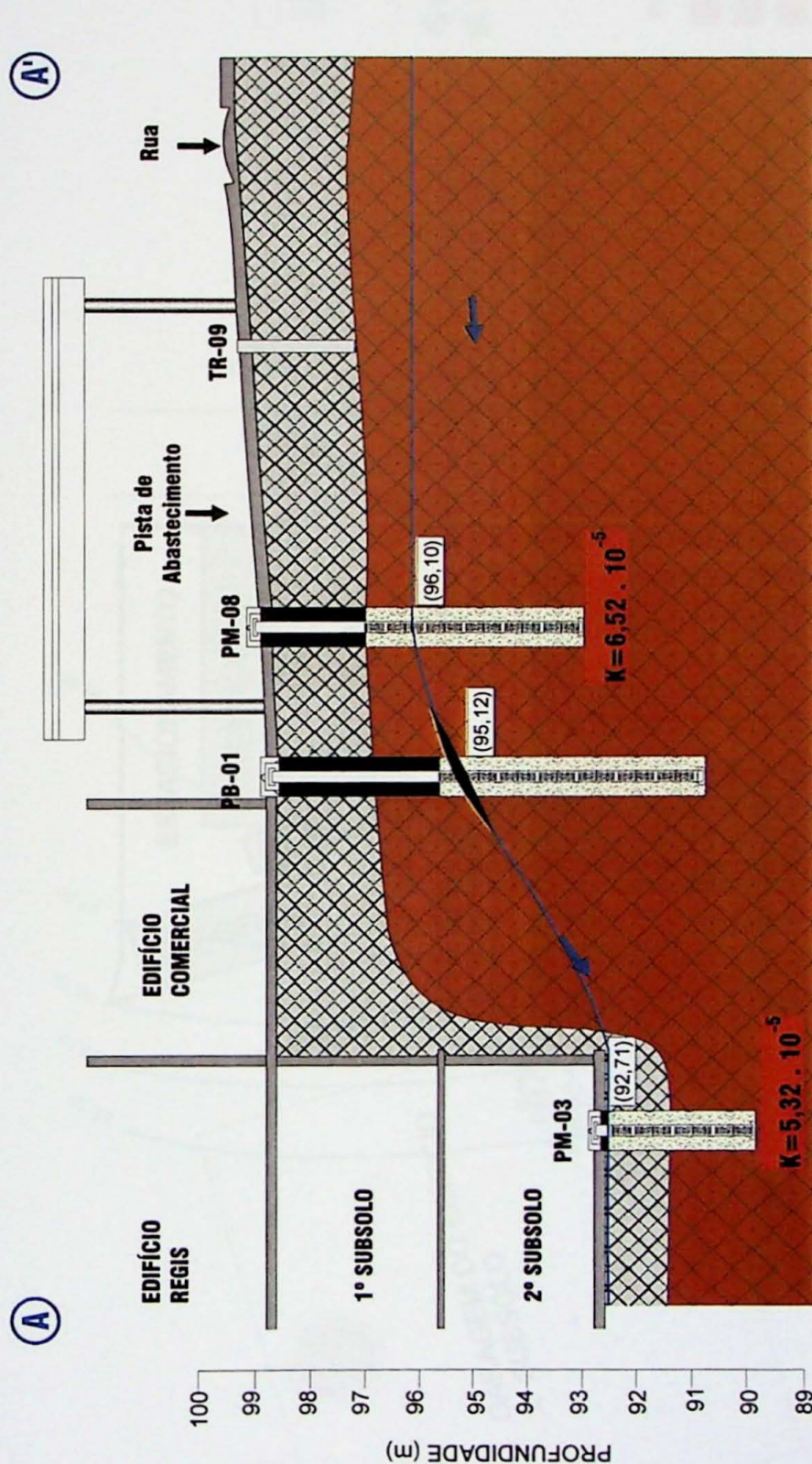




Figura 7.2.6.3. - SEÇÃO HIDROGEOLÓGICA A - A'



## LEGENDA

- Piso de concreto
- Aterro areno argiloso variegado
- Argila arenosa, cor marrom, vermelho, ocre
- Areia média com argila branca, cinza e ocre

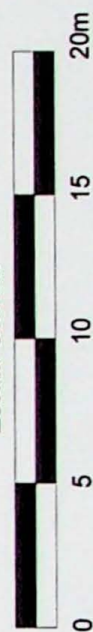
— Nivel d' água

[95,12] Carga hidráulica (m)  
(leitura 30/04/99)

**K** Condutividade hidráulica (cm/s)

Sentido do fluxo das águas subterrâneas

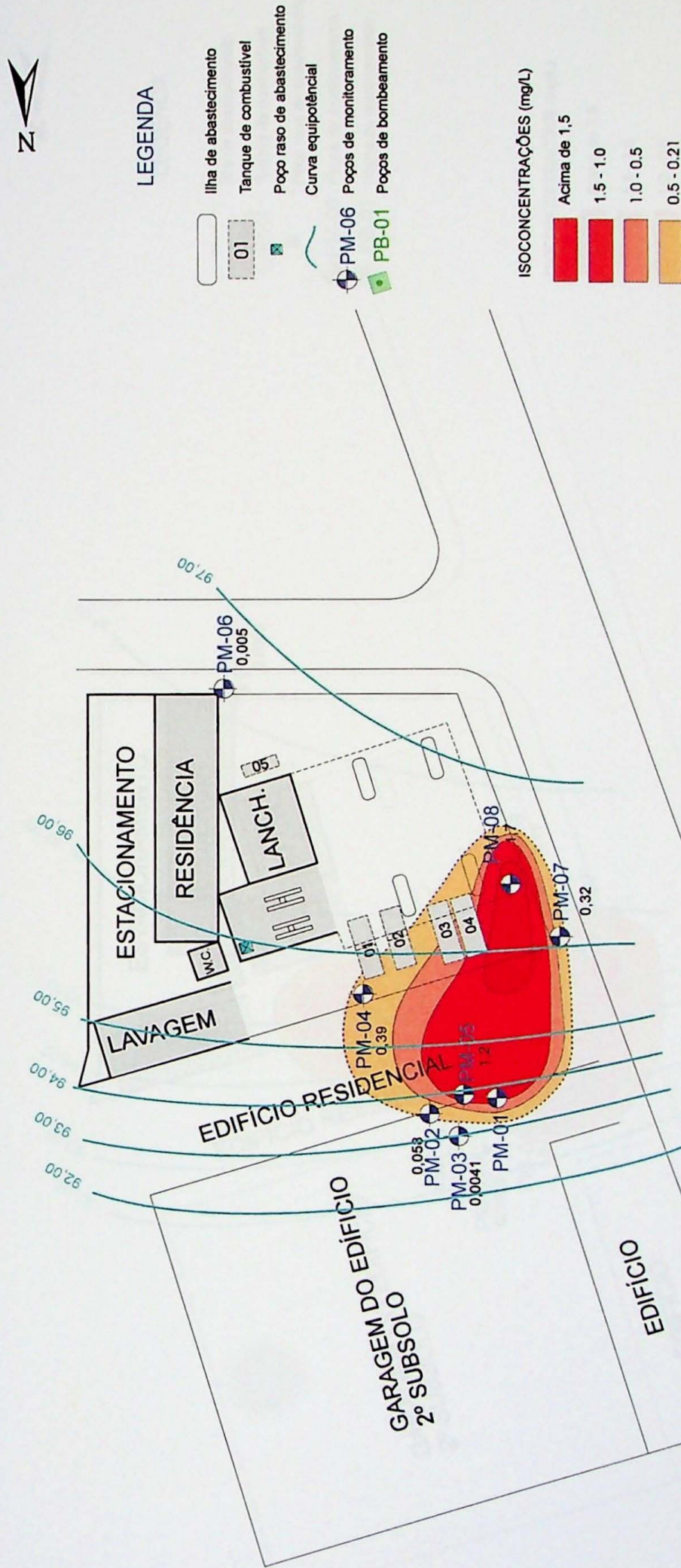
Escala Gráfica



AUTO POSTO ALFA



FIGURA 7.2.6.4. - PLUMA DE BENZENO MEDIDA NACAMPANHA INICIAL



Escala Gráfica

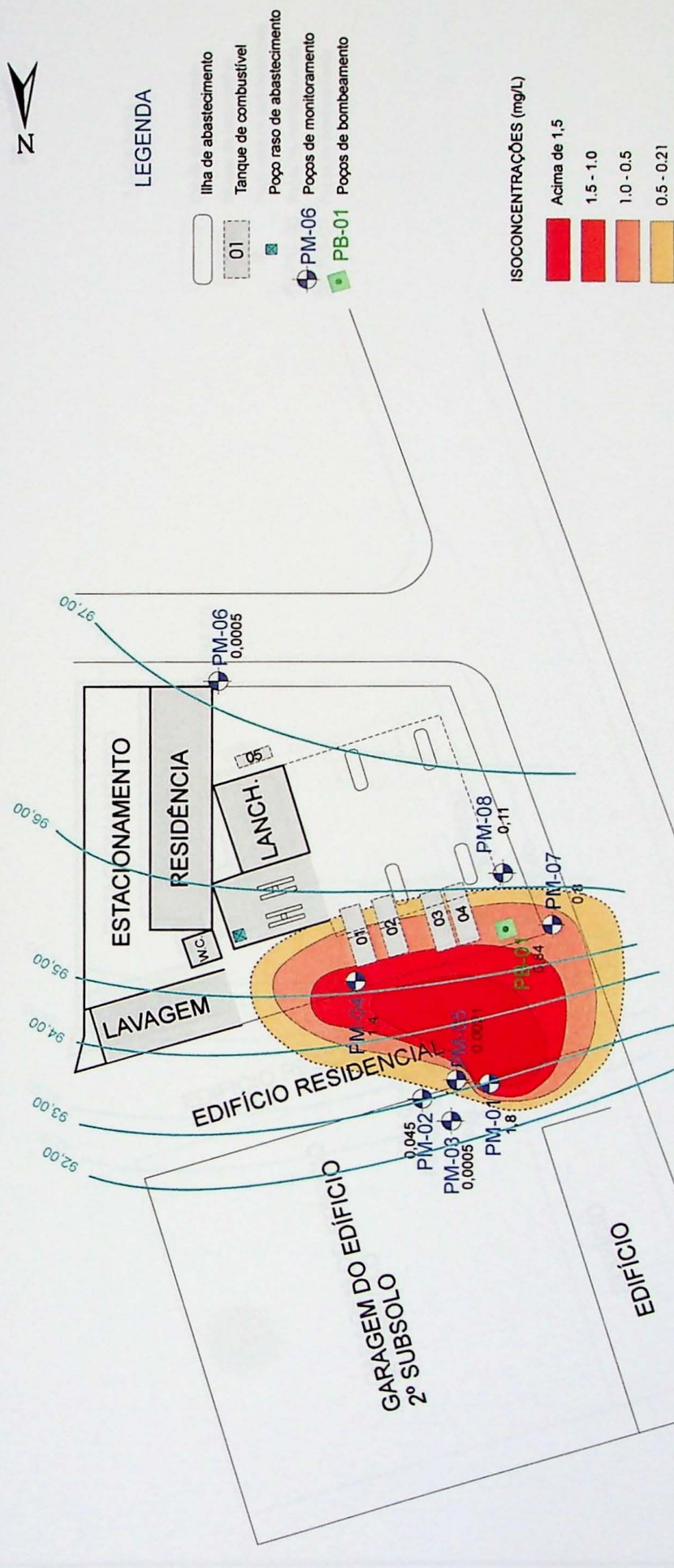
0 5 10 m

AUTO POSTO ALFA

TRABALHO DE FORMATURA 2005 - TF 33.



**FIGURA 7.3. - PLUMA DE BENZENO ANTES DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO**



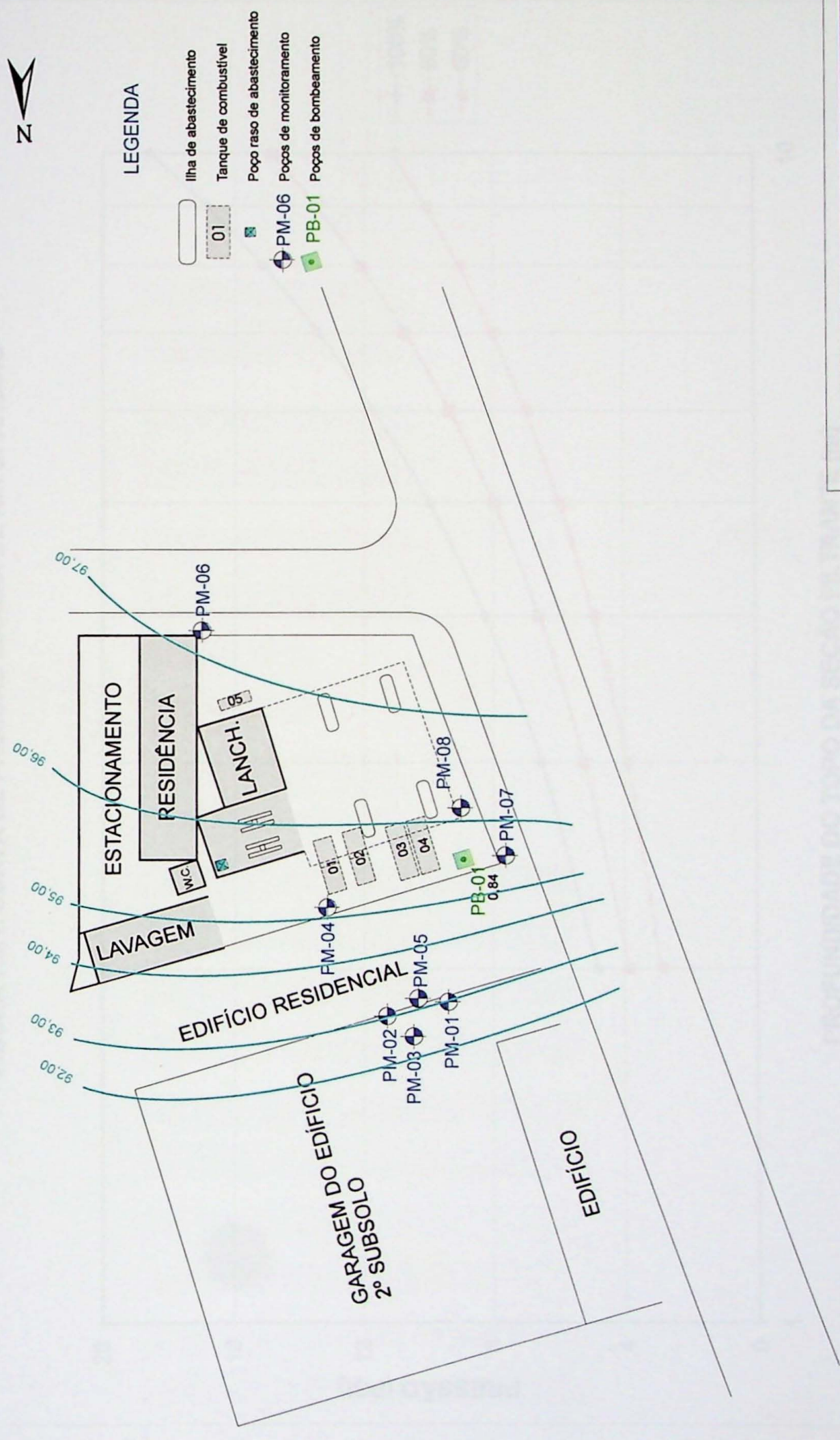
Escala Gráfica

# AUTO POSTO ALFA

TRABALHO DE FORMATURA 2005 - TF 33.



FIGURA 7.3.b - MAPA POTENCIOMETRICO ANTES DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO



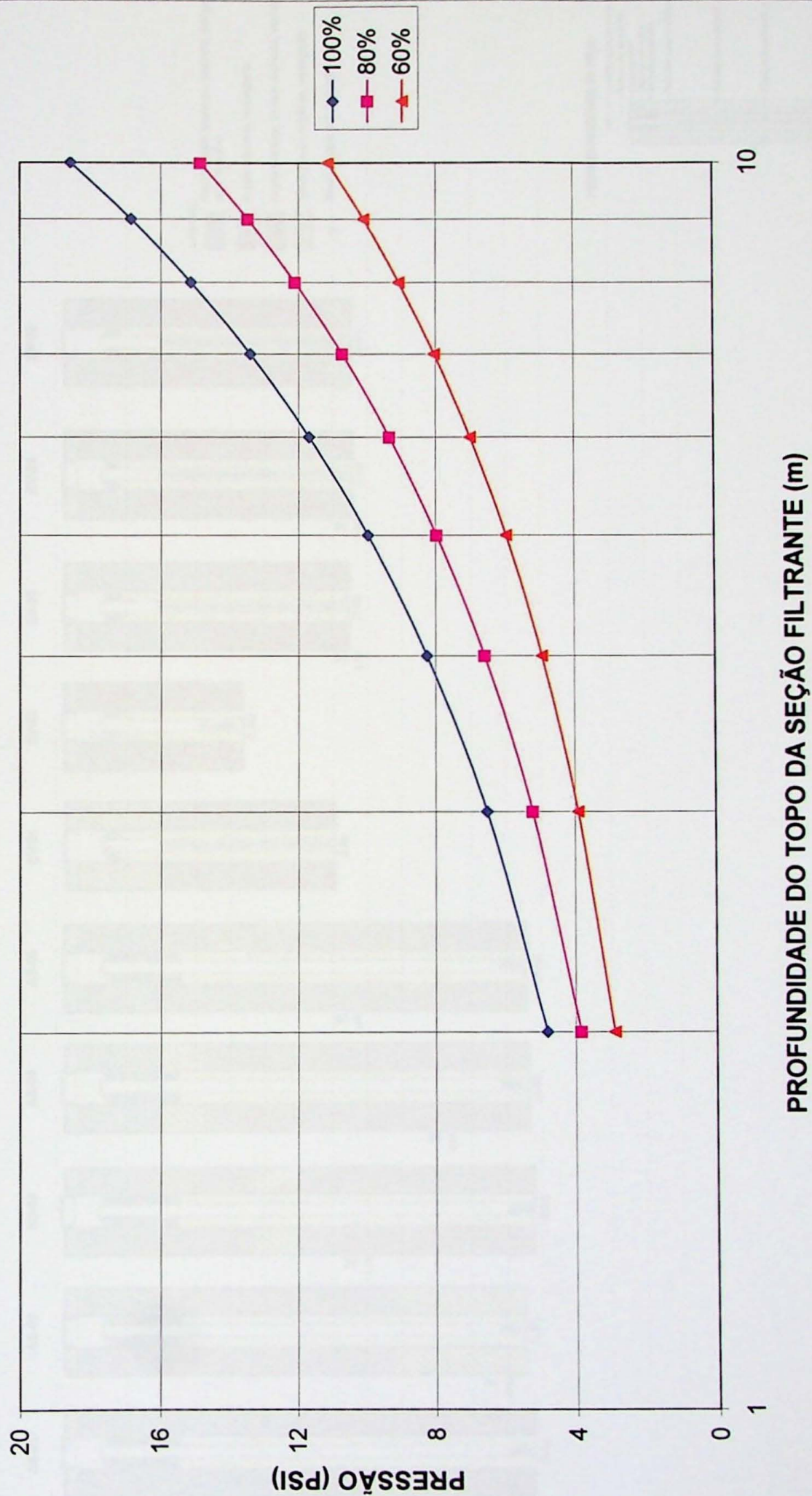
Escala Gráfica  
0 5 10 m

AUTO POSTO ALFA

TRABALHO DE FORMATURA 2005 - TF 33.

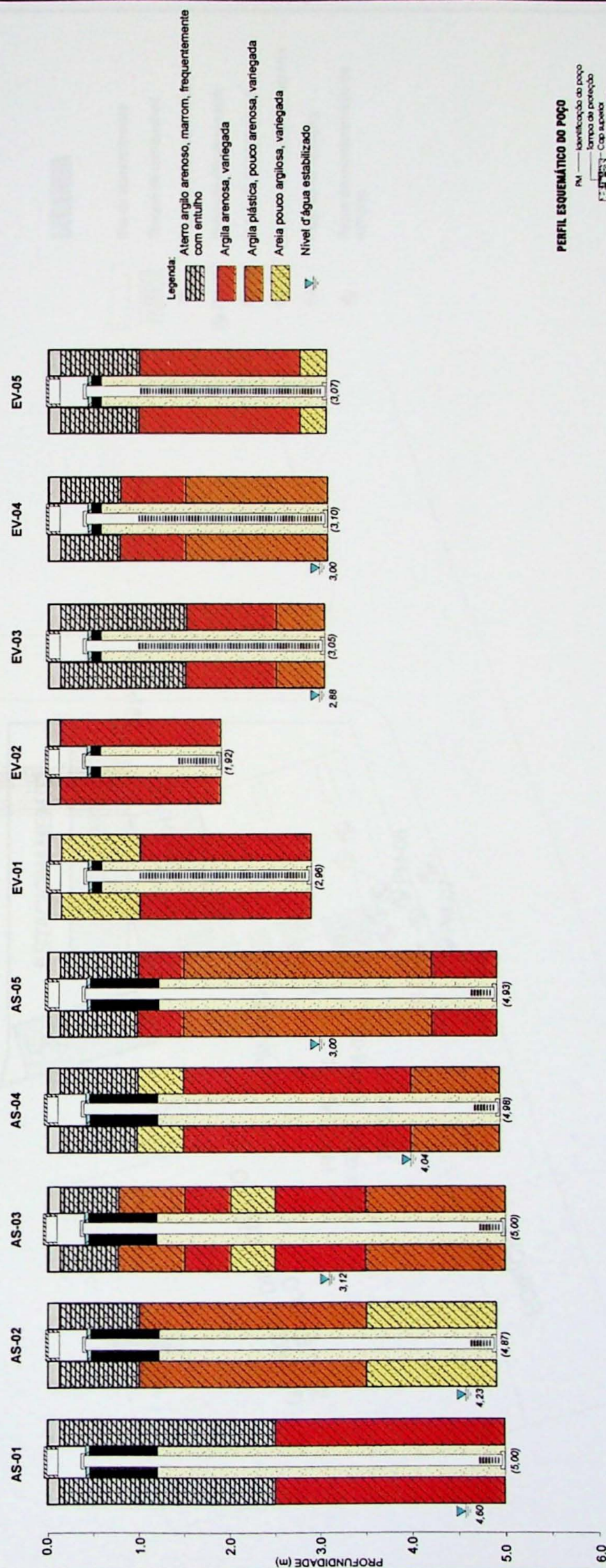


FIGURA 7.3.1. CURVA DE PRESSÃO MÁXIMA DE AIR SPARGING

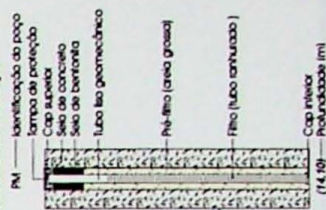




**Figura 7.3.2 - PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS POÇOS DE AS E EVS INSTALADOS**



**PERFIL ESQUEMÁTICO DO POÇO**





**FIGURA 7.3.1.1. - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS / POÇOS DO ENSAIO PILOTO**





FIGURA 7.3.1.1.b. - ARRANJO FÍSICO DOS POÇOS UTILIZADOS NO ENSAIO





**FIGURA 7.3.1.2. - PERFIS LITOLÓGICOS DAS SONDAGENS DE RECONHECIMENTO E PERFIS CONSTRUTIVOS DOS POÇOS INSTALADOS DURANTE O ENSAIO PILOTO.**

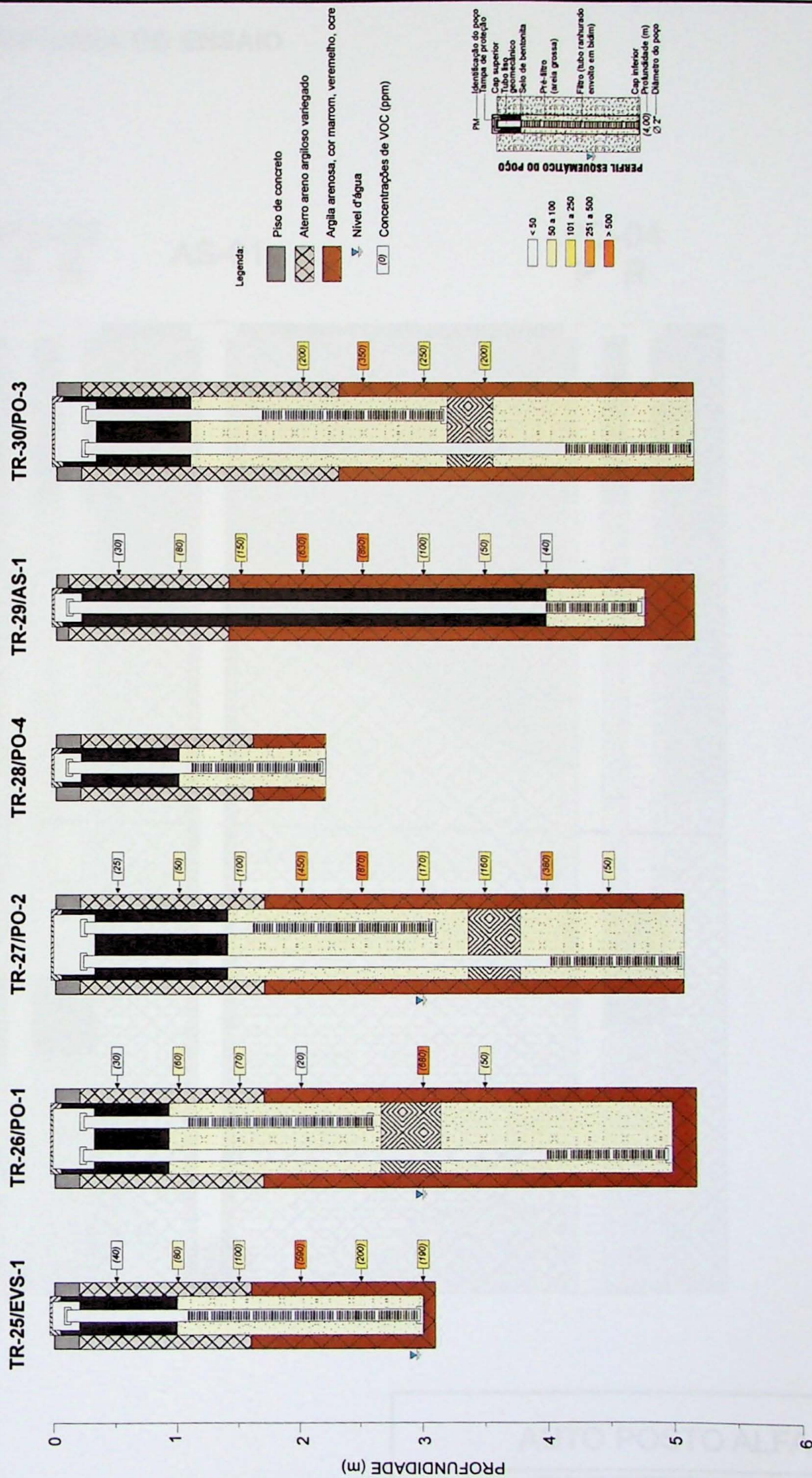




FIGURA 7.3.1.3. - SEÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DA ÁREA DO ENSAIO

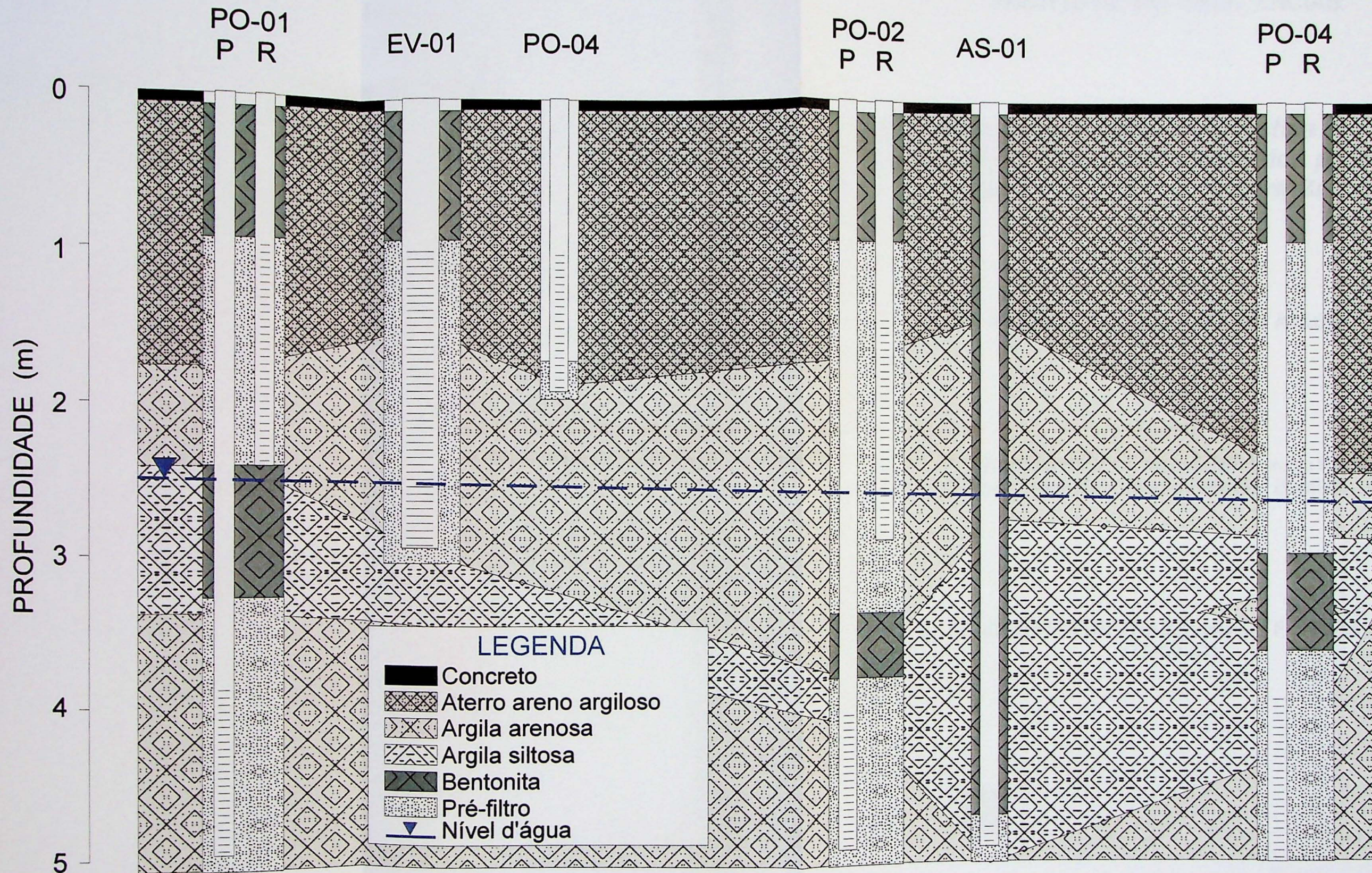




FIGURA 7.3.1.4. PERFIL VERTICAL DE DISTRIBUIÇÃO DOS COMPOSTOS ORÂNICOS VOLÁTEIS

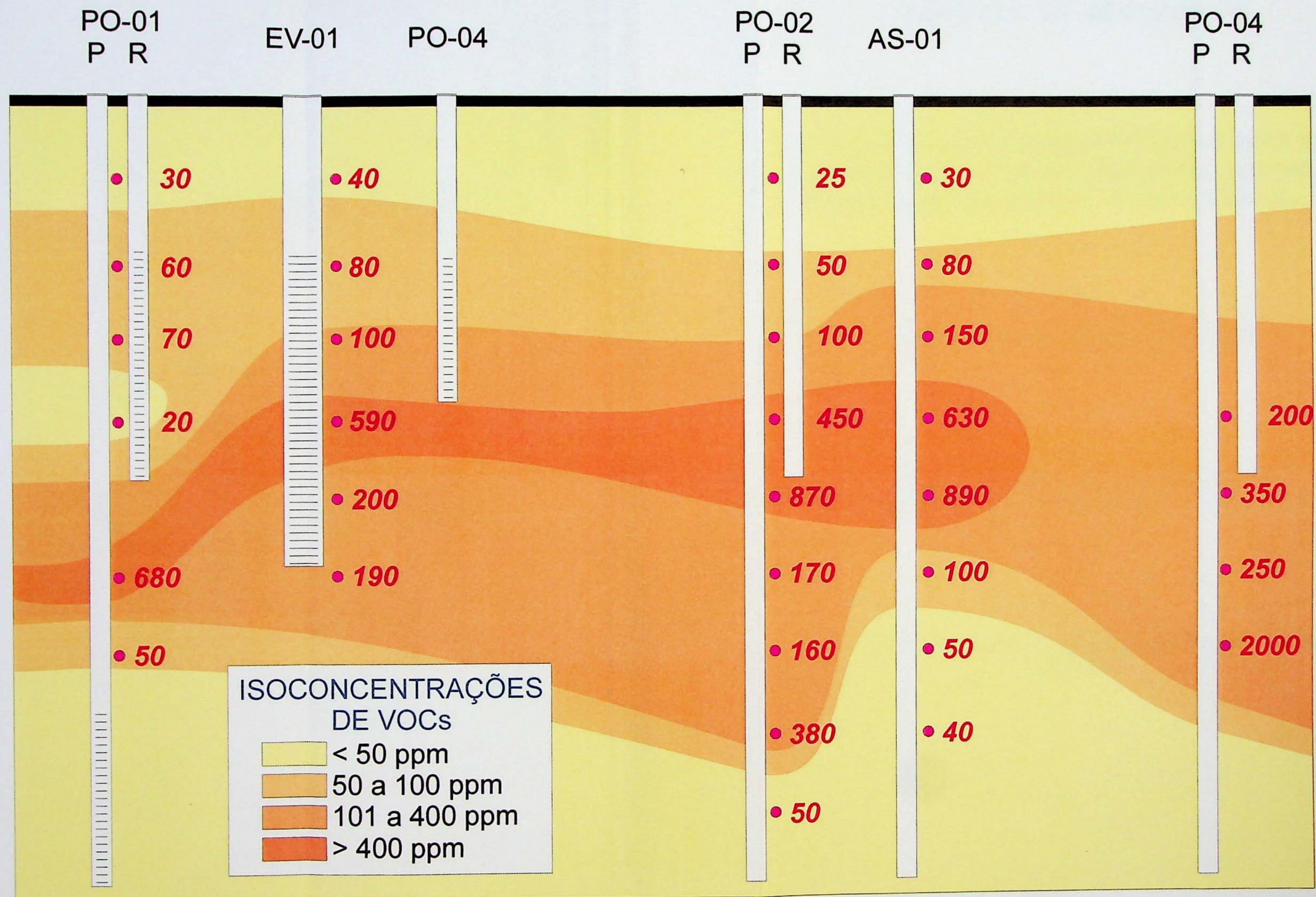




FIGURA 7.3.1.5. - FLUXOGRAMA BÁSICO DO SISTEMA PILOTO

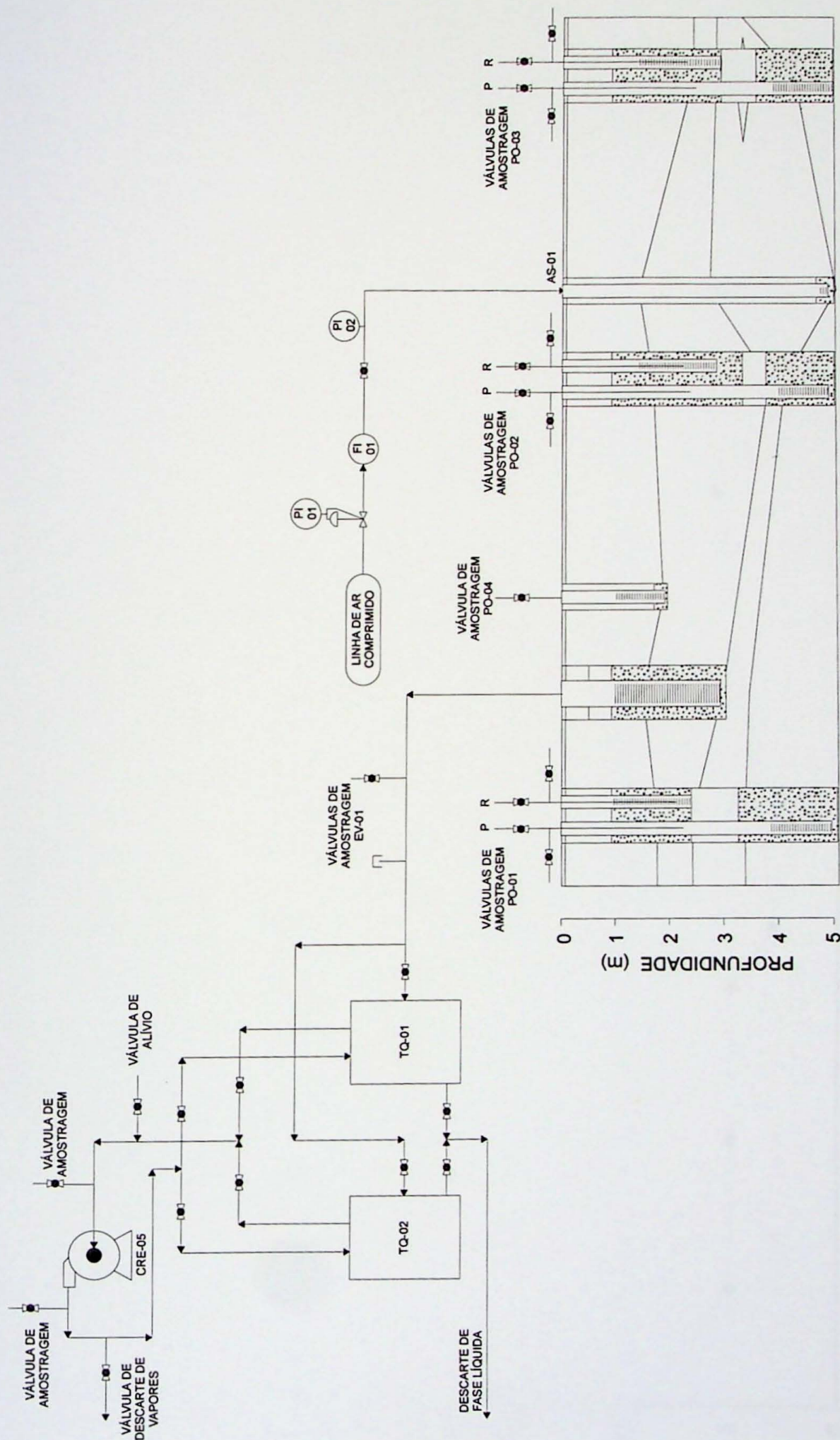




Figura 7.3.1.6. Variação da pressão e fluxo de injeção de ar

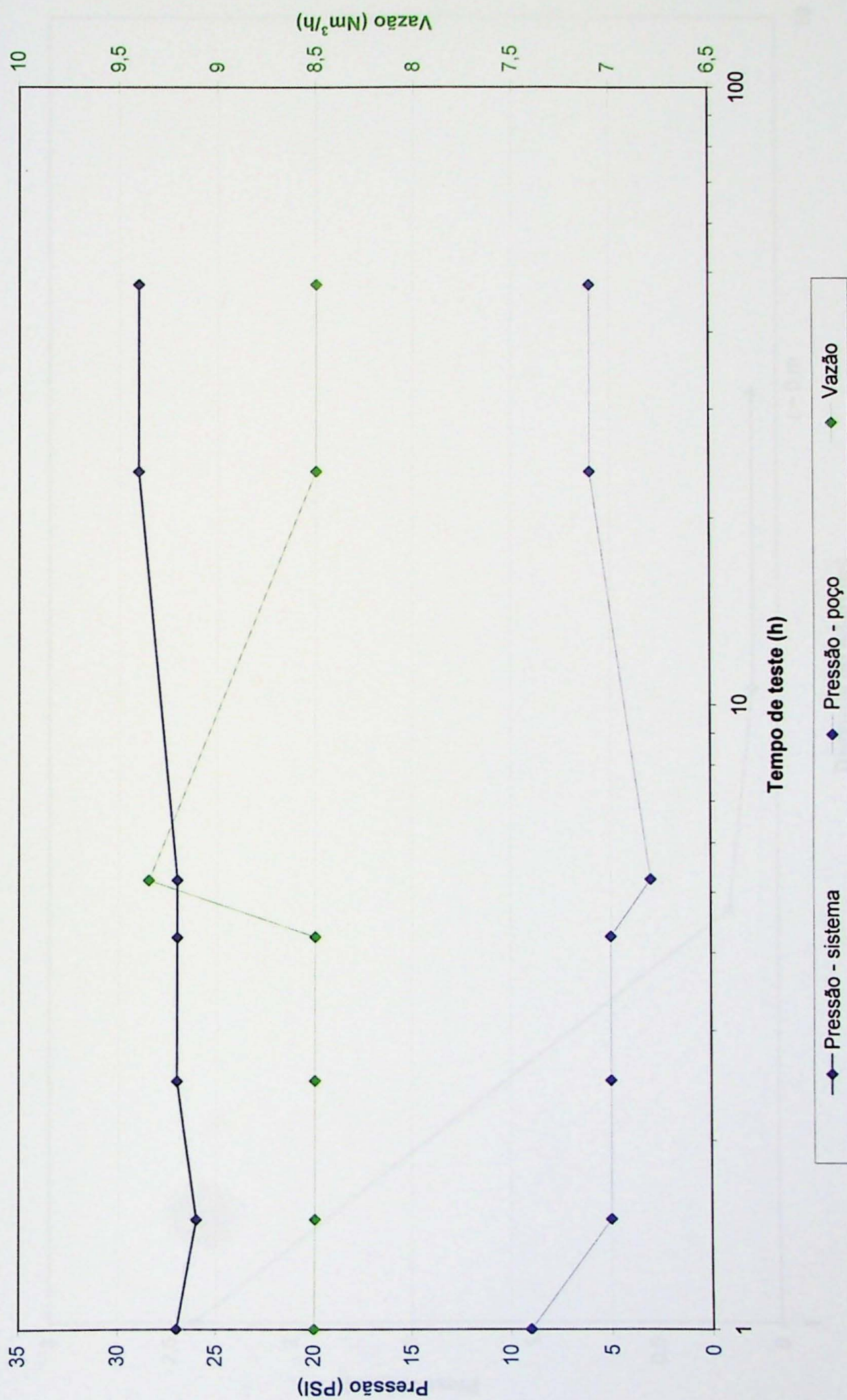




Figura 7.3.1.7. Projeção do gráfico do raio de influência com base na dispersão de pressão - Horizonte raso

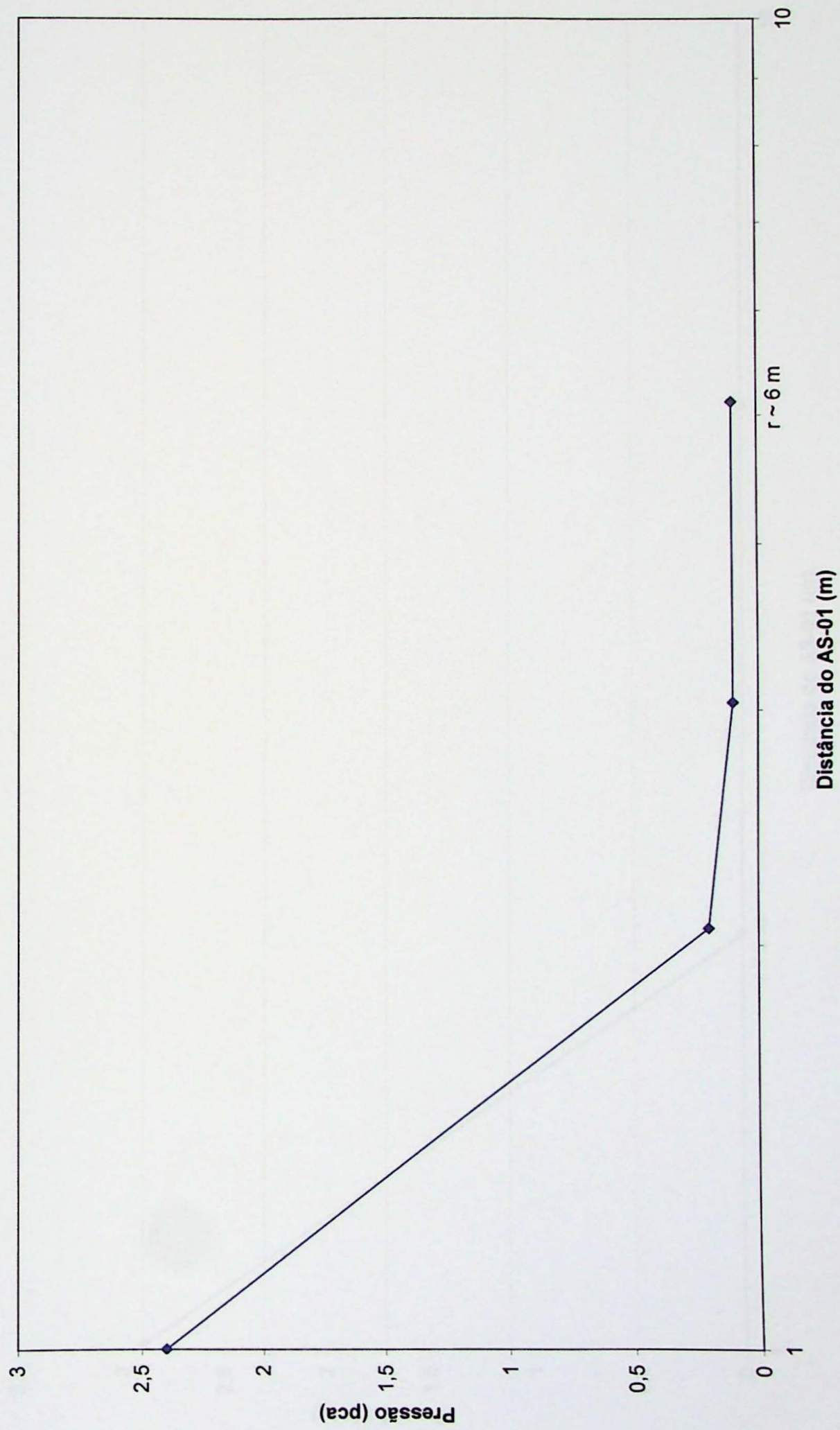




Figura 7.3.1.8. Projeção do gráfica do raio de influência com base na dispersão da pressão - Horizonte profundo

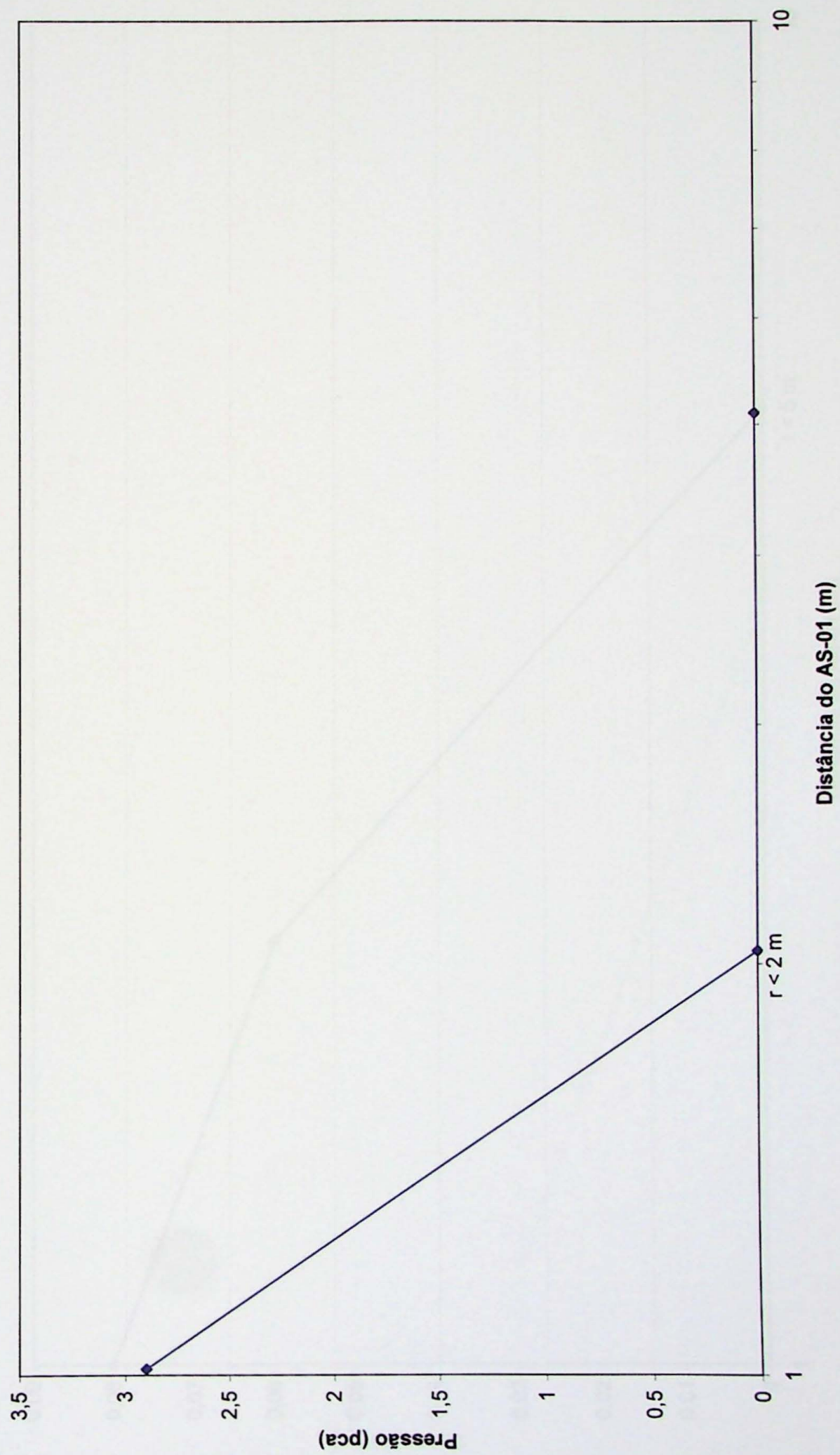




Figura 7.3.1.9. Projeção do gráfico do raio de influência com base na elevação do nível d'água - Horizonte raso

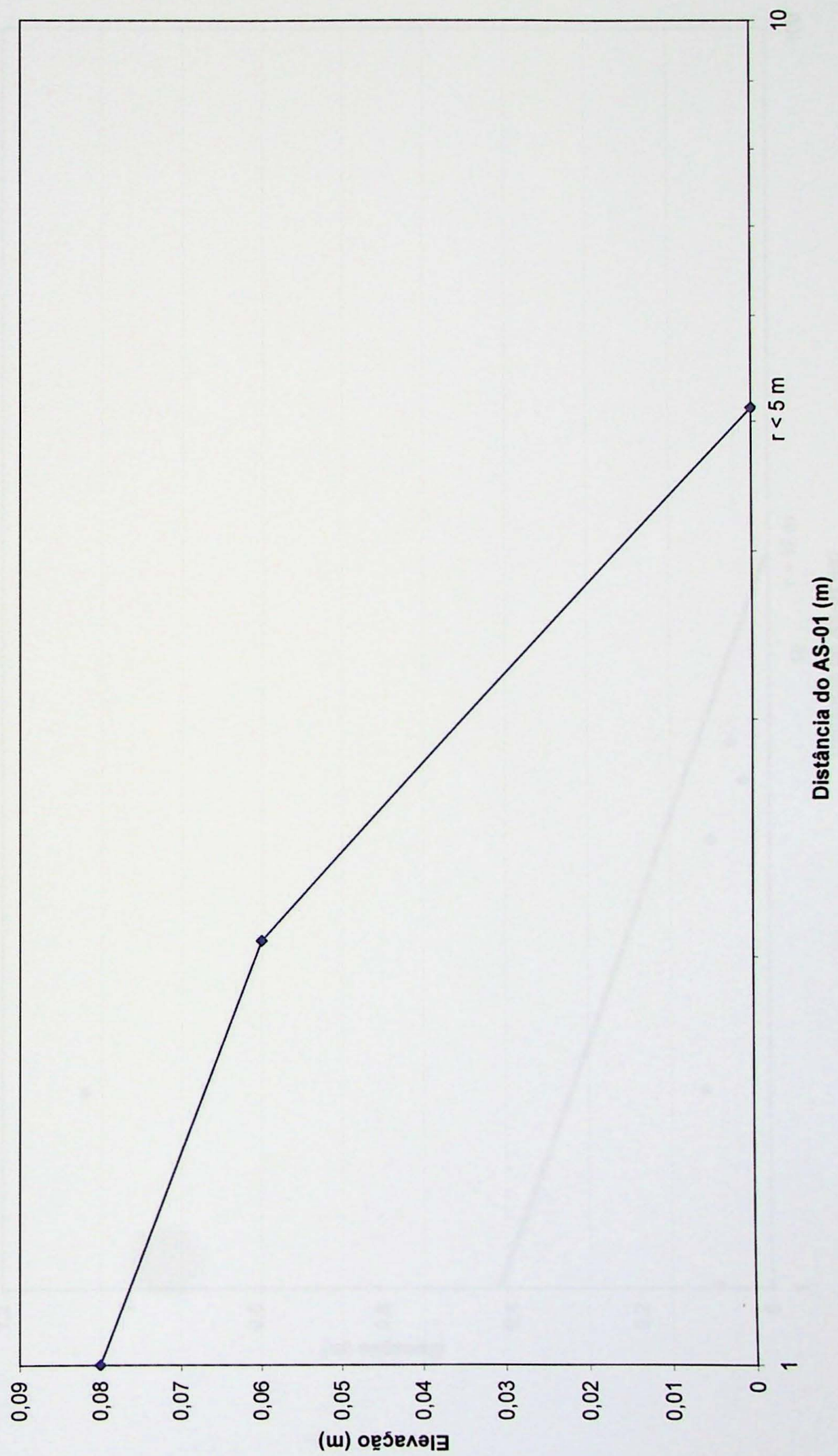




Figura 7.3.1.10. Projeção do gráfica do raio de influência com base na elevação do nível d'água - Horizonte profundo

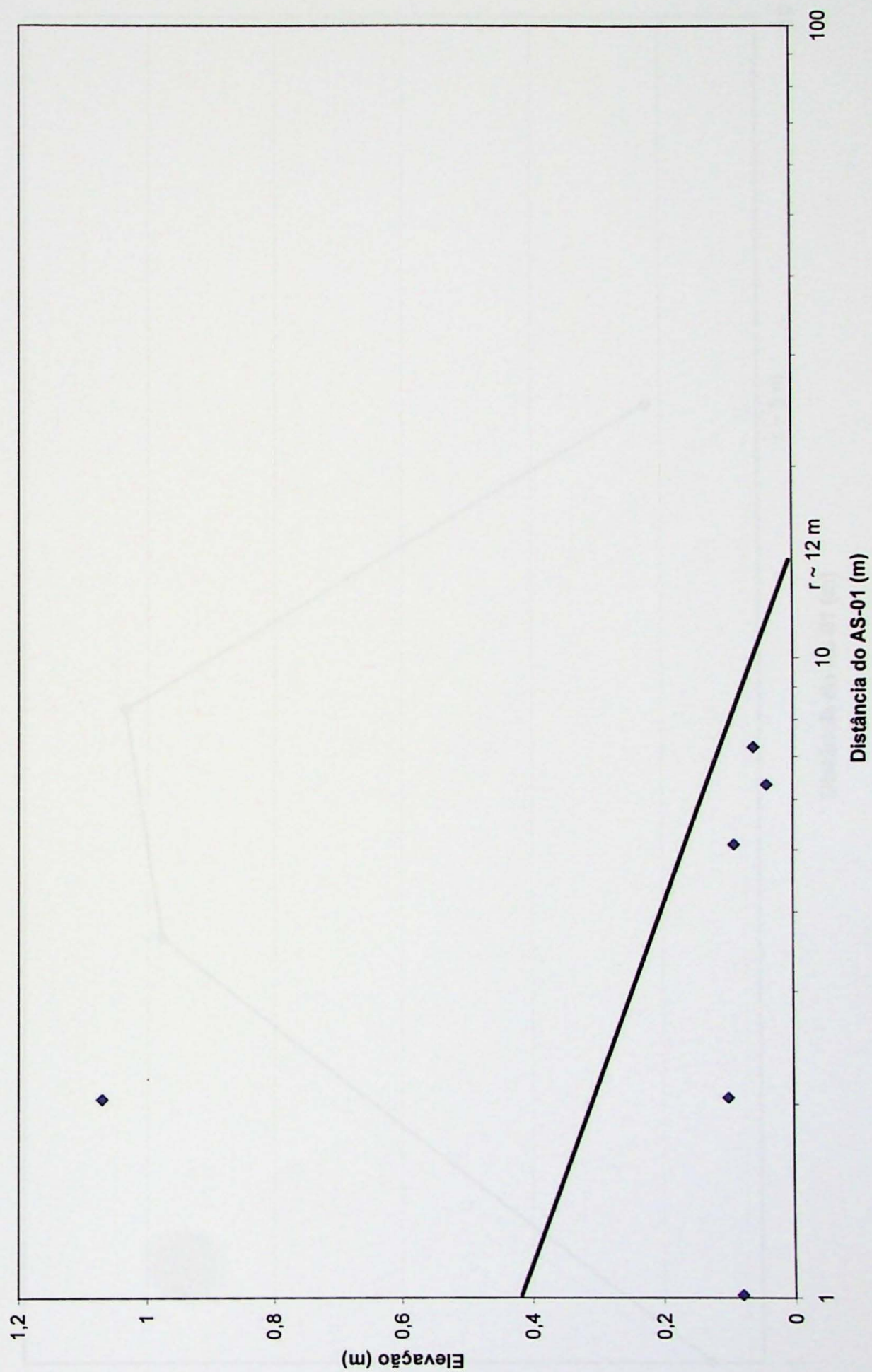




Figura 7.3.1.11. Projeção do gráfica do raio de influência com base na liberação de oxigênio gasoso no *well head space* - Horizonte raso

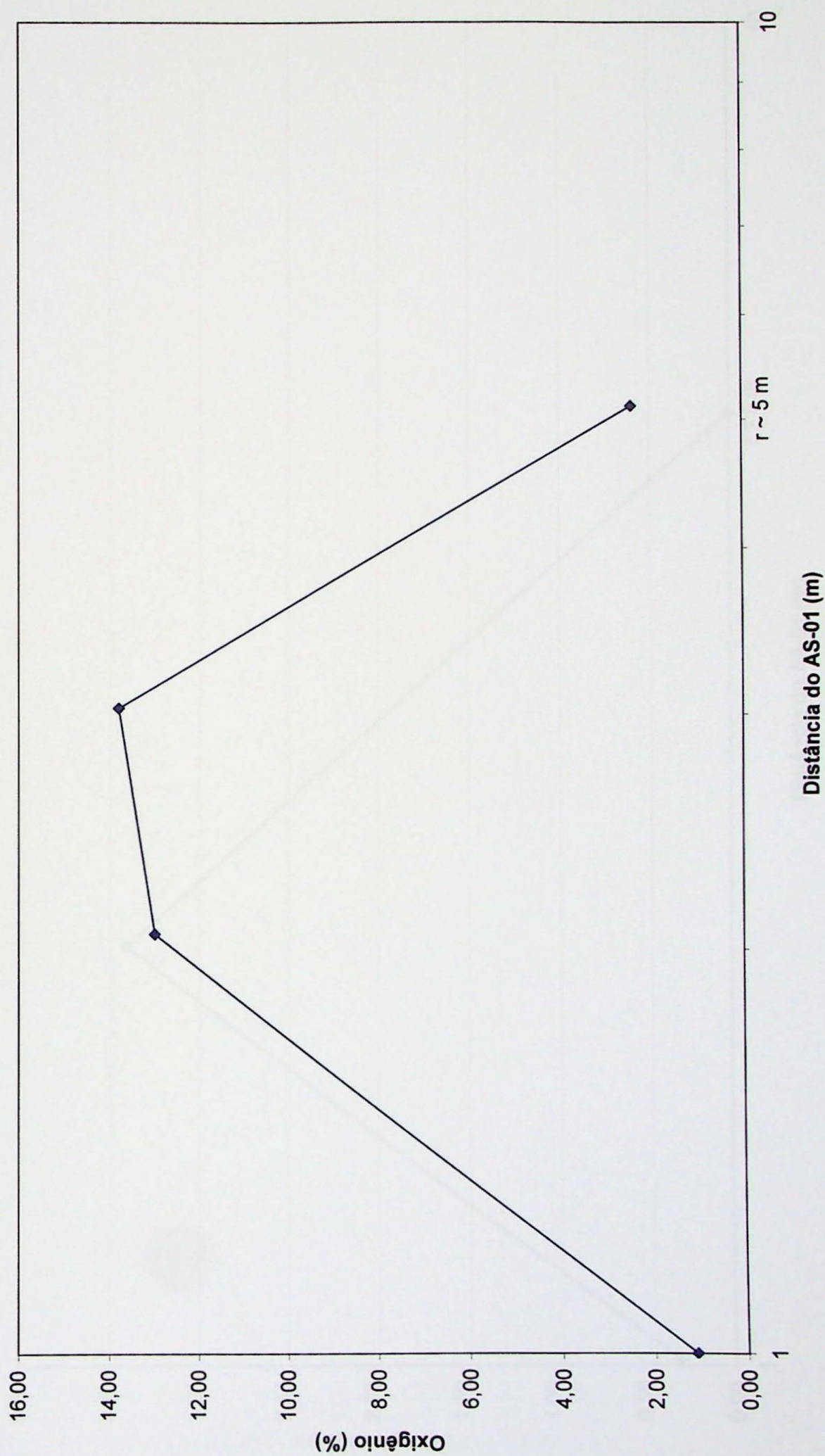
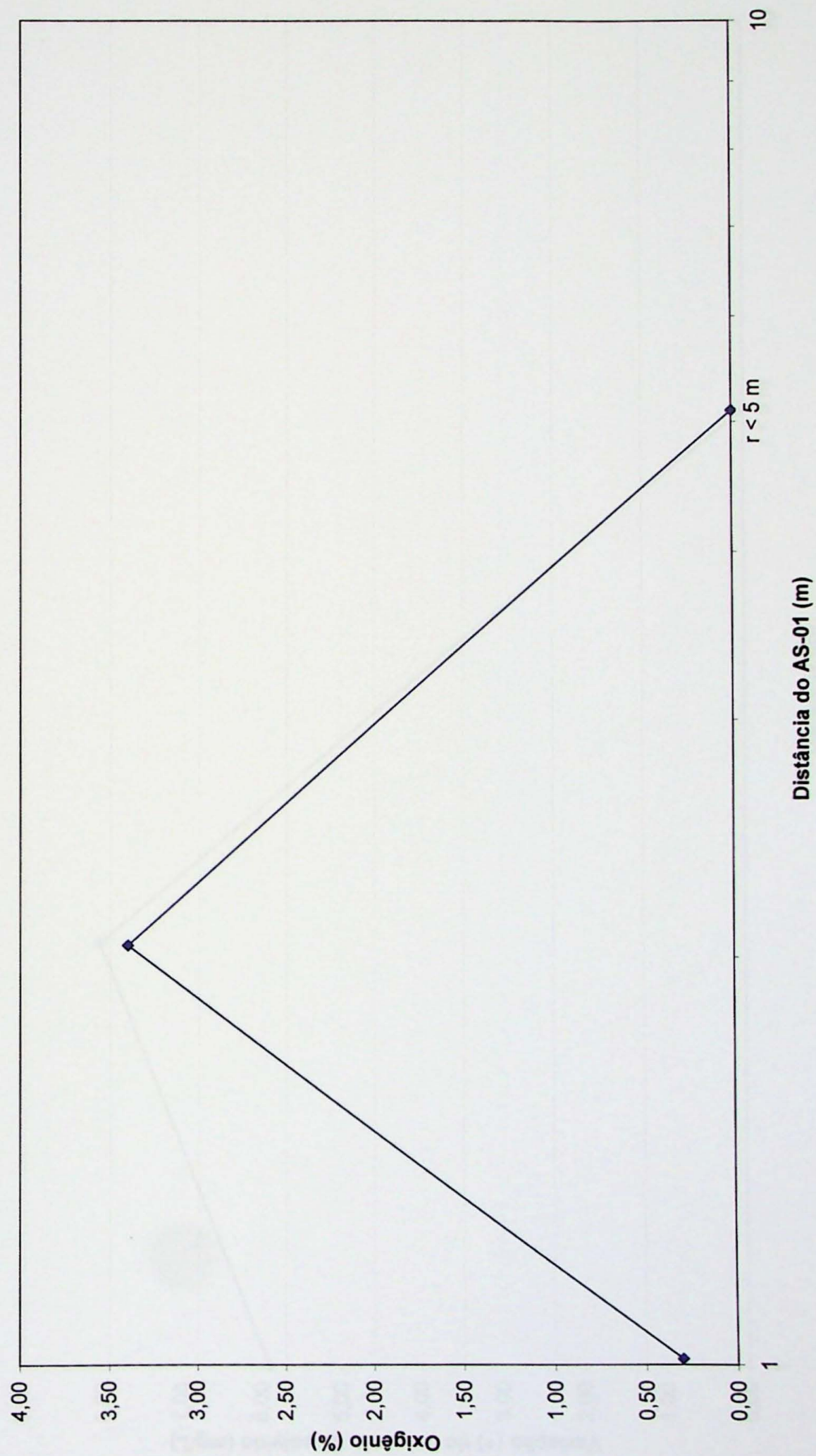




Figura 7.3.1.12. Projeção do gráfica do raio de influência  
com base na liberação de oxigênio gasoso no *well head space* - Horizonte profundo





**Figura 7.3.1.13. Projeção do gráfica do raio de influência com base na elevação da concentração de oxigênio dissolvido - Horizonte raso**





Figura 7.3.1.14. Projeção do gráfico do raio de influência com base na elevação da concentração de oxigênio dissolvido - Horizonte profundo

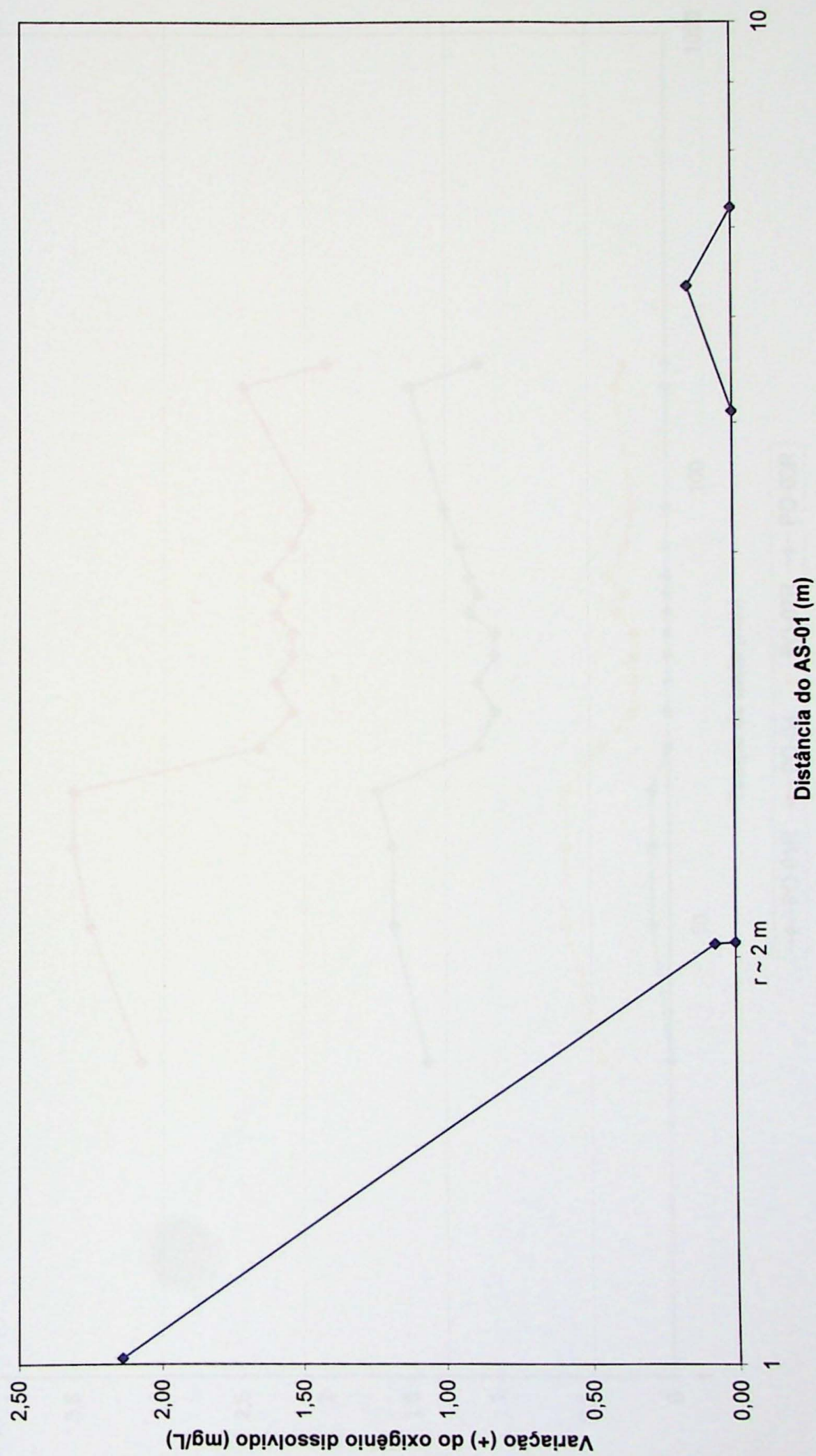




Figura 7.3.1.15. Variação do vácuo nos poços de monitoramento

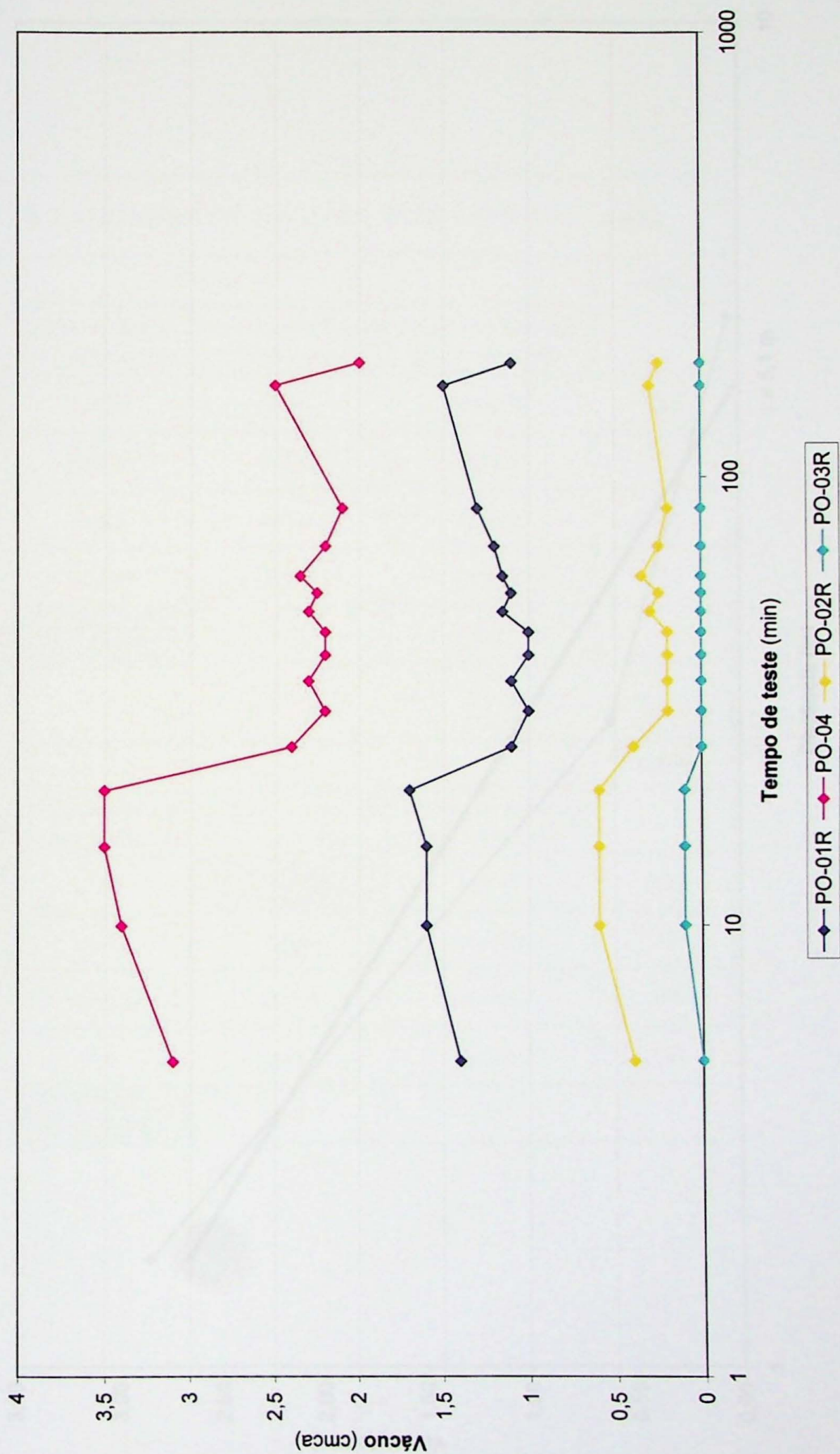
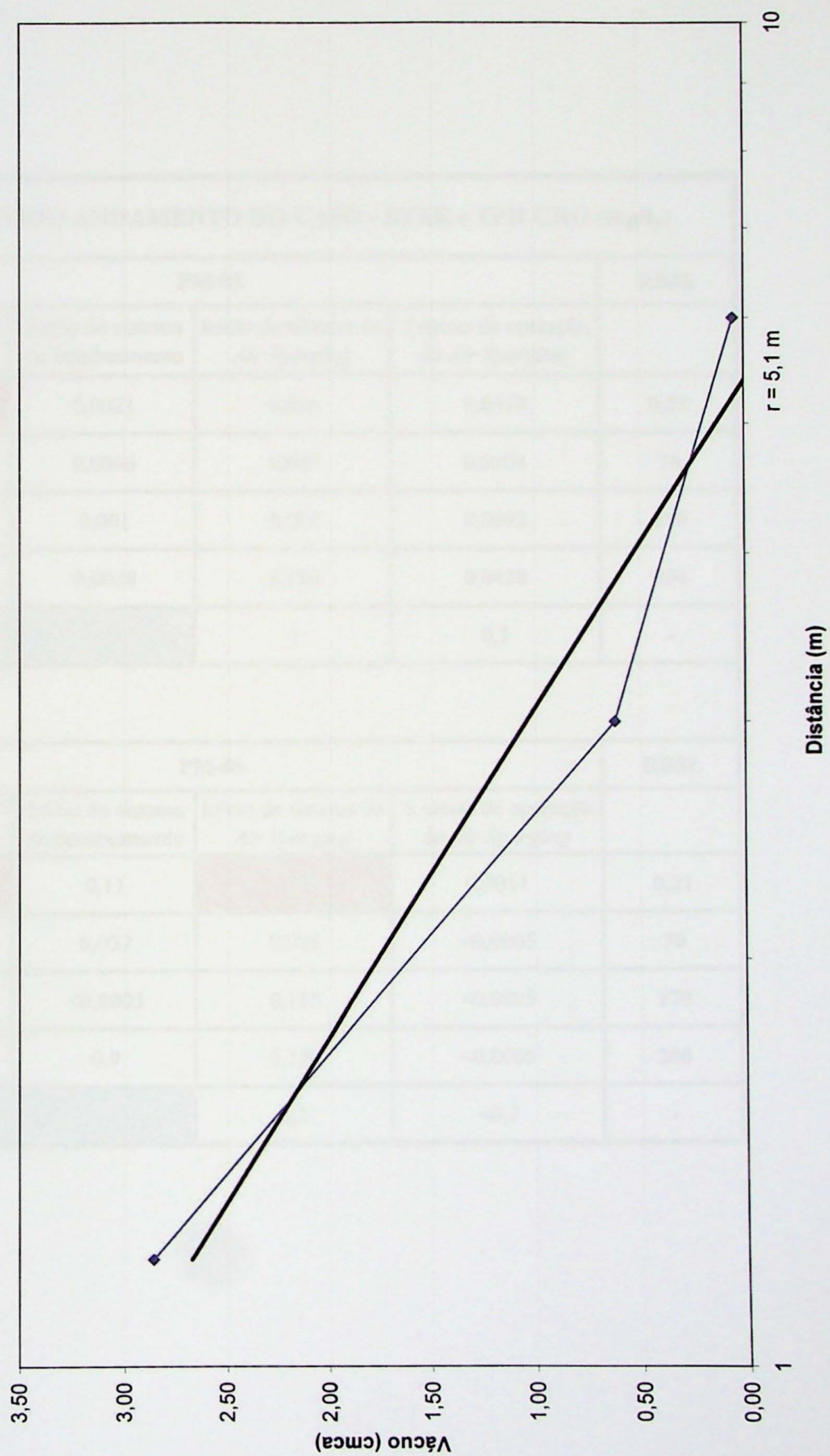




Figura 7.3.1.16. Projeção do raio de influência - 40 cmca





**TABELA 7.3.3. - RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DURANTE TODO ANDAMENTO DO CASO - BTXE e TPH GRO (mg/L)**

Parâmetro	Unidade	PM-04				PM-05				RBSL
		Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	
Benzeno	mg/l	0,390	1,4	0,680	0,0162	1,200	0,0021	0,016	0,0418	0,21
Tolueno	mg/l	3,000	0,86	0,042	0,0009	2,400	0,0006	0,027	0,0304	70
Etilbenzeno	mg/l	0,820	0,28	0,150	0,0009	0,015	0,001	0,008	0,0092	170
Xilenos	mg/l	7,500	1,4	0,710	0,0009	7,100	0,0028	0,150	0,0438	200
TPH GRO	mg/l			3,2	0,0009			1	0,7	-
Parâmetro	Unidade	PM-06				PM-08				RBSL
		Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	
Benzeno	mg/l	<0,005	<0,0005	<0,5	0,0047	1,200	0,11	0,410	0,0011	0,21
Tolueno	mg/l	0,110	<0,0005	<0,5	0,0015	1,100	0,037	0,028	<0,0005	70
Etilbenzeno	mg/l	0,063	<0,0005	<0,5	<0,0005	0,480	<0,0005	0,110	<0,0005	170
Xilenos	mg/l	0,850	<0,0005	0,500	0,0021	3,900	0,9	0,150	<0,0005	200
TPH GRO	mg/l			0,1	0,2			2,2	<0,1	-

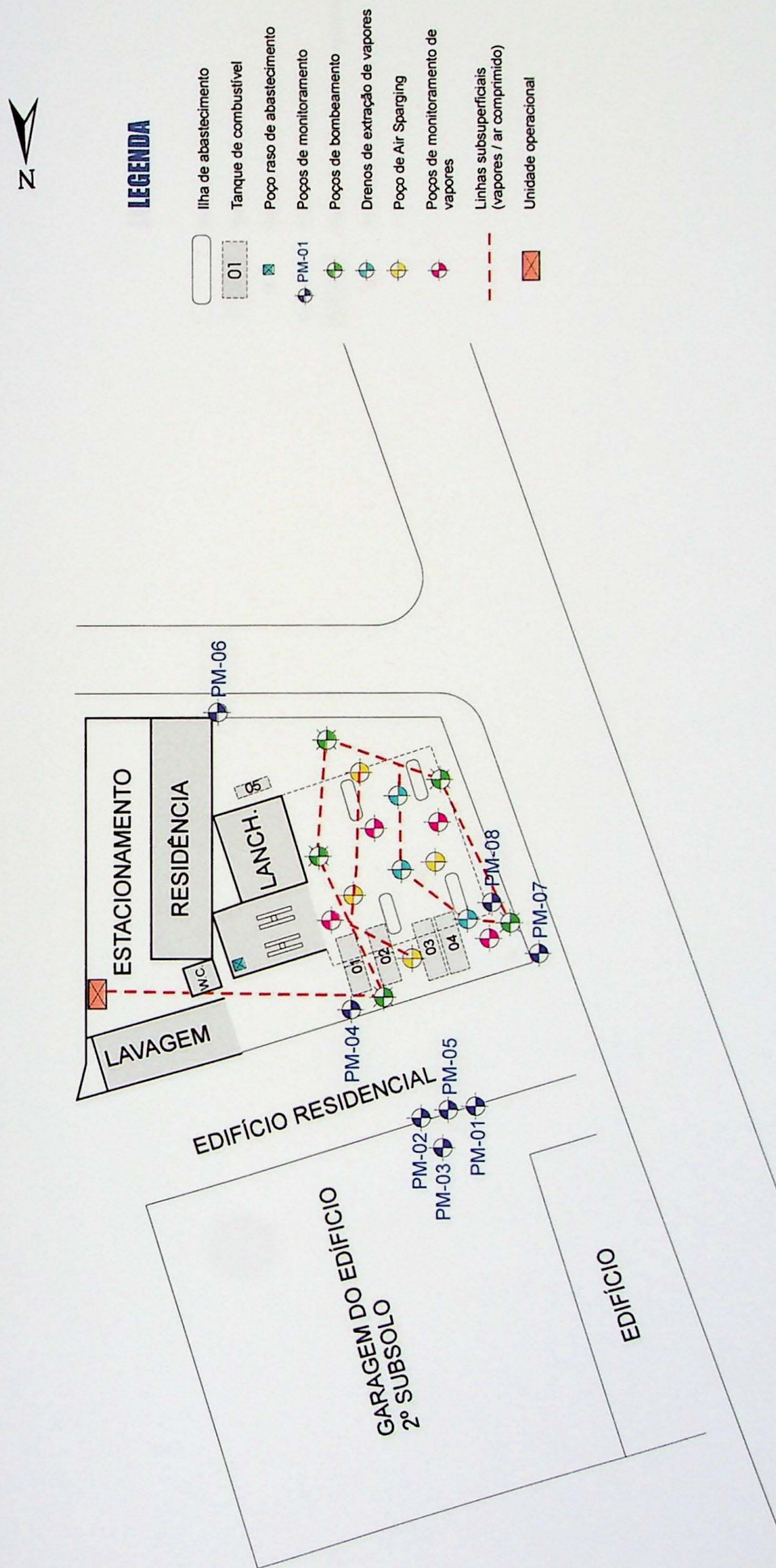
RBSL = relacionado à inalação de vapores orgânicos pelos trabalhadores comerciais do posto em ambientes confinados

Concentração acima do RBSL

Não analisado



**Figura 7.3.2.1. - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS DE CIRCULAÇÃO DE VAPORES, POÇOS DE AIR SPARGING, POÇOS DE MONITORAMENTO DE VAPORES E UNIDADE DE CONTROLE OPERACIONAL**



Escala Gráfica

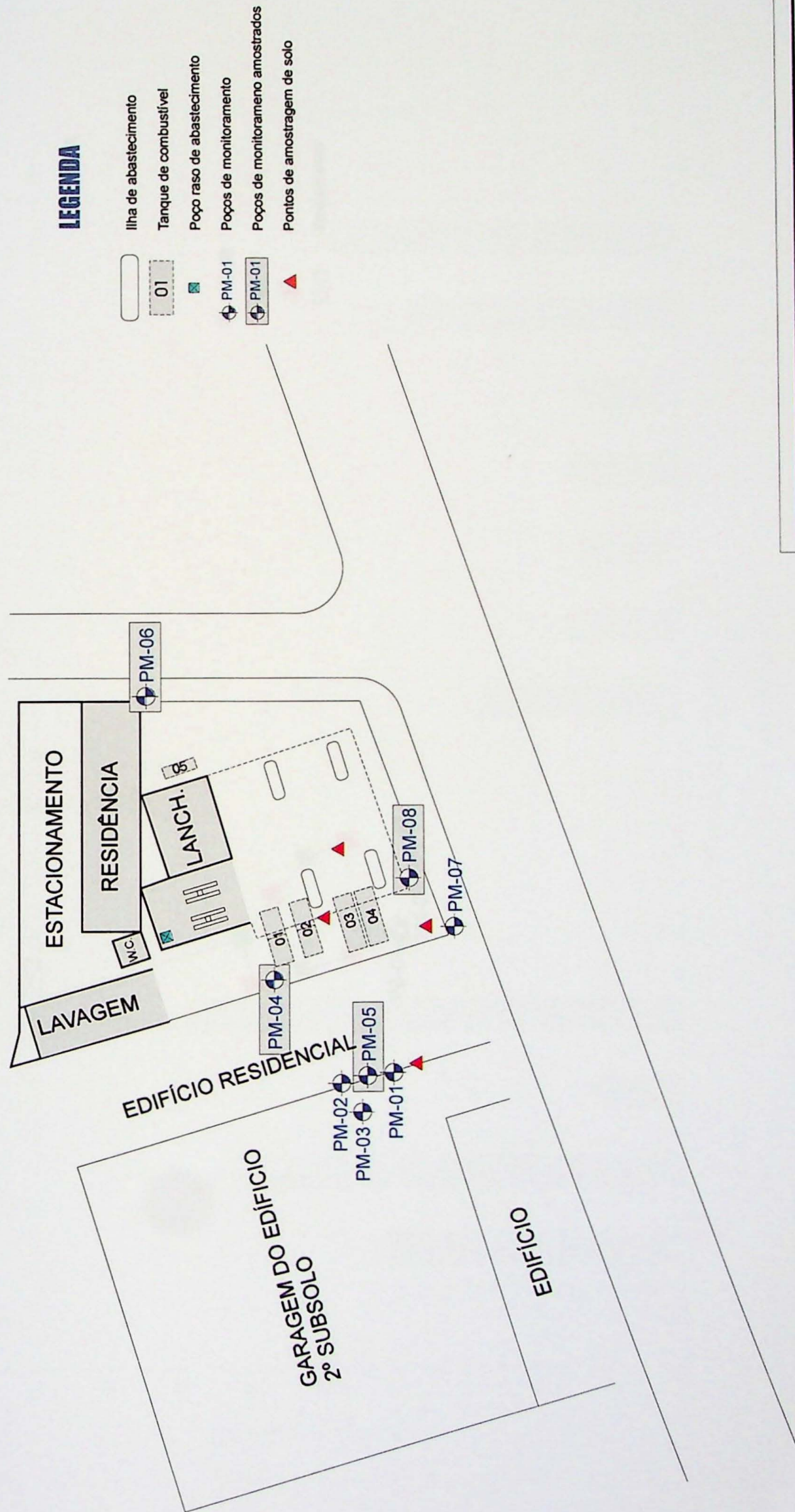
0 5 10 m

AUTO POSTO ALFA

TRABALHO DE FORMATURA 2005 - TF 33



**Figura 7.3.3.1. - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM**



**AUTO POSTO ALFA**

Escala Gráfica

0 5 10 m



FIGURA 7.3.2.2. - ARRANJO FINAL DOS POÇOS DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO

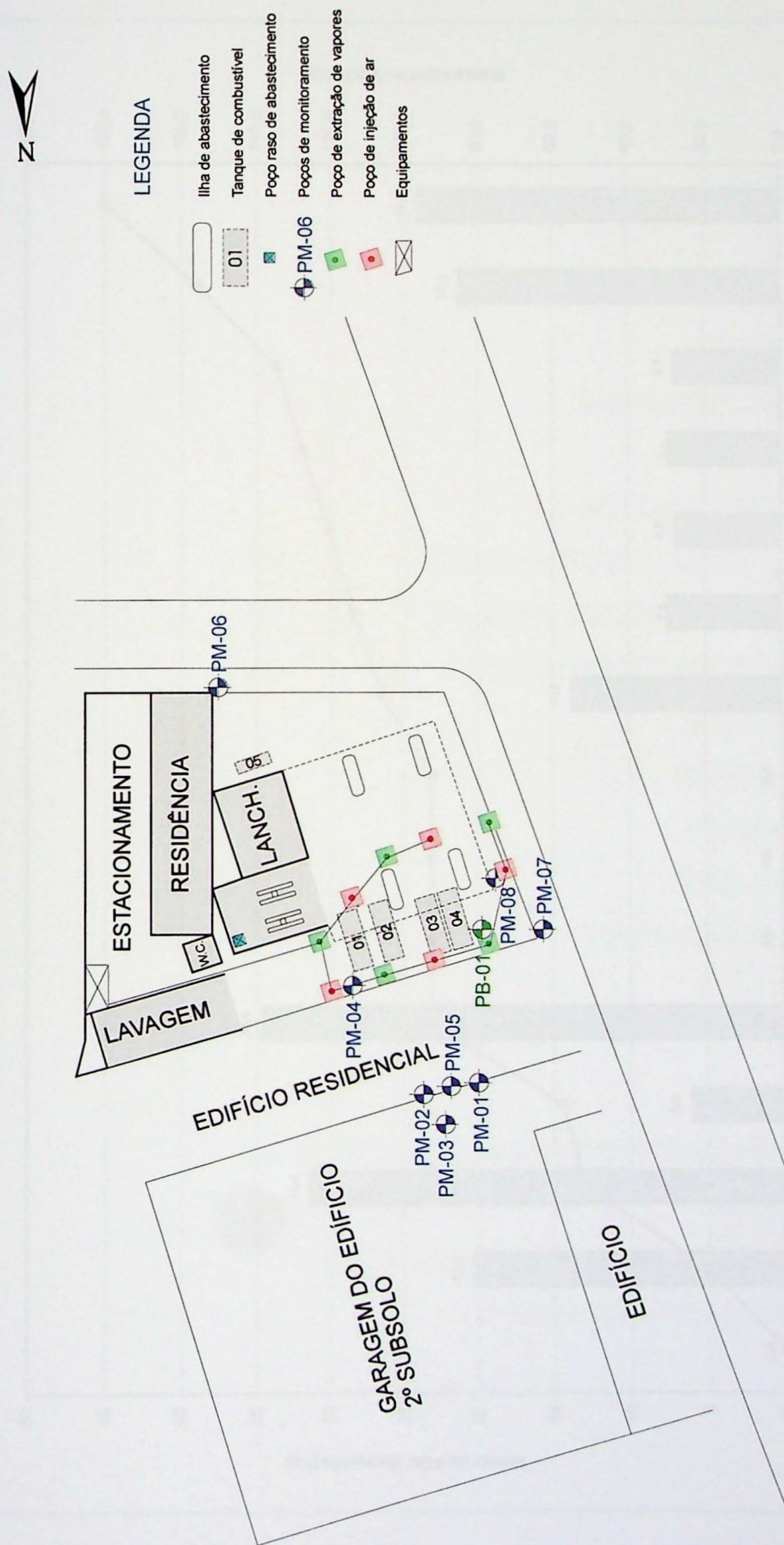




Figura 7.3.3.2. - Massa de VOC Removida em 5 meses

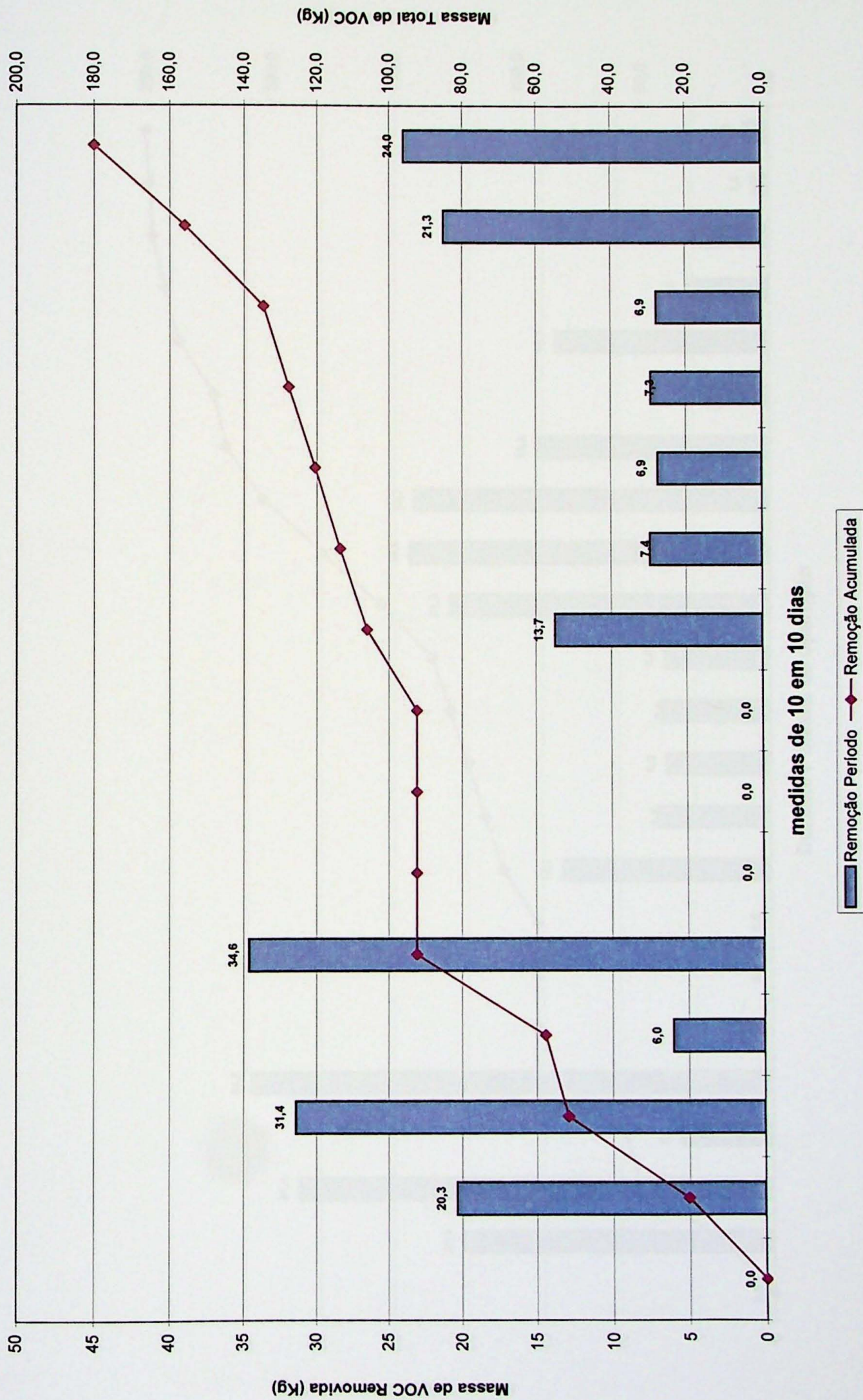




FIGURA 7.3.4.1.1. - MASSA DE VOC REMOVIDA AO FIM DO SISTEMA

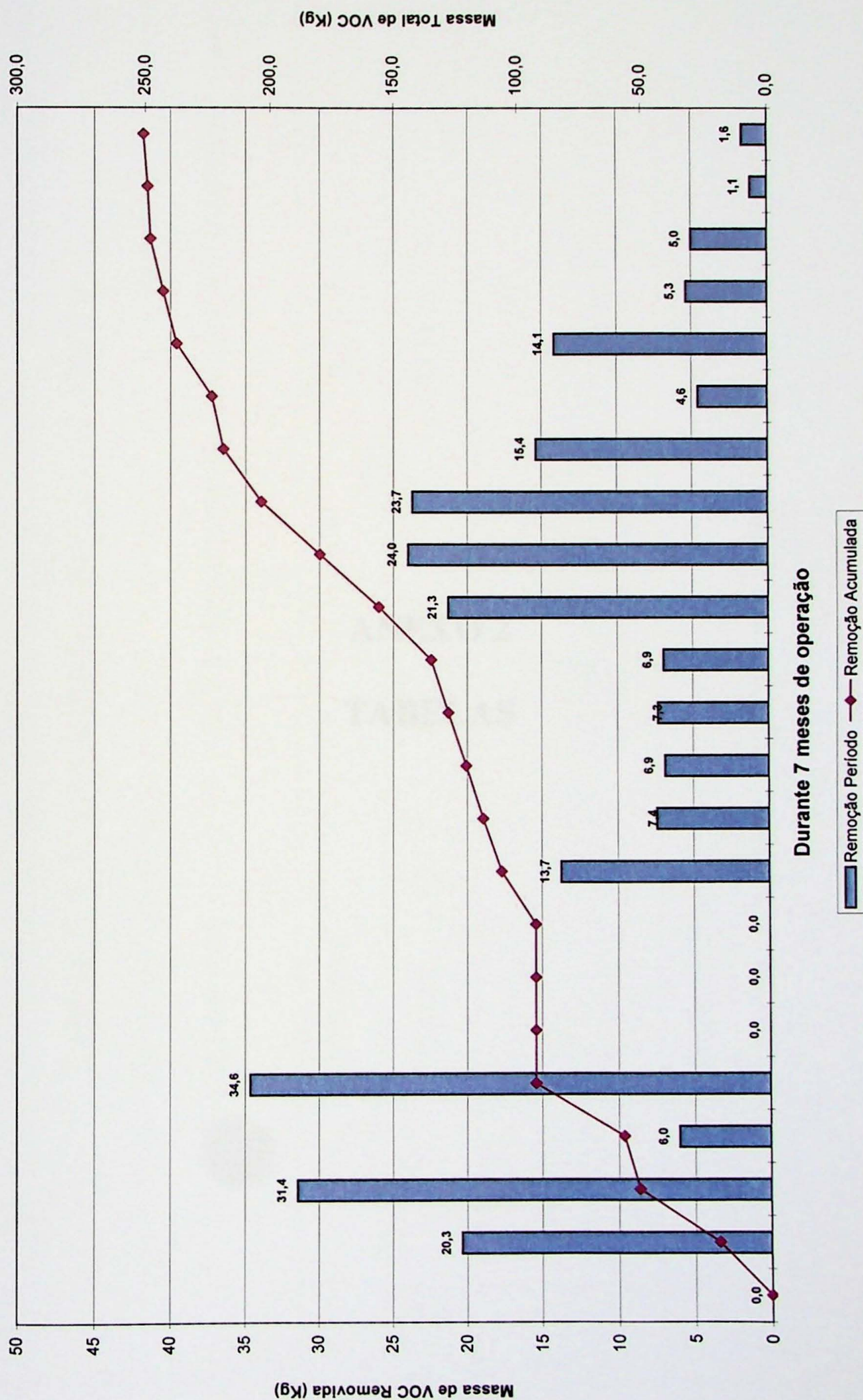




Tabela 6.1.1. Constantes da Lei de Henry

Constituintes	Constante de Henry a 25°C (atm.m³/mol)
Metano	0,712
Etileno	0,0001
Propano	0,0001
Tolueno	0,0001
Clorofórmio	0,0001

## ANEXO 2

### TABELAS



**Tabela 6.1.1. Constantes da Lei de Henry**

<b>Constituintes</b>	<b>Constante de Henry à 25°C (atm.m<sup>3</sup>/mol)</b>
Etilbenzeno	8,7x10 <sup>-3</sup>
Xilenos	5,1x10 <sup>-3</sup>
Benzeno	5,5x10 <sup>-3</sup>
Tolueno	6,6x10 <sup>-3</sup>
naftaleno	4,6x10 <sup>-6</sup>



**TABELA 7.2.3.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE**

<b>POÇO DE MONITORAMENTO</b>	<b>CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA – K (cm/s)</b>
<b>PM-03</b>	<b>5,32 x 10<sup>-5</sup></b>
<b>PM-04</b>	<b>6,53 x 10<sup>-5</sup></b>
<b>PM-08</b>	<b>6,52 x 10<sup>-5</sup></b>
<b>MÉDIA</b>	<b>6,12 x 10<sup>-5</sup></b>



**TABELA 7.2.4. RESULTADOS DA ANÁLISE DE RISCO PARA SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA**

<b>Constintuintes</b>	<b>Limites para solo (mg/Kg)</b>	<b>Limites para água Subterrânea (mg/L)</b>
Benzeno	0,66	0,21
Tolueno	780	70
Etilbenzeno	650	170
Xilenos	510	200
Acenafteno	-	-
Acenaftileno	-	-
Antraceno	-	-
Benzo(a)Antraceno	79	0,057
Benzo(b)Fluoranteno	81	0,15
Benzo(k)Fluoranteno	24	0,043
Benzo(g,h,i)Perileno	-	-
Benzo(a)Pireno	17	0,016
Chriseno	3,6	0,018
Dibenzo(a,h)Antraceno	3,7	0,005
Fluoranteno	-	-
Fluoreno	-	-
Indeno(1,2,3,c,d)Pireno	17000	0,62
Naftaleno	620	31
Fenantreno	-	-
Pireno	-	-



**TABELA 7.2.5.1. - RESULTADOS DE BTXE NA CAMPANHA INICIAL - SOLO**

SONDAGEM / Nº DA AMOSTRA	PROFUNDIDADE (intervalo-m)	UMIDADE (%) (V)	BENZENO (mg/Kg)	TOLUENO (mg/Kg)	ETILBENZENO (mg/Kg)	XILENOS (mg/Kg)
			Base Seca	Base Seca	Base Seca	Base Seca
TR-01	0,0 - 1,0	18.375	9,1	160,0	69,0	600,0
TR-12	2,0 - 3,0	18.375	0,61	0,14	0,41	0,33
TR-05	2,0 - 3,0	18.375	11,0	51,0	18,0	120,0
TR-07	1,0 - 2,0	18.375	0,09	3,7	7,6	43,0
<b>RBSL</b>		-	<b>0,66</b>	<b>780</b>	<b>680</b>	<b>510</b>

RBSL = limites calculados para área  
= Concentrações acima do RBSL



**TABELA 7.2.5.2. - RESULTADOS DE PAH NA CAMPANHA INICIAL - SOLO (mg/Kg)**

SONDAGEM / Nº DA AMOSTRA	TR-01 (mg/kg)	TR-12 (mg/kg)	TR-05 (mg/kg)	TR-07 (mg/kg)	RBSL
	Base Seca	Base seca	Base seca	Base seca	
UMIDADE	18.375	18.375	18.375	18.375	-
ACENAFTENO	0,5	0,72	0,07	0,16	-
ACENAFTALENO	<0,04	<0,22	<0,01	<0,07	-
ANTRACENO	0,37	<0,24	0,04	<0,05	-
BENZO (a) ANTRACENO	0,46	0,14	0,04	<0,03	0,057
BENZO(b) FLUORANTENO	0,37	0,03	0,04	0,01	0,15
BENZO (k) FLUORENTENO	0,21	<0,01	0,02	<0,01	0,043
BENZO (g,h,i,) PERILENO	0,14	<0,02	<0,02	<0,02	-
BENZO (a) PIRENO	0,31	<0,01	0,03	<0,01	0,016
CRISENO	0,48	0,43	0,04	1,3	0,018
DIBENZO (a,h) ANTRACENO	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	0,005
FLUORANTENO	1,2	<0,09	0,13	<0,03	-
FLUORENO	0,33	1,3	0,04	0,39	-
INDENO(1,2,3-cd) PIRENO	0,17	<0,02	<0,02	<0,02	0,62
NAFTALENO	58,0	2,9	6,1	8,1	31
FENANTRENO	1,4	3,9	0,18	1,1	-
PIRENO	0,91	0,76	0,1	0,12	-

RBSL = Limites calculados para área  
  = Concentrações acima do RBSL




**TABELA 7.2.6.1 MEDIÇÕES DE NÍVEL D'ÁGUA E ESPESSURA DE FASE LIVRE DURANTE A INVESTIGAÇÃO INICIAL.**

POÇOS DE MONITORAMENTO	COTA (m)	NÍVEL D'ÁGUA (m)	NÍVEL DA FASE LIVRE (m)	ESPESSURA DA FASE LIVRE (m)	COTA DO NÍVEL D'ÁGUA (M)	COTA DA FASE LIVRE (m)	CARGA HIDRÁULICA (m)
PM-01	94,040	0,52	0,52	0,01	93,520	93,52	93,520
PM-02	94,103	0,53	0,53	0,01	93,600	93,6	93,600
PM-03	92,950	0,49	-	-	92,460	-	92,460
PM-04	99,432	3,92	-	-	95,512	-	95,512
PM-05	94,796	0,54	-	-	93,656	-	93,656
PM-06	100	3,81	-	-	96,490	-	96,190
PM-07	98,296	2,47	-	-	95,826	-	95,826
PM-08	98,891	2,47	-	-	96,421	-	96,421
PB-01	98,742	2,80	2,29	0,51	95,942	96452	96,314



**TABELA 7.2.6.2. - RESULTADOS DE BTXE NA INVESTIGAÇÃO INICIAL - ÁGUA SUBTERRÂNEA**

COMOSTO POÇO	BENZENO mg/L	TOLUENO mg/L	ETILBENZENO mg/L	XILENOS mg/L
PM-06	<0,005	0,11	0,063	0,85
PM-04	0,39	3,0	0,82	7,5
PM-07	0,32	0,12	0,023	0,13
PM-08	1,7	1,1	0,48	3,9
PM-03	0,0041	0,0054	0,0008	0,11
PM-02	0,058	0,34	0,029	2,8
PM-05	1,2	2,4	0,015	7,1
<b>RBSL</b>	<b>0,21</b>	<b>70</b>	<b>170</b>	<b>200</b>

 = Concentração acima do RBSL



**TABELA 7.2.6.3. - RESULTADOS DE PAH NA INVESTIGAÇÃO INICIAL - ÁGUA SUBTERRÂNEA**

PONTO DE AMOSTRAGEM / PARÂMETROS	PM-06 mg/L	PM-04 mg/L	PM-07 mg/L	PM-08 mg/L	PM-03 mg/L	PM-02 mg/L	PM-05 mg/L	RBSL
ACENAFTENO	<0,00001	0,001	0,00019	0,00074	0,00019	0,002	0,0036	-
ACENAFTALENO	<0,00001	<0,00006	<0,000005	<0,00011	<0,00001	<0,00021	<0,00026	-
ANTRACENO	<0,00001	<0,00007	<0,00002	<0,00006	0,00004	0,00091	<0,0015	-
BENZO (a) ANTRACENO	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,0006	0,00066	0,057
BENZO(b) FLUORANTENO	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,0004	0,00044	0,15
BENZO (k) FLUORENTENO	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00024	0,00028	0,043
BENZO (g,h,i,) PERILENO	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	0,00012	0,00011	-
BENZO (a) PIRENO	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00034	0,00034	0,016
CRISENO	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00055	0,0006	0,018
DIBENZO (a,h) ANTRACENO	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	0,00004	0,00003	0,005
FLUORANTENO	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00006	0,0021	0,0027	-
FLUORENO	<0,00001	0,00078	0,00026	0,00026	0,0001	0,0011	0,002	-
INDENO(1,2,3-cd) PIRENO	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	0,00016	0,00015	0,62
NAFTALENO	0,00056	0,021	0,032	0,032	0,021	0,7	1,4	31
FENANTRENO	0,00002	0,00037	0,00009	0,00009	0,00018	0,0034	0,0055	-
PIRENO	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00004	0,0014	0,0018	-



**TABELA 7.3. - RESULTADOS DE BTXE NA CAMPANHA DE MONITORAMENTO AO FINAL DA ETAPA DE BOMBEAMENTO - ÁGUA SUBTERRÂNEA**

COMOSTO POÇO	BENZENO mg/L	TOLUENO mg/L	ETILBENZENO mg/L	XILENOS mg/L
PM-01	1,8	1,3	0,21	1,6
PM-02	0,045	0,013	0,0066	0,072
PM-03	0,0005	0,0005	0,0007	0,0009
PM-04	1,4	0,86	0,28	1,4
PM-05	0,0021	0,0006	0,001	0,0028
PM-06	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
PM-07	0,8	0,2	0,28	0,9
PM-08	0,11	0,037	0,0005	0,9
PB-01	0,84	2,4	0,25	6,2
RBSL	0,21	70	170	200


 = Concentração acima do RBSL



TABELA 7.3.1. CÁLCULO DE PRESSÕES PARA AIR SPARGING									
$\delta = 2,2$		$\phi = 0,45$		coluna d'água = 2,15 m					
		Pressão Solo		Pressão Hidrostática			Pressão Total (PSI)		
Prof. (m)	Pressão (kN/m <sup>2</sup> )	Pressão (PSI)	Pressão (kN/m <sup>2</sup> )	Pressão (PSI)	Pressão (kN/m <sup>2</sup> )	Pressão (PSI)	100%	80%	60%
2	23,72	3,44	9,48	1,38			4,81	3,85	2,89
3	35,57	5,16	9,48	1,38			6,53	5,23	3,92
4	47,43	6,88	9,48	1,38			8,25	6,60	4,95
5	59,29	8,60	9,48	1,38			9,97	7,98	5,98
6	71,15	10,32	9,48	1,38			11,69	9,36	7,02
7	83,01	12,04	9,48	1,38			13,41	10,73	8,05
8	94,86	13,76	9,48	1,38			15,13	12,11	9,08
9	106,72	15,48	9,48	1,38			16,85	13,48	10,11
10	118,58	17,20	9,48	1,38			18,57	14,86	11,14
11	130,44	18,92	9,48	1,38			20,29	16,23	12,18
12	142,30	20,64	9,48	1,38			22,01	17,61	13,21
13	154,15	22,36	9,48	1,38			23,73	18,99	14,24
14	166,01	24,08	9,48	1,38			25,45	20,36	15,27
15	177,87	25,80	9,48	1,38			27,17	21,74	16,30
20	237,16	34,40	9,48	1,38			35,77	28,62	21,46



**TABELA 7.3.1.b. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO**

POÇO	PROFUNDIDADE (m)	DISTÂNCIA - AS-01 (m)	DISTÂNCIA - EV-01 (m)	DIÂMETRO (pol.)	SEÇÃO FILTRANTE (m)
EV-01	3,1	4	-	4	2,1 – 3,0
AS-01	5,2	-	4	2	5,0 – 5,2
PO-01R	2,5	5,1	1,2	2	1,0 – 2,5
PO-01P	5,2	5,1	1,2	2	4,1 – 5,2
PO-02R	3,1	0,9	3	2	1,5 – 3,1
PO-02P	5,1	1	3	2	4,1 – 5,1
PO-03R	3,2	2,1	3	2	1,5 – 3,2
PO-03P	5,2	2	6	2	4,1 – 5,2
PO-04	2,2	3	1	2	1,2 – 2,2



TABELA 7.3.1.1. - MEDIÇÕES EFETUADAS NO ENSAIO PILOTO DE AIR SPARGING

DIA			PRIMEIRO						SEGUNDO				
HORA			09:30	11:00	12:00	13:45	14:45	15:50	09:20	09:15	09:48	14:15	09:30
TEMPO DE TESTE (h)			0	1,5	2,5	4,25	5,25	6,3	23,8	47,75	72,15	76,75	96
POÇO	PARÂMETRO	UNID.	VALORES										
AS-01	Pressão PI-01	PSI	27	26	27	27	27	-	29	29	0	0	0
	Pressão PI-02	PSI	9	5	5	5	3	-	6	6	0	0	0
	Vazão FI-01	scfm	5	5	5	5	5,5	-	5	5	0	0	0
	Vazão FI-01	m³/h	8,5	8,5	8,5	8,5	9,3	-	8,5	8,5	0	0	0
PB-01	NA	m	2,69	2,73	2,73	2,74	2,76	2,75	2,51	2,52	2,62	2,63	-
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-
PO-01R	NA	m	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,61	3,62	3,62	3,63	3,62
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VOCs	ppm	1000	1760	2200	2200	11000	11000	250	660	40	300	300
	O₂	%	10,1	7,1	0,4	2,8	0,7	0,3	11,2	12,5	19,2	6,7	14,5
	Pressão	pca	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	-	-	-	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	-
PO-01P	NA	m	3,78	3,76	3,77	3,80	3,82	3,82	3,65	3,65	3,69	3,68	-
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VOCs	ppm	225	150	175	150	5	0	100	150	200	10	-
	O₂	%	20,4	19	18,3	20,1	20,1	19,5	20,9	20,1	19,8	19,1	-
	Pressão	pca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00	0,00	-
PO-02R	NA	m	3,76	3,62	3,66	3,73	3,77	3,80	3,76	3,73	3,67	3,68	3,69
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VOCs	ppm	650	150	149	100	100	-	50	25	90	140	160
	O₂	%	18,7	19,6	19,1	19,7	19,9	19,9	20,2	19,8	18,8	16,8	17,1
	Pressão	pca	0,0	2,0	2,2	2,2	2,4	2,7	3,1	0,0	0,0	0,0	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	1,40	7,80	7,40	8,31	8,00	8,20	8,93	7,30	1,67	2,00	-
PO-02P	NA	m	3,78	3,58	3,57	3,75	3,82	3,91	3,66	3,70	3,68	3,70	-
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VOCs	ppm	400	125	100	100	75	-	300	10	50	50	-
	O₂	%	19	19,2	19	17,6	19,9	19,1	19,4	19,3	17,9	18,2	-
	Pressão	pca	0,0	6,2	6,8	3,5	2,9	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	0,71	8,37	8,40	8,91	8,52	8,50	8,00	2,85	1,16	0,41	-
PO-03R	NA	m	3,86	3,57	3,60	3,68	3,71	3,74	3,73	3,85	3,79	3,80	3,81
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VOCs	ppm	6050	1650	1100	660	850	250	250	120	1000	1925	5500
	O₂	%	7,3	15,7	16,2	18,5	17,7	17,9	19,7	20,3	8,1	0	2,8
	Pressão	pca	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	1,20	5,76	6,00	6,50	6,38	6,18	5,50	9,25	2,00	3,08	-
PO-03P	NA	m	4,94	4,88	4,85	4,80	4,77	4,75	4,39	4,06	3,88	3,87	-
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VOCs	ppm	340	200	50	400	348	-	200	100	100	100	-
	O₂	%	17,5	17,7	19,2	18,8	18,5	17,2	20,9	20,9	17,6	19,9	-
	Pressão	pca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	0,13	0,09	0,18	0,06	0,00	0,05	0,00	0,20	0,00	0,00	-
PO-04	VOC	ppm	11000	5500	4400	5170	1650	1320	6600	800	475	400	660
	O₂	%	-	2,8	2	6,4	5,6	8,7	13,5	16,6	5,8	3,6	3,1
	Pressão	pca	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0	0	0	-
PB-01	NA	m	2,69	2,73	2,73	2,74	2,76	2,75	2,51	2,52	2,62	2,63	-
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-
PM-07	NA	m	2,16	2,17	2,16	2,18	2,20	2,19	2,04	2,00	2,05	2,11	2,10
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	0,15	-	-	-
PM-08	NA	m	2,76	2,74	2,77	2,82	2,86	2,85	2,59	2,61	2,67	2,66	2,67
	NO	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Oxigênio dissolvido	mg/L	0,00	0,20	-	-	-	2,95	0,00	0,00	-	-	-



**TABELA 7.3.1.2. - MEDIÇÕES EFETUADAS NO ENSAIO PILOTO DE SVE**

HORA		11:00	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50	11:55	12:00	12:05	12:10	12:15	12:25	12:35	12:40	13:55	14:05	14:10	14:15	14:20
TEMPO DE TESTE (min)		-	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	85	160	170	175	180	185
POÇO	PARÂMETRO	UNID.	VALORES																				
EV-01	Vácuo	pca	58,3	58,3	58,3	58,3	58,3	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	-
	Velocidade	m/s	-	0,91	1	1,15	1,19	0,9	0,91	0,97	0,95	0,96	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	-
	Temperatura	°C	-	19,7	19,4	19,2	19,3	19,4	19,6	21,6	21,7	22,3	23,3	23,6	24,1	24,8	24,9	24	25	25,3	24,5	24,5	-
	Umidade relativa	%	-	66,8	66	54,1	52,1	53,3	54,8	49,3	49,9	47	44	43,5	42,6	41,8	43	48,8	40,8	41,8	47,6	44,6	-
	Fluxo	m³/h	25,5	27,5	28,6	32,7	33,9	34,3	28	25,9	28,7	27,4	27,4	27,3	27,3	28	28	27,5	28,3	28	27,3	27,7	-
	VOCs	ppm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	600	-	625	600	-	575	-	-	-	-	11000
PO-01R	NA	m	3,47	3,35	3,18	3,02	2,97	2,86	2,86	2,92	2,92	2,92	-	-	-	-	2,78	2,75	-	-	-	-	3,29
	NA	m	3,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,62	-	-	-	-	-	-	-	3,62
	VOCs	ppm	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350
	O <sub>2</sub>	%	14,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,80%
PO-04	Vácuo	pca	-	1,2	1,4	1,6	1,6	1,1	1,1	1,1	1	1	1,15	1,1	1,15	1,2	-	1,3	1,5	-	-	1,1	-
	VOCs	ppm	660	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	25
	O <sub>2</sub>	%	3,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,30%
	Vácuo	pca	-	2,8	3,1	3,4	3,5	2,4	2,2	2,3	2,2	2,2	2,3	2,25	2,35	2,2	-	2,1	2,5	-	-	2	-
PO-02R	NA	m	3,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,75	-	-	3,725	-	-	-	-	3,71
	VOCs	ppm	160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50
	O <sub>2</sub>	%	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Vácuo	pca	-	0,3	0,4	0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,25	0,35	0,25	-	0,2	0,3	-	-	0,25	-
PO-03R	NA	m	3,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,83	-	-	3,835	-	-	-	-	3,84
	VOCs	ppm	5500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10%	-	-	-	350
	O <sub>2</sub>	%	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20%
	Vácuo	pca	-	<0,1	<0,1	0,1	0,1	<0,1	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	-	-	<0,1	-



**Tabela 7.3.2. - Limites Estabelecidos pela Análise de Risco (RBSL) - RBCA**

Composto	Água Subterrânea (mg/L)
Benzeno	0,210
Tolueno	70
Xilenos	200
Etilbenzeno	170



**Tabela 7.3.3.1. Monitoramento da saída de gases durante 5 meses de operação do sistema**

Código	tempo dias	tempo h	VOC pontual ppm-v	VOC médio ppm-v	VOC médio mg/m3	VOC médio kg/m3	Q pontual m3/h	Q média m3/h	Remoção kg/h	Remoção período kg	Remoção Acumulada Kg
37001	0		7150				65,70				
37006	5	96,00	1100	4125	14509	0,0145	58,60	62,15	0,9017	0	0,0
37019	13	249,60	875	987,5	3473	0,0035	63,40	61	0,2119	20	20,3
37022	3	57,60	330	602,5	2119	0,0021	55,40	59,4	0,1259	31	51,8
37046	24	460,80	950	640	2251	0,0023	37,40	46,4	0,1045	6	57,8
37064	18	345,60	1100	1025	3605	0,0036	4,30	20,85	0,0752	35	92,4
37069	5	96,00	0	0	0	0,0000	0,00	0	0,0000	0	92,4
37099	30	576,00	1100	550	1935	0,0019	52,50	26,25	0,0000	0	92,4
37112	13	249,60	550	825	2902	0,0029	40,00	20	0,0580	0	92,4
37120	8	153,60	330	440	1548	0,0015	31,00	35,5	0,0549	14	106,1
37126	6	115,20	880	605	2128	0,0021	14,30	22,65	0,0482	7	113,5
37134	8	153,60	375	627,5	2207	0,0022	39,60	26,95	0,0595	7	120,4
37140	6	115,20	420	397,5	1398	0,0014	28,50	34,05	0,0476	7	127,7
37154	14	268,80	450	435	1530	0,0015	50	39,25	0,0601	7	134,6
37167	13	249,60	450	450	1583	0,0016	50	50	0,0791	21	155,9
37174	7	134,40	450	450	1583	0,0016	71,5	60,75	0,0962	24	179,9



TABELA 7.3.4.1. - RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DURANTE TODO ANDAMENTO DO CASO - BTXE e TPH GRO (mg/L)

Parâmetro	Unidade	PM-04					PM-05					RBSL
		Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	7 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	7 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	
Benzeno	mg/l	0,390	1,4	0,680	0,0162	0,0020	1,200	0,0021	0,016	0,0418	0,0544	0,21
Tolueno	mg/l	3,000	0,86	0,042	0,0009	<0,0005	2,400	0,0006	0,027	0,0304	0,0338	70
Etilbenzeno	mg/l	0,820	0,28	0,150	0,0009	<0,0005	0,015	0,001	0,008	0,0092	0,0091	170
Xilenos	mg/l	7,500	1,4	0,710	0,0009	<0,0005	7,100	0,0028	0,150	0,0438	0,0789	200
TPH GRO	mg/l			3,2	0,0009	<0,1			1	0,7	1,2	-
Parâmetro	Unidade	PM-06					PM-08					RBSL
		Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	7 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	5 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	7 meses de operação do <i>Air Sparging</i>	
Benzeno	mg/l	<0,005	<0,0005	<0,5	0,0047	<0,0005	1,700	0,11	0,410	0,0011	<0,0005	0,21
Tolueno	mg/l	0,110	<0,0005	<0,5	0,0015	<0,0005	1,100	0,037	0,028	<0,0005	<0,0005	70
Etilbenzeno	mg/l	0,063	<0,0005	<0,5	<0,0005	<0,0005	0,480	<0,0005	0,110	<0,0005	<0,0005	170
Xilenos	mg/l	0,850	<0,0005	0,500	0,0021	<0,0005	3,900	0,9	0,150	<0,0005	<0,0005	200
TPH GRO	mg/l			0,1	0,2	<0,1			2,2	<0,1	<0,1	-

RBSL = relacionado à inalação de vapores orgânicos pelos trabalhadores comerciais do posto em ambientes confinados

Concentração acima do RBSL

Não analisado



**Tabela 7.3.4.2. Monitoramento dos gases durante toda operação do sistema**

Código	tempo dias	tempo h	VOC pontual ppm-v	VOC médio ppm-v	VOC médio mg/m3	VOC médio kg/m3	Q pontual m3/h	Q média m3/h	Remoção kg/h	Remoção período kg	Remoção Acumulada Kg
37001	0		7150				65,70				
37006	5	96,00	1100	4125	14509	0,0145	58,60	62,15	0,9017	0	0,0
37019	13	249,60	875	987,5	3473	0,0035	63,40	61	0,2119	20	20,3
37022	3	57,60	330	602,5	2119	0,0021	55,40	59,4	0,1259	31	51,8
37046	24	460,80	950	640	2251	0,0023	37,40	46,4	0,1045	6	57,8
37064	18	345,60	1100	1025	3605	0,0036	4,30	20,85	0,0752	35	92,4
37069	5	96,00	0	0	0	0,0000	0,00	0	0,0000	0	92,4
37099	30	576,00	1100	550	1935	0,0019	52,50	26,25	0,0000	0	92,4
37112	13	249,60	550	825	2902	0,0029	40,00	20	0,0580	0	92,4
37120	8	153,60	330	440	1548	0,0015	31,00	35,5	0,0549	14	106,1
37126	6	115,20	880	605	2128	0,0021	14,30	22,65	0,0482	7	113,5
37134	8	153,60	375	627,5	2207	0,0022	39,60	26,95	0,0595	7	120,4
37140	6	115,20	420	397,5	1398	0,0014	28,50	34,05	0,0476	7	127,7
37154	14	268,80	450	435	1530	0,0015	50	39,25	0,0601	7	134,6
37167	13	249,60	450	450	1583	0,0016	50	50	0,0791	21	155,9
37174	7	134,40	450	450	1583	0,0016	71,5	60,75	0,0962	24	179,9
37181	7	134,40	1070	760	2673	0,0027	60,5	66	0,1764	24	203,6
37188	7	134,40	220	645	2269	0,0023	40,25	50,375	0,1143	15	219,0
37208	20	384,00	260	240	844	0,0008	40,25	40,25	0,0340	5	223,5
37215	7	134,40	260	260	915	0,0009	40,25	40,25	0,0368	14	237,7
37225	10	192,00	300	280	985	0,0010	40,25	40,25	0,0396	5	243,0
37231	6	115,20	190	245	862	0,0009	20	30,125	0,0260	5	248,0
37246	15	288,00	80	135	475	0,0005	20	20	0,0095	1	249,1
36900	0	0,00	80	80	281	0,0003	20	20	0,0056	2	250,7



TABELA 7.3.4.3. - RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DURANTE TODO ANDAMENTO DO CASO - BTXE e TPH GRO (mg/L)														
Parâmetro	Unidade	PM-04						PM-05						RBSL
		Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	Durante a operação do <i>Air Sparging</i>	Fim da remediação por <i>Sparging</i>	10 meses após o desligamento do sistema	Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	Durante a operação do <i>Air Sparging</i>	Fim da remediação por <i>Sparging</i>	10 meses após o desligamento do sistema	
Benzeno	mg/l	0,390	1,4	0,680	0,0162	0,0020	<0,0005	1,200	0,0021	0,016	0,0418	0,0544	0,0136	0,21
Tolueno	mg/l	3,000	0,86	0,042	0,0009	<0,0005	0,0001	2,400	0,0006	0,027	0,0304	0,0338	0,0185	70
Etilbenzeno	mg/l	0,820	0,28	0,150	0,0009	<0,0005	<0,0005	0,015	0,001	0,008	0,0092	0,0091	0,0235	170
Xilenos	mg/l	7,500	1,4	0,710	0,0009	<0,0005	<0,0005	7,100	0,0028	0,150	0,0438	0,0789	0,0825	200
TPH GRO	mg/l			3,2	0,0009	<0,1	0,2			1	0,7	1,2	3,8	-
Parâmetro	Unidade	PM-06						PM-08						RBSL
		Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	Durante a operação do <i>Air Sparging</i>	Fim da remediação por <i>Sparging</i>	10 meses após o desligamento do sistema	Investigação inicial e bombeamento	Início do sistema de bombeamento	Início do sistema de <i>Air Sparging</i>	Durante a operação do <i>Air Sparging</i>	Fim da remediação por <i>Sparging</i>	10 meses após o desligamento do sistema	
Benzeno	mg/l	<0,005	<0,0005	<0,5	0,0047	<0,0005	<0,0005	1,700	0,11	0,410	0,0011	<0,0005	0,0043	0,21
Tolueno	mg/l	0,110	<0,0005	<0,5	0,0015	<0,0005	<0,0005	1,100	0,037	0,028	<0,0005	<0,0005	0,0011	70
Etilbenzeno	mg/l	0,063	<0,0005	<0,5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,480	<0,0005	0,110	<0,0005	<0,0005	0,0018	170
Xilenos	mg/l	0,850	<0,0005	0,500	0,0021	<0,0005	<0,0005	3,900	0,9	0,150	<0,0005	<0,0005	0,0047	200
TPH GRO	mg/l			0,1	0,2	<0,1	<0,1			2,2	<0,1	<0,1	0,3	-

RBSL = relacionado à inalação de vapores orgânicos pelos trabalhadores comerciais do posto em ambientes confinados

Concentração acima do RBSL

Não analisado



**TABELA 7.3.4.4. – DADOS DAS AMOSTRAS DE SOLO E RESULTADOS ANALÍTICOS 10 MESES APÓS O DESLIGAMENTO DO SISTEMA**

AMOSTRA	INTERVALO DE COLETA (m)	C5-C10 (mg/kg)	BENZENO (mg/kg)	TOLUENO (mg/kg)	ETILBENZENO (mg/kg)	XILENOS (mg/kg)
S-01	2,00-2,90	19,7	0,0198	0,176	0,167	0,457
S-02	1,50-1,60	17,4	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
S-03	1,50-1,60	0,2	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
RBSL (mg/kg) *		-	0,66	780	>650	>510

\* RBSL relacionado à inalação de vapores pelos trabalhadores comerciais em ambientes confinados



### **ANEXO 3**

## **MEMORIAL DE CÁLCULOS DE “SLUG TEST”**



# MEMORIAL DE CÁLCULO DO "SLUG TEST "

Poço Ensalado: PM-03

t (min)	NA ou h (m)	(H-h)/(H-H0)	LOG[(H-h)/(H-H0)]
0	3,19	1,0	0,0
0,5	3,16	0,989	-0,004852503
1	3,14	0,981	-0,008117890
1,5	3,12	0,974	-0,011408016
2	3,10	0,967	-0,014723257
2,5	3,08	0,959	-0,018064000
3	3,05	0,948	-0,023123799
3,5	3,04	0,944	-0,024823584
4	3,02	0,937	-0,028243243
4,5	3,00	0,930	-0,031690043
5	2,98	0,922	-0,035164417
6	2,94	0,907	-0,042197680
7	2,89	0,889	-0,051152522
8	2,85	0,874	-0,058451761
9	2,82	0,863	-0,064007843
10	2,78	0,848	-0,071528282
12	2,7	0,819	-0,086971490
14	2,64	0,796	-0,098925304
16	2,55	0,763	-0,117496544
18	2,47	0,733	-0,134698574
20	2,43	0,719	-0,143562034
25	2,15	0,615	-0,211255676
30	1,98	0,552	-0,258177496
40	1,72	0,456	-0,341458653

H =	0,49	m
H0=	3,19	m
r =	0,05	m
L =	3	m

$$y = m \cdot x + b$$

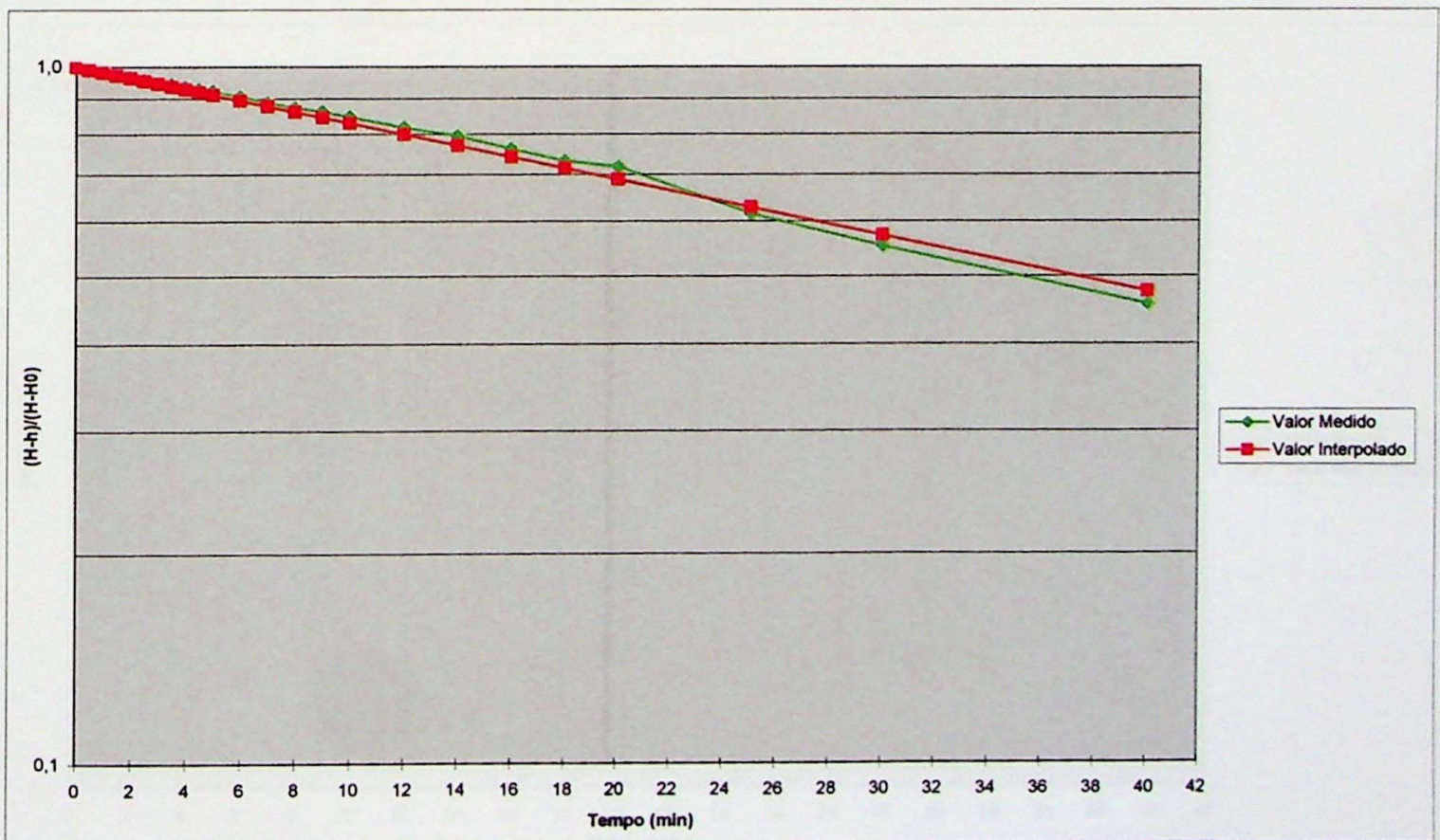
$$m = -8,1E-3$$

$$r^2 = 0,994 \quad \text{OK}$$

$$b = 0$$

T0=	53,5	min
	3207,2	s
K =	5,32E-7	m/s
K =	5,32E-5	cm/s

t (min)	(H-h)/(H-H0)	LOG[(H-h)/(H-H0)]
0	1,0	0,0
0,5	0,990743061	-0,004038961
1	0,981571814	-0,008077921
1,5	0,972485464	-0,012116882
2	0,963483226	-0,016155842
2,5	0,954564321	-0,020194803
3	0,945727977	-0,024233763
3,5	0,936973432	-0,028272724
4	0,928299926	-0,032311684
4,5	0,919706711	-0,036350645
5	0,911193042	-0,040389605
6	0,894401407	-0,048467526
7	0,877919211	-0,056545447
8	0,861740753	-0,064623368
9	0,845860434	-0,072701289
10	0,83027276	-0,08077921
12	0,799953877	-0,096935052
14	0,770742142	-0,113090894
16	0,742597125	-0,129246737
18	0,715479873	-0,145402579
20	0,689352856	-0,161558421
25	0,628133526	-0,201948026
30	0,572350899	-0,242337631
40	0,475207360	-0,323116841





# MEMORIAL DE CÁLCULO DO "SLUG TEST "

Poço Ensalado: PM-04

t (min)	NA ou h (m)	(H-h)/(H-H0)	LOG[(H-h)/(H-H0)]
0	6,05	1,0	0,0
0,5	6,04	0,995	-0,002043743
1	5,99	0,972	-0,012409258
1,5	5,97	0,962	-0,016625742
2	5,95	0,953	-0,020883566
2,5	5,92	0,939	-0,027349608
3	5,89	0,925	-0,033913377
3,5	5,87	0,915	-0,038344992
4	5,84	0,901	-0,045078375
4,5	5,81	0,887	-0,051917799
5	5,79	0,878	-0,056537997
6	5,74	0,854	-0,068308215
7	5,70	0,836	-0,077959601
8	5,66	0,817	-0,087830355
9	5,61	0,793	-0,100492899
10	5,56	0,770	-0,113535755
12	5,47	0,728	-0,138047905
14	5,39	0,690	-0,161062269
16	5,3	0,648	-0,188500517
18	5,24	0,620	-0,207805672
20	5,16	0,582	-0,234957918
25	5	0,507	-0,294955848
30	4,82	0,423	-0,374137094
40	4,54	0,291	-0,535987914

H =	3,92	m
H0 =	6,05	m
r =	0,05	m
L =	4	m

$$y = m \cdot x + b$$

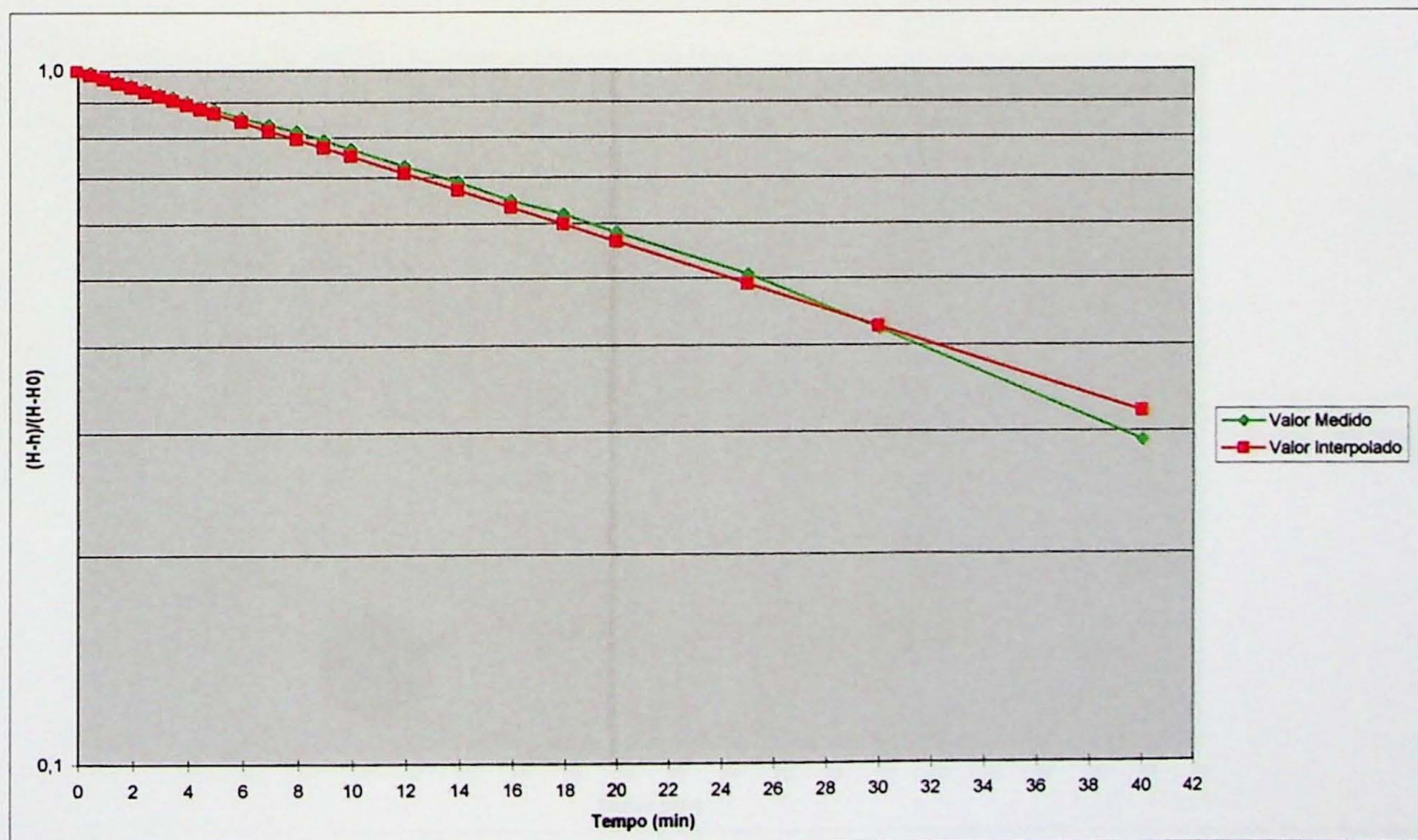
$$m = -12,4E-3$$

$$r^2 = 0,996 \quad \text{OK}$$

$$b = 0$$

T0 =	34,9	min
	2097,0	s
K =	6,53E-7	m/s
K =	6,53E-5	cm/s

t (min)	(H-h)/(H-H0)	LOG[(H-h)/(H-H0)]
0	1,0	0,0
0,5	0,985876597	-0,006177443
1	0,971952664	-0,012354886
1,5	0,958225385	-0,018532328
2	0,944691981	-0,024709771
2,5	0,931349716	-0,030887214
3	0,918195888	-0,037064657
3,5	0,905227837	-0,043242099
4	0,892442939	-0,049419542
4,5	0,879838608	-0,055596985
5	0,867412293	-0,061774428
6	0,843083689	-0,074129313
7	0,819437437	-0,086484199
8	0,7964544	-0,098839084
9	0,774115976	-0,11119397
10	0,752404085	-0,123548855
12	0,710790106	-0,148258626
14	0,671477714	-0,172968397
16	0,634339612	-0,197678168
18	0,599255545	-0,222387939
20	0,566111908	-0,24709771
25	0,491052428	-0,308872138
30	0,425944912	-0,370646565
40	0,320482692	-0,49419542





## MEMORIAL DE CÁLCULO DO "SLUG TEST "

Poço Ensalado:PM-08

t (min)	NA ou h (m)	(H-h)/(H-H0)	LOG[(H-h)/(H-H0)]
0	5,93	1,0	0,0
0,5	5,89	0,988	-0,005049993
1	5,86	0,980	-0,008876401
1,5	5,82	0,968	-0,014031292
2	5,79	0,960	-0,017938015
2,5	5,74	0,945	-0,024528346
3	5,69	0,931	-0,031220227
3,5	5,64	0,916	-0,038016837
4	5,60	0,905	-0,043531761
4,5	5,57	0,896	-0,047714405
5	5,51	0,879	-0,056202515
6	5,45	0,861	-0,064859835
7	5,38	0,841	-0,075183110
8	5,29	0,815	-0,088826990
9	5,22	0,795	-0,099743405
10	5,15	0,775	-0,110941305
12	5,00	0,731	-0,135955578
14	4,86	0,691	-0,160678198
16	4,71	0,647	-0,188828080
18	4,59	0,613	-0,212740238
20	4,47	0,578	-0,238046103
25	4,19	0,497	-0,303547652
30	3,92	0,419	-0,377708097
40	3,50	0,298	-0,526238874

H =	2,47	m
H0 =	5,93	m
r =	0,05	m
L =	4	m

$$y = m \cdot x + b$$

$$m = -12,3E-3$$

$$r^2 = 0,997 \quad \text{OK}$$

$$b = 0$$

T0 =	35,0	min
	2099,2	s
K =	6,52E-7	m/s
K =	6,52E-5	cm/s

t (min)	(H-h)/(H-H0)	LOG[(H-h)/(H-H0)]
0	1,0	0,0
0,5	0,985891139	-0,006171037
1	0,971981338	-0,012342074
1,5	0,958267788	-0,01851311
2	0,944747721	-0,024684147
2,5	0,931418406	-0,030855184
3	0,918277153	-0,037026221
3,5	0,905321308	-0,043197258
4	0,892548255	-0,049368295
4,5	0,879955416	-0,055539331
5	0,867540247	-0,061710368
6	0,84323293	-0,074052442
7	0,819606671	-0,086394515
8	0,796642388	-0,098736589
9	0,774321534	-0,111078663
10	0,752626081	-0,123420736
12	0,711041774	-0,148104884
14	0,671755095	-0,172789031
16	0,634639095	-0,197473178
18	0,599573838	-0,222157325
20	0,566446017	-0,246841473
25	0,491414718	-0,308551841
30	0,426322046	-0,370262209
40	0,320861090	-0,493682945

