

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira
2009

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

“Avaliação de processos de caracterização e remediação de passivos ambientais de contaminação por hidrocarbonetos.”

PALLOMA RIBEIRO DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Lollo

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Ilha Solteira

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

S586a	<p>Silva, Palloma Ribeiro da. Avaliação de processos de caracterização e remediação de passivos ambientais de contaminação por hidrocarbonetos / Palloma Ribeiro da Silva. – Ilha Solteira : [s.n.], 2009. 100 f. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2009</p> <p>Orientador: José Augusto de Lollo Bibliografia: p. 84-89</p> <p>1. Águas subterrâneas - Poluição. 2. Hidrocarbonetos. 3. Remediação.</p>
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO: Avaliação de processos de caracterização e remediação de passivos ambientais de contaminação por hidrocarbonetos

AUTORA: PALLOMA RIBEIRO DA SILVA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL, Área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MAURÍCIO AUGUSTO LEITE
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. LISSANDRA XAVIER ITO
ARCADIS Hidroambiente S.A.

Data da realização: 21 de agosto de 2009.

DEDICATÓRIA

À minha avó Cornélia (*em memória*)
que sempre me apoiou e sonhou meus
sonhos ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pelo a vida e por ter colocados tantas pessoas a minha volta que me ajudam a viver, sonhar e realizar meus sonhos.

Ao professor George pelo seu grande apoio, incentivo e empenho para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Ao professor Lollo pelo conhecimento, atenção e principalmente por todo apoio oferecido.

Aos meus colegas de trabalho Raphael, Raoni, Lissandra e Hori, por toda ajuda no crescimento pessoal e profissional. Ajudando que eu alcançasse o conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

Ao professor Márcio por se demonstrar solícito nos momentos de dificuldades.

Aos meus pais pelo grande incentivo e motivação durante todo o período de realização curso.

Ao meu noivo Rafael pelo amor, compreensão, paciência e por sempre se fazer presente nos momentos em que precisei.

Às minhas amigas Francini, Helena, Babi, Júlia, Alessandra, Juliana, Érica e Elaine que sempre me apoiaram e me ajudaram a superar as dificuldades que houveram durante esses anos, e com certeza comemorarão comigo essa vitória.

À ARCADIS Hidroambiente pelo apoio oferecido com relação a disponibilidade de tempo.

A CAPES pelo apoio financeiro, o qual foi fundamento para a realização do trabalho.

RESUMO

A remediação de solos e águas subterrâneas impactadas por derramamentos de petróleo é uma atividade que geralmente envolve altos custos e longos períodos de tempo. Técnicas convencionais como a escavação dos solos contaminados, seguida de tratamento ou disposição em aterros, têm sido utilizadas para efetuar a remediação de locais contaminados, apesar de apresentarem, muitas vezes, elevados custos, bem como possibilitarem impactos adicionais ao ambiente. Além destas, outras técnicas têm sido aprimoradas, testadas e avaliadas em relação a sua eficiência/eficácia e custo, incluindo a contenção, biorremediação, desorção térmica, oxidação química, extração de vapores, bombeamento e tratamento de águas subterrâneas. Uma técnica de bombeamento e tratamento do solo e água subterrânea é o MPE - Extração Multifásica. O presente estudo caracterizou duas ocorrências de passivos ambientais e o processo de remediação da fase livre das águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos derivados do petróleo utilizando o sistema de extração multifásica. No estudo de caso foram analisados dois postos. No posto 1 foi calculada uma área de 2.000m² de fase livre, resultando em um volume de 300m³. O posto 2 apresentou um volume menor de fase livre, foi calculada uma área de 40m², com volume de 1m³. Após 12 meses de operação do sistema MPE houve uma redução de 100% da espessura da fase livre no posto 1. O posto 2, que possui solo mais argiloso, em 16 meses de operação houve uma redução de 99% da espessura da fase livre. Como esperado, a remoção da fase livre pelo sistema MPE foi mais eficiente no solo argilo-arenoso, encontrado no posto 1, mas contrariando a muitos autores também apresentou eficiência no solo argiloso do posto 2.

PALAVRAS-CHAVES: Remediação. MPE. Água subterrânea. Fase livre.

ABSTRACT

Remediation of soil and groundwater impacted by oil spill is a process which normally involves elevated costs and long periods of time. Conventional techniques such as excavation of contaminated soils followed by special treatments or deposit on landfills has been used to remediate areas with contaminated soil. However this treatment can also create new impacts to the environment where contamination had been deposited. In addition, new techniques such as contention, bioremediation, thermal desorption, chemical oxidation, air stripping and pumping treatment has been developed, tested and evaluated by their efficiency, effectiveness and costs.

The Multi Phase Extraction (MPE) is a pumping treatment technique used in the present study. The study characterised two episodes of environmental liabilities, as well as the process of remediation, applying the MPE technique to remediate the free phase of petroleum hydrocarbons present in the groundwater. The first area studied was a petrol station which had an area of 2000 square meters of petroleum hydrocarbon contaminated soil, resulting in a volume of 300 cubic meters of free phase in the groundwater. The second petrol station had a volume of free phase of petroleum hydrocarbon smaller than the first one. It had an area of 40 square meters of contaminated soil, resulting a volume of 1 cubic meter of free phase in the ground water. Twelve months after the MPE system was implanted, the thickness of the free phase had decreased 100%, at the first petrol station. The second area, where the MPE was implanted, took sixteen months to reduce 99% of the petroleum hydrocarbon thickness, owing to the second petrol station being situated in an area of clay soil. The remediation of the petroleum hydrocarbon in the groundwater by the MPE system was more efficient in the first area as expected, owing to the knowledge that the first petrol station is located in an area with sandy clay soil. The remediation of the free phase in the second petrol station was as good as the first. However it took 16 month to be removed as it is in an area of clay soil.

Key-words: Remediation. Multi Phase Extraction (MPE). Groundwater. Free phase.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fases da contaminação.....	22
Figura 3.2 – “Status” de aplicação das técnicas de remediação.....	36
Figura 3.3 – Seção esquemática de um sistema MPE.....	39
Figura 4.1 – Fluxograma de abordagem em nível.....	43
Figura 4.2 – Modelo de concentração hidráulica por poço de bombeamento.....	49
Figura 4.3 – Esquema do Sistema MPE.....	50
Figura 4.4 – Parâmetros hidráulicos de um poço em bombeamento (aquífero livre).....	52
Figura 4.5-Gráfico altura da bomba x raio de influência.....	55
Figura 5.1- Seção Geológica Posto 1.....	61
Figura 5.2-Gráficos da espessura das fases livres nos poços de bombeamento e monitoramento do Posto1.....	70
Figura 5.3 - Gráfico da espessura das fases livres nos poços de bombeamento e monitoramento do Posto1.....	71
Figura 5.4- Seção Geológica Posto 2.....	74
Figura 5.5- Gráfico da espessura das fases livres nos poços de bombeamento e monitoramento do Posto2.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros analíticos para BTEX no solo (mg/kg).....	30
Tabela 3.2 – Parâmetros analíticos para PAH's no solo (mg/kg).....	30
Tabela 3.3 – Parâmetros analíticos para TPH's no solo (mg/kg).....	30
Tabela 3.4 – Parâmetros analíticos para BTEX na água (µg/L).....	31
Tabela 3.5 – Parâmetros analíticos para PAH's na água (µg/L).....	31
Tabela 3.6 – Parâmetros analíticos para TPH's na água (µg/L).....	31
Tabela 5.1 – Espessuras de fase livre aparente e real encontradas nos poços de extração das áreas de tancagem e lavagem.....	68
Tabela 5.2 – Massa estimada de fase livre de óleo.....	69
Tabela 5.3 – Espessuras de fase livre aparente e real encontradas nos poços de monitoramento.....	78
Tabela 5.4 – Massa estimada de fase livre de óleo.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACBR	- Ações Corretivas com Base no Risco
ANA	- Agência Nacional das Águas
APMax	- Área de Proteção Máxima
BTEX	- Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente
EEA	- European Environment Agency
EPA	- Environmental Protection Agency
LNAPL	- Light Non Aqueous Phase Liquid
MPE	- Extração Multifásica
NABR	- Níveis de Avaliação Baseada no Risco
NBR	- Norma Brasileira Registrada
OMS	- Organização Mundial da Saúde
ONU	- Organização das Nações Unidas
PAH	- Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares
PB	- Poço de Bombeamento
PNMA	- Política Nacional do Meio Ambiente
PM	- Poço de Monitoramento
PRG's	- Preliminary Remediation Goals
SABESP	- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
VI	- Valor de Intervenção
VP	- Valor de Prevenção
VRQ	- Valor de Referência de Qualidade

LISTA DE SÍMBOLOS

h_p	Altura da bomba	M
Q	Vazão do poço	m^3/s
r_p	Raio do poço	Pol
r	Raio de influência	M
h	Altura do poço	M
k	Coefficiente de permeabilidade do solo	m/s
V_B	Volume da Bomba	m^3
ϕ_B	Diâmetro da Bomba	Pol
Tg	Espessura real de fase livre no aquífero	m
t	Espessura aparente	m
do	Densidade do produto	kg/m^3
da	Densidade da água	kg/m^3
VFL	Volume real de fase livre do subsolo	m^3
Vt	Volume total calculado conforme	m^3
θ_t	Porosidade total estimada no solo	%
mFL	Massa real de fase livre do subsolo	kg
VFL	Volume real de fase livre do subsolo	m^3

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO.....	18
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1. IMPACTO AMBIENTAL.....	19
3.1.1. Impactos no solo e nas águas.....	19
3.1.2. Impactos devidos a hidrocarbonetos.....	20
3.1.3. Quantificação do impacto ambiental devido a hidrocarbonetos.....	21
3.2. LEGISLAÇÃO.....	26
3.2.1. CETESB 2005 – Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea no Estado de São Paulo.....	28
3.2.2. Padrão Holandês para o Solo e Água Subterrânea.....	28
3.2.3. U.S. Environmental Protection Agency (EPA).....	29
3.3. REMEDIAÇÃO.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1. BOMBEAMENTO E TRATAMENTO NO SISTEMA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE).....	47
4.2. POÇOS DE BOMBEAMENTO NO SISTEMA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE).....	48
4.3. MEMORIAL DESCRITIVO.....	49
4.3.1. Bomba Pneumática.....	50
4.3.2. Compressor de Ar.....	50
4.3.3. Controle de Vazão Pneumática.....	51
4.3.4. Reservatório de Óleo.....	55
4.3.5. Caixa Decantadora.....	56
4.3.6. Caixa Separadora de Água e Óleo (SAO).....	56
4.4. CÁLCULO DA ESPESSURA REAL DA FASE LIVRE.....	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1. ESTUDO DE CASO: POSTO 1.....	59
5.1.1. Avaliação do entorno.....	60
5.1.2. Contexto geológico.....	60

5.1.2.1. <i>Geologia regional</i>	60
5.1.2.2. <i>Geologia local</i>	60
5.1.3. Hidrogeologia	62
5.1.4. Investigação Preliminar	62
5.1.5. Investigação detalhada / confirmatória.....	63
5.1.6. Análise de risco.....	65
5.1.7. Remediação.....	67
5.1.7.1. <i>Monitoramento</i>	69
5.2. ESTUDO DE CASO: POSTO 2.....	71
5.2.1. Avaliação do entorno.....	72
5.2.2. Contexto geológico	72
5.2.2.1. <i>Geologia regional</i>	72
5.2.2.2. <i>Geologia local</i>	73
5.2.3. Investigação Preliminar	74
5.2.4. Investigação detalhada / confirmatória.....	75
5.2.5. Análise de risco.....	76
5.2.6. Remediação.....	78
5.2.6.1. <i>Monitoramento</i>	79
5. CONCLUSÕES.....	81
Referência	84
ANEXOS	90

1. INTRODUÇÃO

Água é fonte da vida. Não importa quem somos o que fazemos ou onde vivemos, nós dependemos dela para viver. No entanto, por maior que seja a importância da água, as pessoas continuam poluindo os rios, suas nascentes e as águas subterrâneas esquecendo o quanto ela é essencial para nossas vidas.

Dados estatísticos divulgados no site da ANA (Agência Nacional das Águas), 70% do planeta são constituídos de água, sendo que somente 3% de água doce e, desse total, 98% é água subterrânea. Isto quer dizer que a maior parte da água disponível e própria para consumo é mínima perto da quantidade total de água existente na nossa Terra. Nas sociedades modernas, a busca do conforto implica necessariamente em um aumento considerável das necessidades diárias de água.

A água subterrânea existente na Terra tem origem no ciclo hidrológico, isto é, no sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficialmente ou subterraneamente ao oceano (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO-CETESB, 2004).

O movimento da água inicia-se quando esta, em forma de chuva, precipita da atmosfera para a superfície da terra. Parte desta água escorre superficialmente até os rios, lagos e oceano, parte infiltra direta ou indiretamente na superfície do solo devido à ação da gravidade e outra parte, por evapotranspiração, retorna à atmosfera.

O movimento descendente da água que infiltra continua preenchendo os vazios do subsolo (poros ou fraturas) e acumulando-se ao encontrar barreiras menos permeáveis, constituindo a zona saturada do solo. A água subterrânea acumulada na zona saturada não fica estagnada, pois o movimento pode continuar descendente contribuindo para a recarga

de aquíferos subjacentes. À medida que a água infiltra por entre as camadas de rocha, ela arrasta elementos químicos e altera sua composição.

Segundo a definição da Norma NBR 9896, água subterrânea é a água que ocupa a zona saturada do subsolo, ou seja, é toda a água situada abaixo da superfície do solo, na litosfera.

Observando os dados abaixo, percebemos que precisamos começar a utilizar a água de forma prudente e racional, evitando o desperdício e a poluição, pois:

- Um sexto da população mundial, mais de um bilhão de pessoas, não tem acesso à água potável;
- 40% dos habitantes do planeta (2.400 bilhões) não têm acesso a serviços de saneamento básico;
- Cerca de 6 mil crianças morrem diariamente devido a doenças ligadas à água insalubre e a um saneamento e higiene deficientes;
- Segundo o Relatório de Desenvolvimento Humano 2006 da ONU, até 2025, se os atuais padrões de consumo se mantiverem, duas em cada três pessoas no mundo vão sofrer escassez moderada ou grave de água.

A água é vital para a sobrevivência, saúde e dignidade do ser humano e uma fonte fundamental para o seu desenvolvimento. As reservas de água potável no mundo estão sob pressão constante, embora muitos seres humanos ainda não tenham acesso a um suprimento adequado de água para atender às necessidades básicas. O crescimento populacional, o aumento da atividade econômica e as demandas de qualidade de vida conduzem a um aumento da competição pelos recursos hídricos, e conflitos pela pouca disponibilidade de água potável.

As principais razões porque muitas pessoas afirmam que o mundo enfrenta uma iminente crise da água são:

- Poluição
- Má qualidade dos modelos de gestão de água
- Variação das mudanças climáticas
- O consumo da água cresceu mais rápido do que o crescimento da população
- Aumento da população, da atividade econômica e a competição crescente entre os usuários de água
- Exploração abusiva, gerando impacto ao meio ambiente

Contaminação é definida como a introdução no meio ambiente de organismos patogênicos, substâncias tóxicas ou outros elementos, em concentrações que possam afetar a saúde humana, podendo ser considerada um caso particular de poluição (CETESB, 2004).

A Lei Estadual 997/76, que dispõe sobre o controle da poluição ambiental no Estado de São Paulo, apresenta a seguinte definição para o termo poluição:

Considera-se poluição do meio ambiente a presença, o lançamento ou a liberação, nas águas, no ar ou no solo, de toda e qualquer forma de matéria ou energia, com intensidade, em quantidade, de concentração ou com características em desacordo com as que forem estabelecidas em decorrência dessa lei, ou que tornem ou possam tornar as águas, o ar ou solo:

- Impróprios, nocivos ou ofensivos à saúde;
- Inconvenientes ao bem-estar público;
- Danosos aos materiais, à fauna e à flora;

- Prejudiciais à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A poluição das águas subterrâneas por contaminações do subsolo por hidrocarbonetos derivados do Petróleo tem sido motivo de inúmeros estudos e grande desafio aos profissionais que atuam na geotécnica e recurso hídrico, em função da complexidade fenômenos geoquímicos e bioquímicos que ocorrem a partir da inserção dos contaminantes no subsolo.

Segundo levantamento da CETESB (2006), este tipo de vazamento corresponde a 73% (1.221 registros) de casos de áreas contaminadas no estado de São Paulo, essa contribuição é resultado do desenvolvimento do programa de licenciamento que se iniciou em 2001 com a publicação da Resolução CONAMA nº 273 de 2000 onde torna obrigatório o licenciamento ambiental para toda instalação e sistema de armazenamento de derivados de petróleo, configurando-os como empreendimentos potencialmente ou parcialmente poluidores e geradores de acidentes ambientais (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE -CONAMA, 2000).

Mancini (2002) cita que a preocupação em investigar, quantificar e propor ações de recuperação do passivo ambiental decorrente do derramamento de combustíveis é de vital importância, visto que grande parte dos municípios brasileiros utiliza poços profundos para abastecimento de água da população. Uma das dificuldades nas atividades voltadas para a proteção ambiental consiste na avaliação da extensão, dinâmica e concentração das contaminações provocadas por vazamentos em tanques de combustíveis de derivados de petróleo, oriundos das deficiências de infra-estrutura, manutenção e desgastes nas instalações, bem como falta de fiscalização de tanques e equipamentos. Essa complexidade deve-se ao fato destes contaminantes representarem uma ampla composição de produtos com características diferentes que, sendo orgânicos, reagem com a matéria orgânica existente no solo desencadeando ações biológicas, alterando o seu

comportamento ao longo do tempo, modificando também a sua forma de interação com o fluxo freático e com o solo de composição físico-química heterogênea (SAUCK, 2000).

A proposta deste trabalho foi a analisar a caracterização da ocorrência de passivos ambientais e os processos de remediação das águas subterrâneas no capítulo três, dando ênfase ao sistema adotado, o MPE- sistema de extração multifásica, para a extração da fase livre das áreas estudadas. No capítulo seguinte são apresentadas os materiais e métodos utilizados. No capítulo cinco estão os dois estudos de caso, são apresentados os resultados obtidos nas áreas impactadas. Finalizando o trabalho, o capítulo seis (conclusões) avalia a eficiência da extração da fase livre nos diferentes casos analisados.

2. OBJETIVO

O estudo caracterizou duas ocorrências de passivos ambientais e o processo de remediação da fase livre das águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos derivados do Petróleo. A partir dos resultados obtidos foi avaliada a eficiência do sistema de extração multifásica.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Investigar duas áreas contaminadas comparando os resultados obtidos com os parâmetros estabelecidos pela Cetesb;
- b) Comparar os resultados obtidos nas áreas estudadas, considerando a importância do tipo de solo no processo;
- c) Avaliar a eficiência do sistema de remediação, considerando a remediação de hidrocarbonetos em fase livre.

3. REVISÃO BIBLIGRÁFICA

3.1. IMPACTO AMBIENTAL

Impacto Ambiental é o efeito causado por qualquer alteração benéfica ou adversa causada pelas atividades humanas ou naturais no meio ambiente. As ações humanas sobre o meio ambiente podem ser positivas ou negativas, dependendo da intervenção desenvolvida. Em termos legais, impacto ambiental é entendido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população

O Estudo de Impacto Ambiental é um dos instrumentos de avaliação de impacto ambiental. No Brasil foi instituído dentro da política nacional do meio ambiente - PNMA, através da resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA N.º 001/86, de 23 de janeiro de 1986. Trata-se da execução, por equipe multidisciplinar, das tarefas técnicas e científicas destinadas a analisar, sistematicamente, por meio de métodos e técnicas de previsão impactos ambientais.

3.1.1. Impactos no solo e nas águas

O risco de contaminação das águas subterrânea pode ser definido como a probabilidade de um aquífero sofrer impactos negativos a partir de uma atividade antrópica até um nível que sua água subterrânea se torne inaceitável à saúde humana de acordo com os valores orientadores para a qualidade da água potável, (FOSTER et al., 2002).

Segundo Foster et al.(2002) a contaminação dos aquíferos ocorre quando a carga de contaminantes sobre o subsolo, gerada por descargas ou lixiviados provenientes de

atividades não é controlada adequadamente, e certos componentes excedem a capacidade natural de atenuação dos estratos subjacentes.

A avaliação da qualidade da água subterrânea utilizada nas dependências da unidade, para fins de consumo humano, foi baseada no padrão de potabilidade determinado pela Portaria nº 518, de 25 de março de 2004, do Ministério da Saúde. De acordo com esta legislação “toda água destinada ao consumo humano deve obedecer ao padrão de potabilidade e está sujeita à vigilância da qualidade da água”; e água potável é “aquela cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendem ao padrão de potabilidade e não oferece risco à saúde”.

3.1.2. Impactos devidos a hidrocarbonetos

No impacto ambiental gerado por hidrocarbonetos e derivados de petróleo, uma das preocupações é a contaminação de aquíferos que sejam usados como fonte de abastecimento de água para consumo humano. Por ser muito pouco solúvel em água a gasolina derramada, contendo mais de uma centena de componentes, inicialmente estará presente no subsolo como líquido de fase não aquosa. Em contato com a água subterrânea a gasolina se dissolverá parcialmente.

Após a contaminação do lençol freático, a pluma irá se deslocar e será atenuada por diluição, dispersão, adsorção, volatilização e biodegradação, que é o único destes mecanismos que transforma os contaminantes em compostos inócuos a saúde.

Dependendo das condições hidrogeológicas do local contaminado, a taxa da reação de biodegradação será mais rápida ou mais lenta. Uma vez que a biodegradação é o principal mecanismo de transformação dos hidrocarbonetos de petróleo, a determinação da taxa de transformação é de grande importância para se prever até onde a pluma irá se

deslocar. Quando a taxa de biodegradação for igual ou maior que a taxa de deslocamento dos contaminantes a pluma deixará de se deslocar e diminuirá de tamanho.

3.1.3. Quantificação do impacto ambiental devido a hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos são compostos constituídos apenas por hidrogênio e carbono (RUSSELL, 1994). Os termos hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) são usados para descrever uma grande família de várias centenas de compostos químicos originados do refino do petróleo cru (PATNAIK, 1996).

Os HTP são uma mescla de muitos compostos diferentes e todas as pessoas estão expostas a estes compostos de diferentes fontes, incluindo postos de gasolina, óleo derramado sobre os pavimentos e mesmo no ambiente de trabalho Agency for Toxic Substances and Disease Registry-ATSDR (1999).

Alguns compostos de HTP podem ser tóxicos aos seres vivos, a exemplo do benzeno, podem afetar o sistema nervoso, a medula óssea, provocar dores de cabeça, náusea, anemia e leucemia (ATSDR, 1997, 2004).

Os hidrocarbonetos monoaromáticos, BTEX, são os constituintes da gasolina que têm maior solubilidade em água e, portanto, são os contaminantes que primeiro irão atingir o lençol freático.

Os contaminantes BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) são considerados substâncias perigosas por serem depressores do sistema nervoso central e por causarem leucemia em exposições crônicas. Dentre os BTEX, o benzeno é considerado o mais tóxico, segundo as normas do Ministério da Saúde.

O risco carcinogênico apresenta o potencial para os efeitos carcinogênicos incrementais sobre a saúde humana, em função da exposição aos compostos químicos, considerando que não há limites para um dano genético, foi fixada como o limite de risco máximo aceitável ao qual uma população pode estar exposta. Na determinação do NABR (Níveis de Avaliação Baseada no Risco) foi considerado uma meta de risco de 1:100.000.

No Nível 1 são analisados todos os requisitos para a quantificação do impacto gerado no meio ambiente e verificados as concentrações máximas dos compostos BTEX, se apresenta valores acima do indicado na Tabela de Referência da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) 1997, para áreas consideradas comerciais.

Os hidrocarbonetos que constituem os combustíveis como óleo diesel e gasolina são compostos de baixa densidade e a maioria dos seus componentes consiste de uma fase não solúvel em água, ou pelo menos possuem uma dificuldade de solubilizar seus componentes no aquífero quando em seu estado original.

Normalmente, um vazamento de combustível em um tanque de abastecimento promove diferentes fases de contaminação, conforme relatam Mercer e Coheb (1990). Diante das evidências obtidas em vários trabalhos realizados no sul do Brasil e apoiados em relativo consenso no meio técnico (KIERCHHEIM et al., 1998), foi proposto a designação de cinco fases de contaminação que tipicamente se manifestam em vazamentos de tanques de combustível. Essa classificação de fases guarda semelhanças com a classificação proposta no trabalho de Sauck (2000) a respeito do comportamento eletroquímico dos solos contaminados por hidrocarbonetos. . A descrição das fases por Azambuja et al. (2000), National Research Council-NRC (1994), Environmental Protection Agency -EPA (1995a), Kneafsey e Hunt (2004), estão apresentadas na figura 3.1 e podem ser resumidas da seguinte forma:

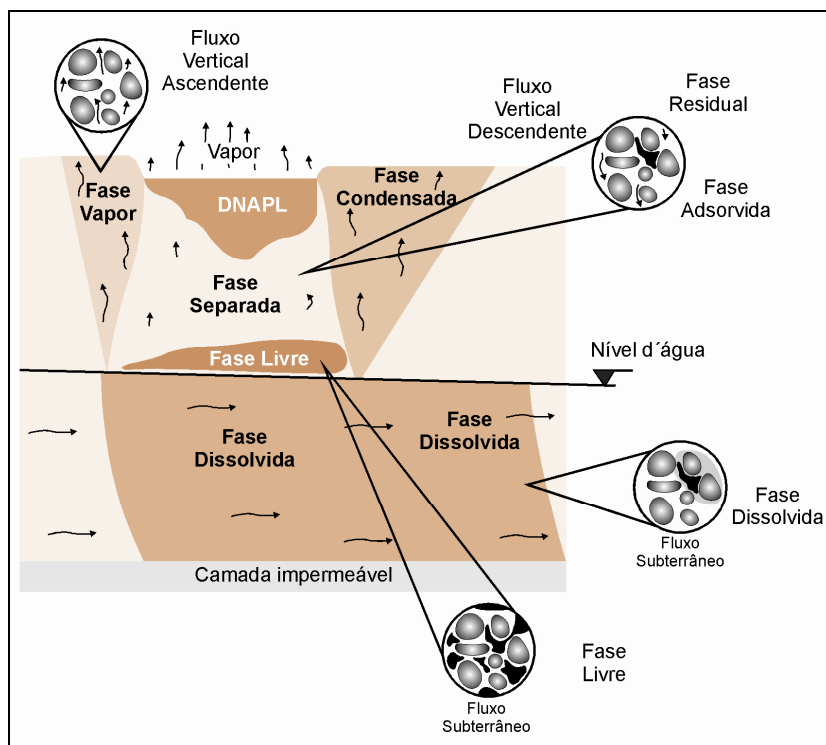


Figura 3.1 - Fases da contaminação do subsolo por hidrocarbonetos
Fonte: Adaptado de Borges et al. (2006)

a) Fase livre

Constitui em um véu sobre o topo do freático livre e que pode ser mais ou menos espesso, dependendo da quantidade de produto derramado e da dinâmica do sistema freático. A fase livre não é composta exclusivamente por hidrocarbonetos. Estudos experimentais referidos por Sauck (2000) demonstram que apenas 50% dos vazios do solo são ocupados por hidrocarbonetos, sendo que a outra metade é ocupada por água e ar.

Esse percentual de hidrocarbonetos presente nos vazios do solo não é constante, admitindo-se que ele seja menor nas bordas superior e inferior dessa camada. Por essa razão, não existe um limite estrito entre a fase livre e as demais fases, mas uma banda de transição que pode ser mais ou menos espessa, de acordo com a viscosidade do hidrocarboneto, magnitude e frequência das oscilações freáticas, quantidade de oxigênio disponível, porosidade do solo e ainda o tempo transcorrido desde o vazamento, entre

outros fatores intervenientes. Do ponto de vista geoeletrico, a fase livre não possui a mesma resistividade do produto original. Normalmente, ela se apresenta mais condutiva que o produto original, não só devido à ocorrência da bioconversão do hidrocarboneto, mas principalmente pela interposição de água e ar na fase. Entretanto, o seu contraste com o background, em especial em solos argilosos, costuma ser significativamente mais resistivo.

b) Fase adsorvida

Também denominada de fase residual, constitui no halo de dispersão entre a fonte e o nível freático e caracteriza-se por uma fina película de hidrocarbonetos envolvendo partículas de solo ou discontinuidades existentes no saprólito ou rocha, sendo mais importante para os produtos mais viscosos como o diesel.

Devido às variações freáticas inerentes, a fase adsorvida ocupa uma banda sobre o topo da fase livre. Essa banda pode ser mais ou menos significativa, dependendo da viscosidade do produto, da porosidade do solo e das oscilações do freático livre. Do ponto de vista geoeletrico, a fase adsorvida tende a aumentar a resistividade elétrica dos solos naturais. Porém, essa tendência é mais clara em solos argilosos e para contaminações recentes, porque a bioconversão dos hidrocarbonetos em ambiente oxico é rápida e pode implicar na formação de ácidos orgânicos e na lixívia de sais, diminuindo o contraste elétrico.

Convém destacar que, em solos naturalmente resistivos (como areias puras, por exemplo) os processos de bioconversão podem resultar em um contraste paradoxalmente condutivo. Outro aspecto relevante diz respeito à histerese que o arraste de hidrocarboneto possui entre os ciclos de saturação e drenagem. Os hidrocarbonetos mais viscosos possuem maior mobilidade no solo durante a drenagem do que durante a saturação, o que resulta em um abandono de hidrocarbonetos no solo durante as

oscilações do freático. Em decorrência, existe uma fase adsorvida abaixo do lençol freático, ou mesmo abaixo da fase livre.

O produto retido na fase adsorvida, embora de muito pouca mobilidade, funciona como uma fonte permanente de contaminação das águas subterrâneas pela lenta e contínua liberação de produto para as fases vapor e dissolvida (EPA, 1995, NRC, 1997, PENNER, 2000).

c) Fase dissolvida

Constitui em contaminações por dissolução de aditivos polares e por uma fração emulsionada de hidrocarbonetos que possui maior mobilidade e dissipa-se abaixo no nível freático livre, sendo mais importante para fluidos menos viscosos como a gasolina.

A quantidade de hidrocarbonetos dissolvidos depende das condições de degradação (ou bioconversão) do produto, estando muito mais relacionada à participação da fase adsorvida e muito menos ligada à espessura da fase livre propriamente dita. Aliás, fases livres menos espessas devem favorecer a dissolução de componentes, porque o ambiente ideal para a ocorrência do fenômeno deve ser oxigenado e com pH mais baixo. Do ponto de vista geológico, a fase dissolvida em si não altera significativamente a resistividade do solo.

Entretanto, o mesmo ambiente que favorece a dissolução de hidrocarbonetos, favorece também a lixívia de sais, o que se associa a uma maior condutividade elétrica na área onde existe maior incidência de pluma de contaminação abaixo do nível freático. Convém destacar que, como o ambiente anóxico inibe a dissolução de hidrocarbonetos, a fase dissolvida ocupa apenas a parte superior dos aquíferos e raramente ultrapassa cinco metros de espessura abaixo do freático.

d) Fase vaporizada

Constitui uma fase gasosa dos componentes voláteis dos combustíveis e que ocupa vazios do solo ou rocha, sendo mais importante para os hidrocarbonetos de menor ponto de vaporização, como aqueles que compõem a gasolina. A fase gasosa dos hidrocarbonetos está presente junto às demais fases, mas é mais significativa na região vadosa do subsolo. Do ponto de vista geológico é pouco participativa.

e) Fase condensada

Aparece mais tipicamente em áreas urbanas onde a pavimentação do solo é intensa e pouco permeável, caracterizando-se pela acumulação de produtos condensados sob os pavimentos. Na verdade é semelhante à fase adsorvida, porém com composição diferente do produto original em virtude do fracionamento seletivo da vaporização. É também uma fase com intensa bioconversão, manifestando-se degradada.

Na maioria dos casos de contaminação por combustíveis em postos de abastecimento, a preocupação do diagnóstico tem se pautado pela delimitação das fases adsorvida e livre, onde as ações de remediação podem ser mais efetivas. Entretanto, os marcos referenciais sugeridos pelas análises de risco indicam que a fase dissolvida possui repercussão ambiental tão ou mais relevantes que as demais fases.

3.2. LEGISLAÇÃO

A avaliação da qualidade das águas e solo subterrâneos é baseada na lista de valores orientadores, proposta pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2005). Nesta lista, que contempla 84 substâncias, são definidos:

- **Valor de Referência de Qualidade (VRQ):** é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que define um solo como limpo ou a qualidade natural da água subterrânea;
- **Valor de Prevenção (VP):** é a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo e da água subterrânea;
- **Valor de Intervenção (VI):** é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição genérico. Para o solo, foram estabelecidos 03 cenários de exposição, Agrícola-Área de Proteção Máxima - APM_{ax}, Residencial e Industrial.

As concentrações obtidas através das análises das amostras de água, proveniente dos poços de monitoramento, foram comparadas com os valores de intervenção desta lista, com o intuito de verificar se o local encontra-se impactado.

As concentrações obtidas através das análises das amostras de solo coletadas foram comparadas com os valores de intervenção, cenário industrial.

Para avaliação dos compostos não contemplados pela lista orientadora da CETESB, os mesmos foram comparados com os valores de intervenção da Lista Holandesa ou com os valores alvo para remediações preliminares (Preliminary Remediation Goals – PRG's) da listagem da Environmental Protection Agency (EPA), Região 9, região da Califórnia, considerada a mais rigorosa das regiões e é baseada no risco.

3.2.1. CETESB 2005 – Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea no Estado de São Paulo

Foi adotada como referência para análise da qualidade do solo e da água subterrânea a lista dos Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea no Estado de São Paulo publicada no Anexo Único da Decisão da Diretoria no 195-5005-E da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2005).

Para o estabelecimento dos valores de intervenção (VI) para a água subterrânea foram consideradas as concentrações que causam risco à saúde humana listadas na Portaria 518 do Ministério da Saúde de 24 de março de 2004, dos padrões de potabilidade do Guia da Organização Mundial da Saúde (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE-OMS, 2004) ou calculados segundo a metodologia da OMS.

Uma área é classificada como Área Contaminada sob Investigação quando houver constatação da presença de contaminante no solo ou na água subterrânea em concentração acima dos valores de Intervenção (VI) aplicáveis.

3.2.2. Padrão Holandês para o Solo e Água Subterrânea

Para as substâncias analisadas no solo ou na água subterrânea não contempladas pela lista de Valores Orientados da CETESB (2005), foram também adotados os valores do “Padrão Holandês” (MINISTÉRIO OLANDES DE OBRAS, PLANEJAMENTO E AMBIENTE - VROM, 2000). No Padrão Holandês, os limites de contaminação do solo e/ou água subterrânea estão baseados nos valores de exposição humana à contaminação,

sendo medidos de acordo com o Índice de Tolerância de Ingestão Diária (ITD). O Padrão Holandês apresenta os seguintes valores para cada substância listada: *national background concentrations* (apenas para metais) *target*, *intervention* ou *indicative of serious contamination*. Os valores *intervention* e *indicative of serious contamination* foram utilizados neste trabalho e representam o limite no qual, concentrações de substâncias encontradas no solo ou na água subterrânea representam risco para a saúde humana e para o ambiente.

3.2.3. U.S. Environmental Protection Agency (EPA)

Como forma de abranger ao máximo a avaliação das concentrações detectadas nos compostos não presentes na lista da CETESB (2005) ou no Padrão Holandês, foi utilizada a tabela com os limites de contaminação para solo e água subterrânea emitida em 2004 e reformulada e atualizada em 20 de maio de 2008 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) para a Região 9, que contempla a região sudoeste dos Estados Unidos (Arizona, Califórnia, Havaí, Nevada, ilhas do Pacífico e nações tribais).

As metas preliminares da remediação (PRG - Preliminary Remediation Goals) são referências utilizadas na avaliação e remediação de áreas de contaminadas. São concentrações de referência baseadas em risco e são auxiliares em varreduras e em avaliações ambientais preliminares. Os PRG da tabela da Região 9 são genéricos e são calculados sem informação específicas do local. Para este padrão também foram utilizados valores considerando o uso residencial.

As tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a seguir apresentam os principais parâmetros utilizados e os valores de intervenção citados a cima.

Tabela 3.1 – Parâmetros analíticos para BTEX no solo (mg/kg)

Parâmetros analisados	Lista Orientadora CETESB (2005)	Padrão Holandês (2000)	EPA Região 9 (2004)
Benzeno	0,08	1,0	1,4
Tolueno	30	130	520
Etilbenzeno	40	50	400
o-Xileno	-	-	-
m,p-Xileno	-	-	-
Xilenos (Total)	30	25	420

Tabela 3.2 – Parâmetros analíticos para PAH's no solo (mg/kg)

Parâmetros Analisados	Lista Orientadora CETESB (2005)	Padrão Holandês (2000)	EPA Região 9 (2004)
Benzo(a)pireno	1,5	-	0,21
Benzo(b)fluoranteno	-	-	2,10
Benzo(k)fluoranteno	-	-	2,10
Criseno	-	-	2,10
Acenaftileno	-	-	-
Fluoreno	-	-	26000
Antraceno	-	-	100000
Benzo(g,h,i)perileno	-	-	-
Fenantreno	40	-	-
Dibenzo(a,h)antraceno	0,60	-	0,21
Indeno(1,2,3-cd)pireno	25	-	2,1
Pireno	-	-	29000
Acenafteno	-	-	29000
Fluoranteno	-	-	22000
Naftaleno	60	-	190
Benzo(a)antraceno	20	-	2,10
PAH TOTAL	-	-	-

Tabela 3.3 – Parâmetros analíticos para TPH's no solo (mg/kg)

Parâmetros Analisados	Lista Orientadora CETESB (2005)	Padrão Holandês (2000)	EPA Região 9 (2004)
TPH TOTAL	-	1000	-

Tabela 3.4 – Parâmetros analíticos para BTEX na água ($\mu\text{g/L}$)

Parâmetros analisados	Lista Orientadora CETESB (2005)	Padrão Holandês (2000)	EPA Região 9 (2004)
Benzeno	5	-	420
Tolueno	700	1000	720
Etilbenzeno	300	150	1300
o-Xileno	-	-	-
m,p-Xileno	-	-	-
Xilenos (Total)	500	70	210

Tabela 3.5 – Parâmetros analíticos para PAH's na água ($\mu\text{g/L}$)

Parâmetros Analisados	Lista Orientadora CETESB (2005)	Padrão Holandês (2000)	EPA Região 9 (2004)
Benzo(a)pireno	0,7	-	-
Benzo(b)fluoranteno	-	-	0,092
Benzo(k)fluoranteno	-	0,05	-
Criseno	-	0,2	-
Acenaftileno	140	-	-
Fluoreno	-	-	240
Antraceno	-	5	-
Benzo(g,h,i)perileno	-	0,05	-
Fenantreno	140	-	-
Dibenzo(a,h)antraceno	0,18	-	-
Indeno(1,2,3-cd)pireno	1,75	-	-
Pireno	-	-	180
Acenafteno	-	-	370
Fluoranteno	-	1	-
Naftaleno	140	-	-
Benzo(a)antraceno	-	-	-
PAH TOTAL	-	-	-

Tabela 3.6 – Parâmetros analíticos para TPH's na água ($\mu\text{g/L}$)

Parâmetros Analisados	Lista Orientadora CETESB (2005)	Padrão Holandês (2000)	EPA Região 9 (2004)
TPH TOTAL	-	0,60	-

Para realizar o diagnóstico ambiental, a CETESB adotou uma metodologia, separando em etapas a investigação da área, dividindo em Investigação Preliminar, Investigação Detalhada e Análise de Risco. A finalidade da investigação para remediação

é, por conseguinte, oferecer subsídios para a concepção e detalhamento de um projeto de remediação, que seja tecnicamente adequado, legalmente cabível e economicamente viável, para cada situação de contaminação, visando prevenir danos presentes ou futuros ao meio ambiente, à saúde humana e segurança pública. As etapas estão descritas a seguir:

a. Investigação Preliminar

A Investigação Preliminar, também denominada pela CETESB de Investigação de Passivos ambientais é responsável por fazer um diagnóstico ambiental da área de influência do empreendimento, descrição e análise dos recursos ambientais e suas interações.

O Diagnóstico Ambiental tem como finalidade determinar a qualidade ambiental da área de influência da implantação do empreendimento. Abrangendo o meio biótico, abiótico e socioeconômico, e serve como referencial para as etapas posteriores de estudos ambientais.

Portanto, o procedimento para identificação de passivos ambientais é a caracterização da presença de hidrocarbonetos constituintes de combustíveis automotivos e de lubrificantes no subsolo, possibilitando concluir a respeito da existência ou não de contaminação na área objeto de avaliação.

b. Investigação Detalhada / Confirmatória

Após a investigação Preliminar, quando detectado algum impacto ambiental, é necessário um estudo mais aprofundado, para confirmação de passivos ambientais e delimitação da área afetada.

A investigação detalhada consiste na completa delimitação da pluma dissolvida, considerando para o fechamento da pluma os valores de intervenção da CETESB e os valores de NABR (Norma Brasileira Registrada) para ingestão de água subterrânea em ambiente residencial, fixado nas tabelas do ACBR (Ações Corretivas com Base no Risco), para os parâmetros que não possuem valores orientadores de intervenção, e indique que a mesma encontra-se delimitada, deve-se comparar a maior concentração observada na água subterrânea com os valores de NABR, fixados nas tabelas do ACBR, estabelecidos no cenário de exposição via inalação de ambientes fechados (*metodologia: níveis 1 e 2-avaliação de risco a saúde humana*).

c. Análise de Risco

Risco é a probabilidade de ocorrência de um efeito adverso a saúde de uma exposição a substâncias tóxicas. É a combinação de toxicidade, habilidade de uma substância de causar danos a um sistema biológico, com exposição.

A análise de risco é uma estimativa da exposição a uma determinada substância e a avaliação do efeito adverso a saúde humana em decorrência desta exposição. Com a identificação e quantificação dos riscos a saúde, decorrentes de uma área contaminada, uma vez que a saúde humana e a segurança da população devem ser priorizadas dentre os bens a proteger expostos, avaliar e recomendar ações para garantir a proteção principalmente da vida.

3.3. REMEDIAÇÃO

A remediação de solos e águas subterrâneas impactadas por derramamentos de petróleo é uma atividade que, geralmente, envolve altos custos e longos períodos de tempo. Na Europa, alguns países mantêm fundos para a recuperação de áreas impactadas, onde o custo de recuperação de uma área varia de 2 a 35 Euros per capita (European

Environment Agency -EEA, 2003). Conforme apresentado no Seminário sobre Remediação *in situ* realizados pelo Instituto Ekos Brasil em 2004, o custo de remediação de uma área contaminada em uma região central de uma cidade custa em média 20% do valor do terreno recuperado.

Devido aos altos custos envolvidos no processo de recuperação de uma área impactada, a tomada de decisão sobre as metas de remediação e tecnologia a ser adotada devem ser feitas após campanhas de monitoramento, avaliação de risco e modelagem matemática de fluxo e transporte de compostos aromáticos para avaliar a evolução do processo de remediação e revisão dos valores alvo.

Durante os últimos anos, misturas complexas de contaminantes tem sido acumuladas no ambiente, incluindo metais e compostos químicos sintéticos e derivados de petróleo. Técnicas convencionais como a escavação dos solos contaminados, seguida de tratamento ou disposição em aterros, têm sido utilizadas para efetuar a remediação de locais contaminados, apesar de apresentarem, muitas vezes, elevados custos, bem como possibilitarem impactos adicionais ao ambiente. Por outro lado essas técnicas são efetivamente eficientes, requerem prazos curtos de operação e propiciam uma liberação mais rápida da área. Além das técnicas de remoção e redistribuição de solos, outras técnicas têm sido aprimoradas, testadas e avaliadas em relação a sua eficiência/eficácia e custo, incluindo a contenção, biorremediação, desorção térmica, oxidação química, extração de vapores, bombeamento e tratamento de águas subterrâneas (CETESB, 2001).

Atualmente, dados os altos custos envolvidos na remediação de áreas contaminadas, a atenuação natural com monitoramento tem sido adotada como uma possibilidade de intervenção, em locais contaminados por substâncias orgânicas biodegradáveis, nas condições naturais do meio. Esta alternativa é baseada na capacidade de atenuação natural de contaminantes, no solo e nas águas subterrâneas, a qual, em geral, ocorre durante um longo período de tempo, durante o qual não devem ocorrer riscos para

a saúde pública, para o ambiente e para os demais bens a proteger. Sua adoção deve ser precedida de um estudo criterioso, que inclua uma previsão da evolução das plumas de contaminação, uma metodologia de avaliação de risco e o monitoramento durante todo o período necessário para que se atinjam as metas de remediação desejáveis. Ressalta-se que, nos casos de adoção da técnica da atenuação natural, os custos envolvidos na fase de estudos costumam ser bastante elevados, face à grande quantidade de informações necessárias para subsidiar a tomada de decisão.

Outra possibilidade de intervenção seria a alteração do uso e ocupação do solo. Esta alternativa de intervenção é análoga à atenuação natural com monitoramento, envolvendo os mesmos princípios, com a diferença de que, para garantir a ausência de riscos à saúde pública, ao ambiente e aos demais bens a proteger se faz necessária uma redefinição ou restrição do uso do solo na área afetada. Esta restrição deve permanecer válida por prazo indeterminado, durante o qual um programa de monitoramento constante deve ser mantido.

As várias técnicas de remediação praticadas atualmente podem ser distinguidas em três “status” de aplicação, ditos tecnologias consagradas, tecnologias inovadoras ou emergentes e tecnologias experimentais. A figura 3.2 ilustra a pirâmide das técnicas de remediação.

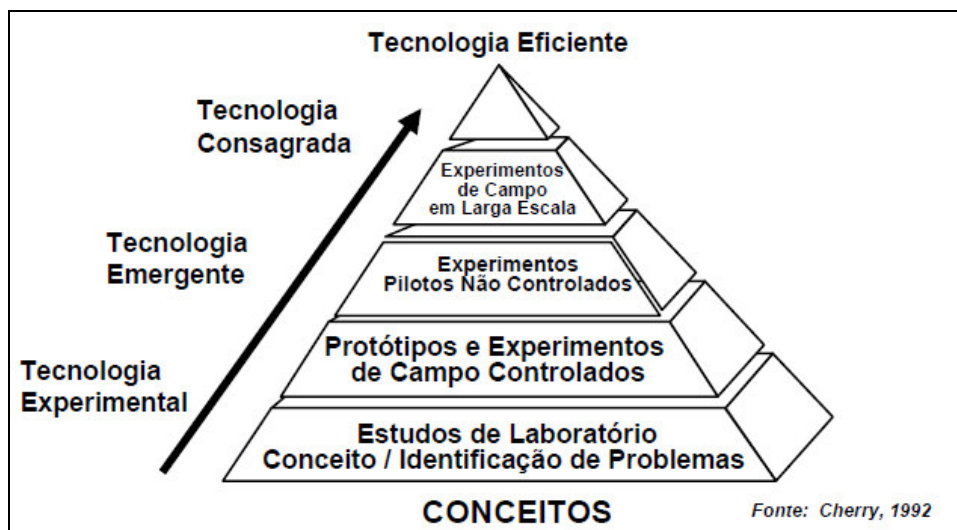


Figura 3.2 – “status” de aplicação das técnicas de remediação.

Técnicas consagradas são aquelas sobre as quais já se possui suficiente conhecimento técnico para prever resultados ou, em função disto, que não requerem mais testes de laboratório ou testes piloto, podendo ser aplicadas diretamente no campo, em larga escala (CETESB, 2001).

Tecnologias emergentes ou inovadoras são tecnologias em desenvolvimento, como opções alternativas de tratamento de locais contaminados àquelas tradicionalmente empregadas. O princípio empregado no desenvolvimento dessas técnicas é o de diminuir a periculosidade ou nível de toxicidade dos contaminantes presentes numa determinada área, por meio da degradação biológica ou da modificação química, utilizando-se reações que neutralizem ou decomponham esses compostos; ou ainda, por meio da retirada de determinadas frações dessa contaminação, tais como fases gasosas ou outras. Dentre os objetivos destas alternativas, além da redução ou eliminação da periculosidade, inclui-se a redução de custos, porém, nem sempre seguido da redução de tempo. Embora essas técnicas já possam ser empregadas como alternativas plenas de remediação, normalmente são utilizadas em parceria com outras técnicas ou métodos já consagrados, a fim de aumentar a sua eficiência (CETESB, 2001).

As tecnologias experimentais ainda estão em fase de teste, tem os mesmos objetivos que as tecnologias emergenciais. Essas técnicas ainda não são empregadas. Requerem, portanto, antes de sua aplicação, uma série de testes e experimentações que comprovem sua viabilidade técnica para os contaminantes e local pretendidos. Estão feitos testes de laboratório, que comprovem a exequibilidade das reações esperadas. O passo seguinte é realizar um novo teste em pequena escala, para simular a reação que de fato ocorrerá em campo, considerando todos os intervenientes, como uma primeira avaliação de sua eficiência e uma primeira antecipação dos futuros custos envolvidos.

Após esse passo, são realizados novos testes, os chamados testes-piloto, em campo, porém ainda com uma abrangência limitada, para comprovar a viabilidade observada em laboratório, de uma forma mais próxima da situação real.

Existem alguns métodos de remediação que têm sido mais empregados com sucesso ao longo dos anos, seja “in situ”, “on site” ou “ex situ” e que são aceitos em todo o mundo pelas agências reguladoras e cortes de justiça. Inclui-se a remoção e redistribuição de solos, a injeção de ar na zona saturada (air sparging), o bombeamento e tratamento de águas subterrâneas, a extração de vapores, a biorremediação, as barreiras reativas e a atenuação natural monitorada.

Atenuação natural monitorada trata-se de uma estratégia de gerenciamento que se baseia em mecanismos naturais de atenuação (diluição, dispersão, volatilização, sorção e biodegradação) para remediar contaminantes presentes no aquífero (EPA, 1999).

São considerados como sistemas de extração de vapores do solo (SVE), os sistemas que envolvam a remoção induzida de compostos orgânicos voláteis (VOC) situados na zona vadosa do solo através da pressão negativa promovida em subsuperfície por bombas a vácuo (EPA, 1996d, NCR, 1997).

O sistema SVE foi utilizado inicialmente na década de 70 não como tecnologia de tratamento de solo, mas como técnica para impedir que compostos voláteis do solo migrassem até o interior dos edifícios, sendo que os modelos da primeira geração derivam dos métodos empregados em aterros sanitários e consistiam basicamente de uma coleção de tubos locados ao longo das fundações dos edifícios que através de vácuo coletavam vapores orgânicos (NRC, 1997).

Air stripping é o processo que força a passagem do ar através da água contaminada bombeada do aquífero removendo desta forma os compostos (EPA, 2001a). O sistema consiste em uma torre contendo várias placas perfuradas paralelas no sentido vertical (ABDANUR,2005).

A água contaminada é introduzida na parte superior da torre enquanto o ar é bombeado sob pressão na parte inferior. O ar ascendente faz com que os compostos químicos dissolvidos na água passem para o estado de vapor e o gás é então coletado e posteriormente tratado (EPA, 2001a). O Air stripping é usado geralmente associado com o sistema de Bombeamento e Tratamento - Pump and Treat (ABDANUR,2005).

O bombeamento é um dos sistemas de tratamento de aquíferos mais utilizados atualmente e consiste no bombeamento da água subsuperficial contaminada com NAPL à superfície para posterior tratamento externo de remoção de contaminantes (EPA, 1996a).

Este sistema vem sendo adotado desde a década de 80 nos EUA, e consiste em instalar poços de bombeamento de maneira estratégica e buscando sempre a interceptação da pluma de NAPL de modo a conter a migração e reduzir as concentrações do contaminante através da água subterrânea (NRC, 1994, EPA, 1996^a, EPA, 1997).

Em um estudo realizado por Miller (2001) sobre o bombeamento de fase livre, originada por vazamento de gasolina de um tanque subterrâneo na Região Metropolitana de São Paulo, foi relatado que dos 0,85 m³ do combustível dispostos no solo, foram

bombeados 0,211 m³ em um período de seis meses de operação, o que corresponde à 25% do volume total.

No referido estudo, o autor concluiu que o sistema foi eficiente na remoção da fase livre visto que foi observada a eliminação da camada de LNAPL no topo do aquífero.

Uma das técnicas de bombeamento e tratamento do solo é denominada de MPE - Extração Multi-fásica. A extração multi-fásica é um método desenvolvido para extração de fase livre de óleo na fase inicial do processo de remediação, e posteriormente, de fase dissolvida de óleo na água e de fase vapor presente no solo. O método é empregado em áreas impactadas por derrames ou vazamentos de produtos químicos líquidos, com menor densidade do que a água subterrânea (LNAPL – light non aqueous phase liquid) e no caso específico referiu-se a hidrocarbonetos de petróleo. A figura 3.3 mostra uma seção esquemática do sistema MPE.

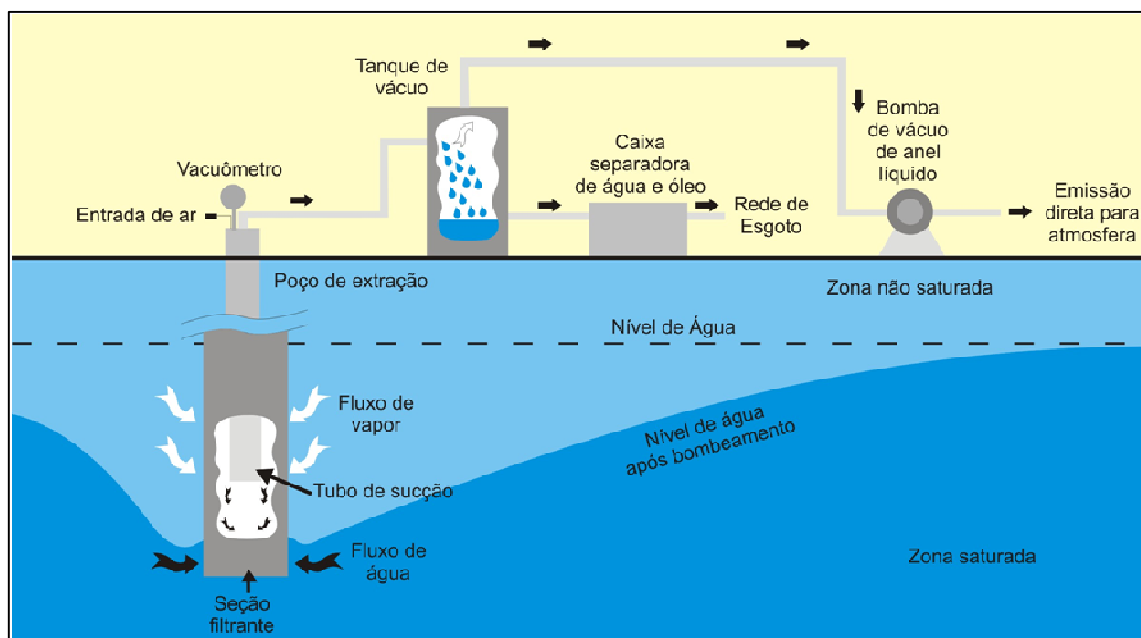


Figura 3.3 – Seção esquemática de um sistema MPE.

Fonte: Adaptado de EPA (1998)

O processo de remediação por meio do sistema MPE, é iniciado através de aplicação de vácuo em poços de extração, localizados na região de ocorrência da pluma de substâncias químicas para indução de um fluxo multi-fásico em subsuperfície.

A extração da fase líquida sobrenadante e compostos dissolvidos na água subterrânea é dada através do controle ou reversão da migração da pluma de fase livre. A extração da parte líquida causa o rebaixamento do nível d'água local e conseqüentemente aumenta a espessura da camada não saturada e com alguma fase de óleo que poderá ser extraída através da extração de vapores também associada a este sistema.

O vácuo aplicado induz a migração da massa de vapores ao longo dos poços de extração. O vapor extraído é proveniente do processo de volatilização de compostos voláteis e semi-voláteis que podem estar presentes na zona não saturada. Adicionalmente, o processo de extração de vapores incrementa a disponibilidade de oxigênio na zona não saturada o que pode resultar numa estimulação natural da biodegradação da fase residual dos compostos presentes na matriz do solo. Destaca-se que neste projeto, o monitoramento é feito para o processo físico.

No sistema MPE, o fluxo multi-fásico é estabelecido controlando-se o vácuo empregado nos poços de extração do sistema, no qual se cria um gradiente de pressão dirigido para estes pontos. Dessa forma, atribui-se uma taxa de extração suficiente para a retirada de líquidos e vapores em cada ponto de extração, visando criar uma zona de influência em toda pluma de compostos do tipo LNAPL.

Para garantir a efetividade do sistema e diminuir o impacto do bombeamento no aquífero o vácuo ou pressão negativa é controlado por:

- Seleção preliminar da distribuição dos poços de bombeamento (PB), considerando características geológicas e hidrogeológicas e permeabilidade da área;
- Seleção da posição vertical do tubo de extração;
- Ajuste das válvulas de controle de fluxo no sistema.

4. MATERIAIS E METODOS

O processo de ACBR- Ações Corretivas com Base no Risco foi elaborado utilizando uma abordagem em níveis, envolvendo etapas de detalhamento progressivo para coleta e interpretação de dados, a figura 4.1 apresenta um fluxograma esquemático mostrando esta abordagem, onde inicialmente é avaliado se existe probabilidade de contaminação na área, se não existe é recomendado apenas o monitoramento na área, se existente é feita uma investigação confirmatória também denominada investigação detalhada da área. Se a contaminação é confirmada, se faz a análise de risco. Sempre quando necessário ações emergenciais devem ser tomadas. Seguindo os níveis de abordagem, depois de concluídas as investigações e caracterizado o impacto ambiental são adotadas as medidas corretivas, juntamente com o monitoramento para acompanhamento das ações. Após a recuperação do local, devem-se repetir as investigações para garantir que não há mais riscos a saúde humana nem impacto ao meio e monitorar periodicamente a área.

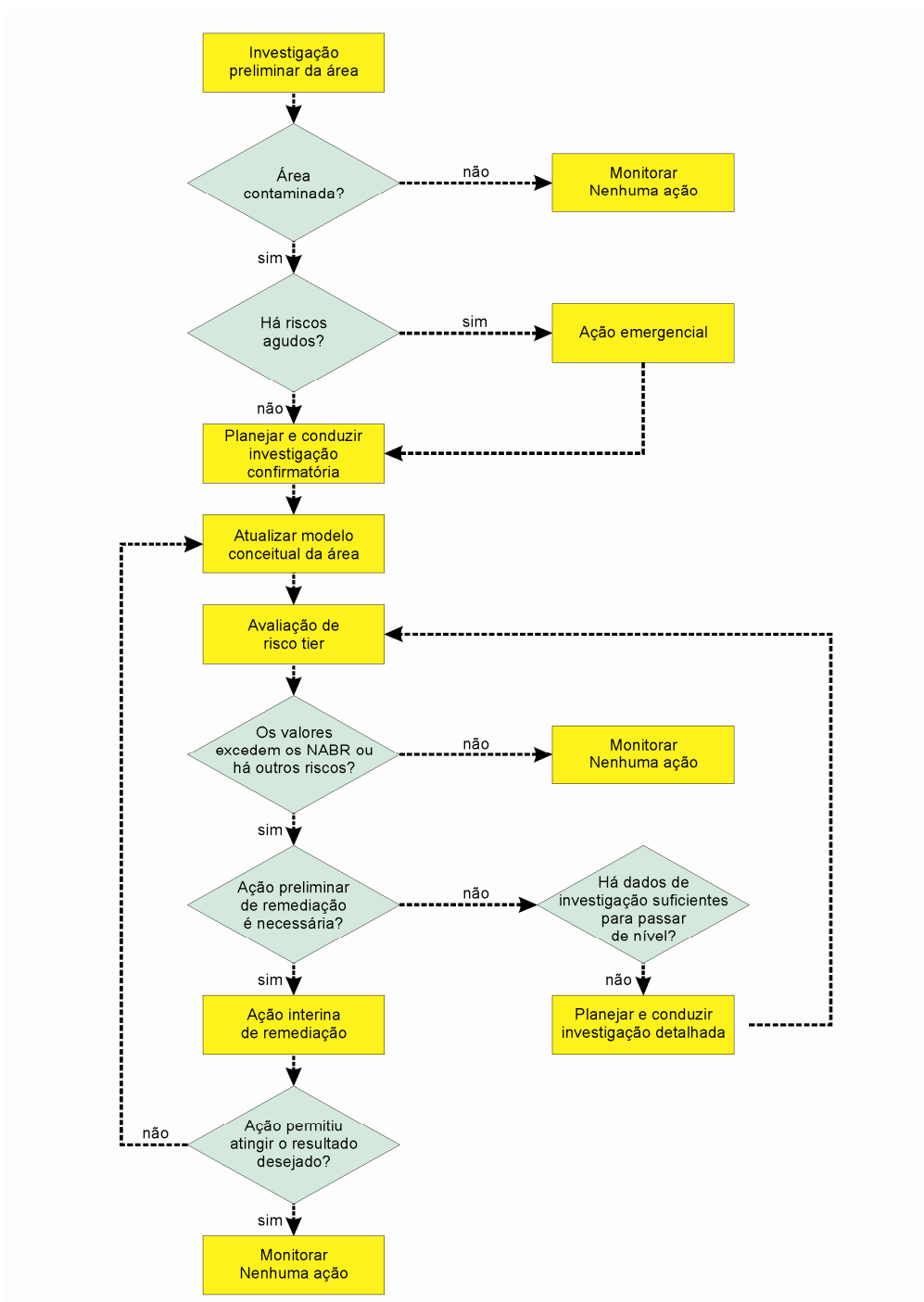


Figura 4.1 – Fluxograma de abordagem em nível
Fonte: Adaptado de CETESB (2001)

a) Investigação Preliminar

A metodologia da CETESB para a investigação preliminar consiste no desenvolvimento de seis tarefas, a serem executadas conforme a seguinte seqüência:

- Comunicação a CETESB;
- Coleta de dados básicos da área;
- Reconhecimento da área para um trabalho seguro;
- Locação dos pontos de sondagem e determinação do número de amostras a serem coletadas;
- Coleta de amostras e realização de análises químicas;
- Emissão do relatório.

b) Investigação detalhada / confirmatória

As atividades efetuadas nesta campanha de investigação complementar estipuladas pela CETESB contemplaram:

- Comunicação a CETESB;
- Coleta de dados históricos da área (Investigação Preliminar);
- Inspeção visual dos poços de monitoramento pré-existentes;
- Mapeamento de vapores orgânicos;
- Sondagens para amostragem solo;
- Instalação de poços de monitoramento;
- Amostragem de água subterrânea dos poços de monitoramento, pelo método de baixa vazão;
- Amostragem de água do poço tubular profundo;
- Análises químicas;

- Levantamento topográfico;
- Cadastramento de poços de captação de água subterrânea, junto ao DAEE;
- Checagem do levantamento geofísico.

c) Análise de risco

A metodologia do ACBR foi elaborada utilizando uma abordagem em níveis, envolvendo etapas de detalhamento progressivo para coleta e interpretação de dados iniciada pela confirmação da presença de contaminantes no local e a partir deste ponto foram realizadas investigações objetivando o reconhecimento do histórico da área e a identificação das possíveis fontes de contaminação.

No ACBR a quantificação do risco à saúde humana é realizada por meio da integração das características dos contaminantes (mobilidade, solubilidade, volatilização, etc.), do meio impactado (porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, etc.), dos meios de transporte (água subterrânea, solo superficial, solo subsuperficial e ar), das vias de ingresso (ingestão, inalação e cutânea) e das populações receptoras potenciais (massa corpórea média, expectativa de vida, etc.) Nessa integração o ACBR utiliza modelos de avaliação de risco, de avaliação de exposição e de transporte de massa.

O ACBR está dividido em três níveis de análise, Nível 1 (Tier 1), Nível 2 (Tier 2) e Nível 3 (Tier 3), que se torna progressivamente mais específico e complexo a medida que estudo sobre a área e os contaminantes se torna necessário.

A necessidade de avançar os níveis depende da avaliação dos estudos realizados e das recomendações sugeridas em relação às metas de remediação, às alternativas de ações corretivas, sua viabilidade e custo-benefício.

No primeiro nível de avaliação, Nível 1, os valores de concentração dos compostos químicos de interesse BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), observados nos

poços de monitoramento são comparados com valores aceitáveis de concentração, chamados NABR (Níveis de Avaliação Baseados no Risco) e tem como objetivo de auxiliar informações necessárias para a tomada de decisão de não implementar ações futuras nos casos mais simples, onde não existam condições adversas à saúde humana e ao meio ambiente que justifiquem o aprofundamento dos estudos ou a implementação de ações corretivas.

Neste nível, são definidos cenários de exposição para todos os receptores identificados dentro e fora da área onde ocorreu a contaminação. A avaliação é feita para todos os receptores identificados, considerando-se que todos estão localizados sobre a fonte de contaminação, o que caracteriza um cenário bastante conservador. Neste caso o risco é analisado comparando as maiores concentrações dos BTEX observadas na área com os níveis aceitáveis (NABR).

d) Remediação por Extração Multifásica (MPE)

O sistema de Remediação por Extração Multifásica (MPE) é uma metodologia desenvolvida para extração de fase vapor e fase livre de áreas impactadas por derrames ou vazamentos de produtos químicos e/ou produtos derivados de petróleo. O processo de remediação por meio do sistema MPE é iniciado pela aplicação de vácuo em poços de extração localizados na região de ocorrência da contaminação para indução de um fluxo multifásico em subsuperfície.

O vácuo aplicado induz a migração das concentrações de vapor ao longo dos poços de extração. O vapor extraído é proveniente do processo de volatilização de compostos voláteis e semi-voláteis que podem estar presentes na zona não saturada. Adicionalmente, o processo de extração de vapores incrementa a disponibilidade de oxigênio na zona não saturada o que resulta na estimulação natural da biodegradação da fase residual de hidrocarbonetos derivados de petróleo.

O fluxo da parte líquida a partir da subsuperfície resulta na extração da fase livre de hidrocarbonetos e compostos dissolvidos na água subterrânea e pode auxiliar no controle ou reversão da migração de pluma de fase livre. A extração da parte líquida causa o rebaixamento do nível d'água local e o aumento da região contaminada da zona não saturada, incrementando a extração de vapores.

Tendo em vista que o líquido é transportado pneumaticamente, torna-se desnecessário qualquer tipo de mecanismo de bombeamento, sendo que, o processo de manutenção e operação dos equipamentos torna-se simplificado quando comparado com as outras técnicas de remoção de compostos em fase livre em subsuperfície. A maior vantagem do sistema MPE está associada as taxas de extração de líquidos que podem ser muito maiores do que o sistema de bombeamento convencional.

4.1. BOMBEAMENTO E TRATAMENTO NO SISTEMA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE)

Esta técnica é usada para tratar águas contaminadas com material orgânico e inorgânico. O sistema consiste em abrir poços para extração da água subterrânea e remover contaminantes presente na água por tratamento destas em unidades de tratamento em superfície. O tratamento da água deve ser feito mediante padrões de operação de tratamento. A água tratada deve ser disposta em poços de reinjeção.

Um ou mais poços são instalados em uma pluma de contaminação. Poços podem ser instalados em diferentes ângulos para maximizar a captura da água. Geralmente os poços são instalados no centro da pluma de contaminação para a remoção de maior quantidade de massa contaminante e nos limites da pluma para evitar maior deslocamento destes.

Esta tecnologia é relativamente comprovada com muitos anos de experiência em operações e avaliações pós-operações do processo. O custo desta técnica é dependente da profundidade, extensão, largura da pluma contaminante.

Vantagens: Possui flexibilidade em atender vários tipos de objetivos a serem alcançados, além de poder ser implantada rapidamente e em conjunto com outras técnicas de remediação. Esta tecnologia normalmente não é aplicada em solos argilosos, e têm pouca chance com contaminantes que sofrem adsorção do solo ou aqueles com pouca solubilidade.

4.2. POÇOS DE BOMBEAMENTO NO SISTEMA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE)

A implantação de poços de bombeamento é muito utilizado para conter a contaminação da água subterrânea. Ao contrário das trincheiras é um método eficaz para conter contaminantes na fase dissolvida e mais densa do que a água, como também na fase livre, através do bombeamento cria-se um cone de depressão ao redor do poço, impedindo a migração da pluma de contaminante em uma área restrita facilitando a recuperação.

Os dois fatores mais importantes que devem ser considerados na implantação deste método são a localização do poço e a taxa de bombeamento. Para tanto, o conhecimento hidrogeológico da área e a extensão da pluma contaminante são requisitos básicos necessários.

Cada poço de bombeamento possui uma zona de contribuição refletida pelo cone de depressão, que é diretamente proporcional a taxa de bombeamento.

Para prevenir a migração do contaminante, a distribuição dos poços e a taxa de bombeamento devem obedecer a especificações de tal modo que a pluma contaminante fique totalmente inserida dentro da zona de contribuição dos poços. Caso a pluma seja muito extensa ou as condições hidrogeológica impeçam uma taxa de bombeamento adequada, associada a abrangência do cone de depressão, outros poços podem ser locados para conter totalmente a pluma.

A figura abaixo mostra a influencia hidráulica do bombeamento num poço de bombeamento.

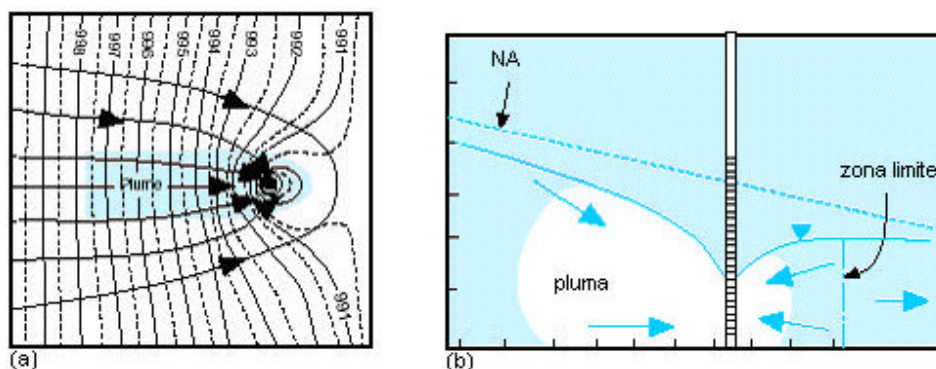


Figura 4.2 – Modelo de concentração hidráulica por poço de bombeamento
Fonte: Adaptado de EPA (1996a)

4.3. MEMORIAL DESCRITIVO

Para a remoção de fase livre é utilizado um conjunto de equipamentos que permite uma grande versatilidade para atender as situações específicas de cada projeto. O conjunto para a retirada da fase livre é composto por uma bomba pneumática, compressor de ar, controle de vazão pneumática, reservatório de óleo e três caixas sendo uma caixa decantadora, caixa separadora de água e óleo (SAO) e caixa receptora. O ANEXO II é apresenta o memorial de fotos do sistema.

A figura 4.3 apresenta o desenho esquemático do sistema utilizado.

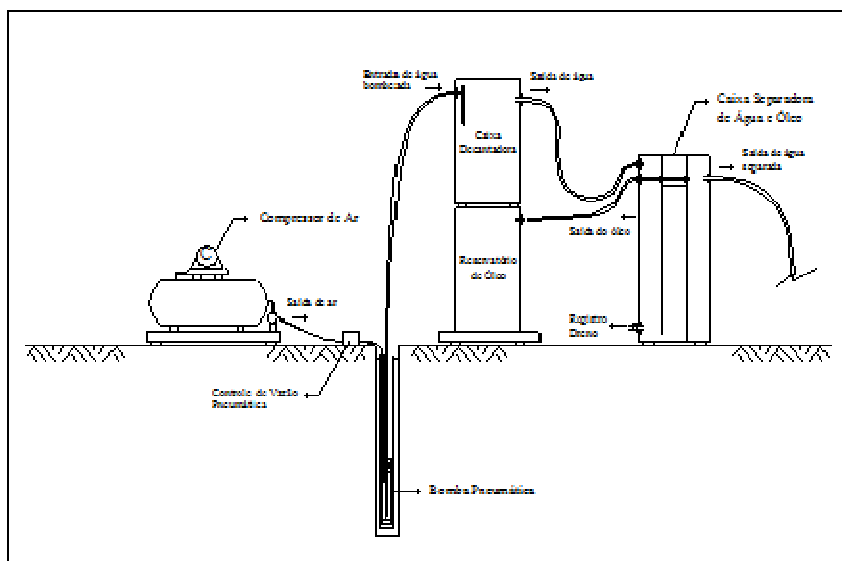


Figura 4.3 – Esquema do Sistema MPE utilizado.

4.3.1. Bomba Pneumática

O sistema para a remoção da fase livre constitui de uma bomba totalmente pneumática, ideal para casos de bombeamento de produtos explosivos, acionada por um compressor de ar e controlada por um temporizador.

A bomba pneumática será acionada por um compressor de ar que terá a saída de ar regulada conforme as necessidades da bomba para o local e será ativada por um temporizador que será configurado para acionar novamente quando o poço estiver totalmente recuperado e a bomba estiver completamente cheia, criando um ciclo até retirar totalmente a fase livre da água subterrânea.

A bomba foi desenvolvida e construída pela Construfer Engenharia em aço inox, resistente a oxidações e não reage com os compostos químicos dos combustíveis.

4.3.2. Compressor de Ar

O compressor de ar é um equipamento destinado a produzir ar e está acoplado em um tanque cilíndrico de armazenamento de ar, na saída do cilindro tem uma válvula com manômetro que indica a pressão de ar de saída, podendo regula a pressão se ajustando com as necessidades do local. As conexões são feitas com mangueira de ar comprimido de 3/8", resistentes a grandes pressões, e presas por abraçadeiras metálicas e unho de latão de 3/8".

Para um melhor funcionamento do compressor o local deve ser limpo para que o ar tenha o mínimo de contaminação e o filtro trabalhe com eficiência, seco a fim de que a umidade a ser condensada seja a mínima possível e bem ventilado para que o compressor e o ar aquecido durante a compressão possam ser normalmente resfriados. O compressor deve ser instalado nivelado, fixado ao piso e em local de fácil acesso para a necessária manutenção.

4.3.3. Controle de Vazão Pneumática

O controle de vazão pneumática foi desenvolvido utilizando um temporizador que aciona uma válvula solenóide liberando o ar comprimido para a bomba.

O temporizador é regulável, tendo um tempo de liga e outro desliga e se ajusta para cada caso dependendo da situação do local. O tempo de liga da bomba será definido conforme o tempo de esvaziamento da bomba que depende da altura a ser bombeada e o tempo e desliga será definido pelo tempo de recuperação do poço.

O estudo da percolação d'água para dentro de um poço, quando nele a água é bombeada para fora, dá-se no espaço; entretanto pode ser feito como um problema plano, considera-se um plano meridiano passando pelo eixo do poço, como na figura abaixo, onde se indica um poço de raio rp perfurado, através de um terreno de permeabilidade k . Nesse terreno o nível de água freático esta a uma altura H_0 acima do nível impermeável.

Com o bombeamento, o nível d'água do poço abaixa-se para H_p e estabelece-se um fluxo d'água radial e conseqüentemente ocorre um rebaixamento do nível freático. A uma distância r do eixo do poço, há uma deflexão s do nível freático natural, passando o nível d'água para uma altura H . O estudo de tais problemas está baseado na chamada hipótese de Dupuit, porquanto em problemas deste tipo ela não foge muito à validade.

Tal hipótese diz que o gradiente hidráulico medido na linha freática a uma distância r do eixo do poço é constante em toda sua vertical referente a distância r considerada.

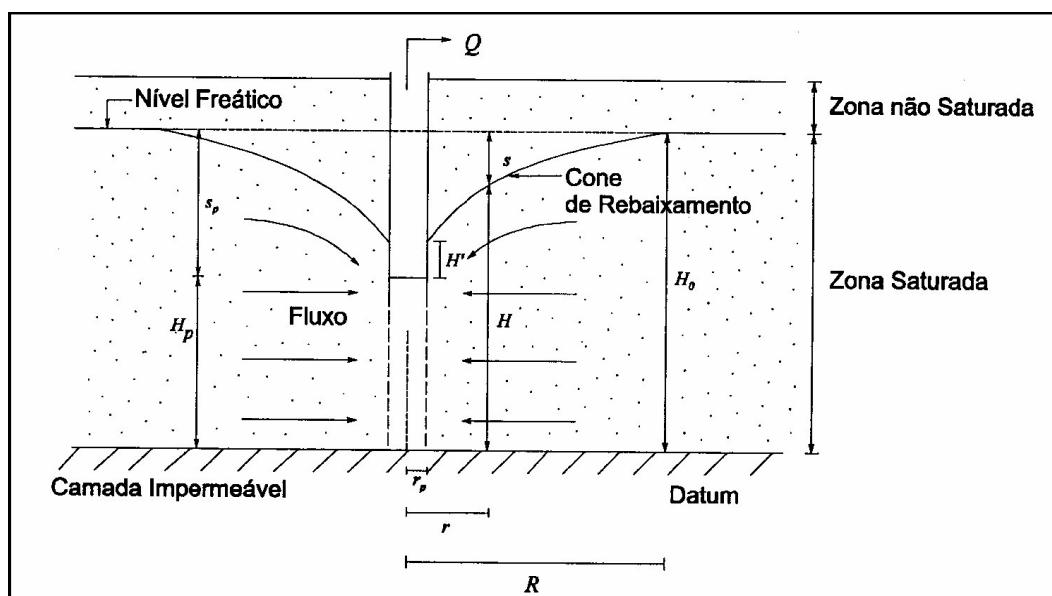


Figura 4.4 – Parâmetros hidráulicos de um poço em bombeamento (aquífero livre)
Fonte: Feitosa e Manoel Filho (1997).

Q → Vazão de bombeamento (L^3/T);

H_0 → Profundidade da bomba (Nível potenciométrico inicial, antes do bombeamento (L));

H → Nível potenciométrico num ponto qualquer a uma distância r do poço de bombeamento (L);

H_p → Nível potenciométrico no poço bombeado (L) (altura da bomba);

s_p → Rebaixamento no poço bombeado (L);

s → Rebaixamento num ponto qualquer a uma distância r do poço bombeado (L);

H' → Superfície de resurgência;

R → Raio de ação ou de influência; limite do cone de depressão (L);

r_p → Raio do poço (L);

Em um ponto a uma distância r da bomba o gradiente hidráulico será $\frac{\partial h}{\partial r}$, sendo h a coordenada vertical e r a coordenada horizontal. Então a quantidade de água bombeada no poço, sendo essa necessariamente igual a que atravessa a superfície cilíndrica delimitada pelo poço, será:

$$Q = k \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

Uma dupla integração:

$$\int_{h_0}^h h \cdot \partial h = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot \int_{r_0}^r \frac{\partial h}{\partial r}$$

dará a fórmula dos poços:

$$h^2 - h_p^2 = \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_p}\right)$$

onde:

h_p → altura da bomba (0,7 m);

Q → vazão do poço;

r_p → raio do poço (2 pol.);

r → raio de influência;

h → altura do poço;

k → coeficiente de permeabilidade do solo ($4 \times 10^{-4} m/s$ - valor adotado)

A vazão do poço (Q), ou seja, a quantidade de água bombeada no poço é calculada a partir da capacidade da bomba.

A bomba foi projetada especificamente para a remoção da fase livre de modo que fique dentro do poço bombeando a água contaminada e por fim fazer a separação da água e o óleo.

A capacidade da bomba está relacionada com o volume da bomba e o seu rendimento.

O volume da bomba (V_B) apresenta o volume útil da bomba ou o volume de água que será bombeado.

$$V_B = \frac{\pi \cdot \phi_B^2 \cdot h}{4} \text{ , onde:}$$

V_B → Volume da Bomba

ϕ_B → Diâmetro da Bomba. (4 pol.)

h → Altura Útil da Bomba. (70 cm)

$$V_B = 5,67 \times 10^{-3} m^3 \text{ ou } V_B = 5,67 L$$

O rendimento da bomba (η) relaciona o volume da bomba (V_B) com o volume bombeado por golpe e foi fornecido pelo fabricante da bomba um rendimento igual à 80%. Portanto o Volume bombeado por golpe (V_G) é igual:

$$V_G = 4,54 L / golpe$$

A vazão é calculada de acordo com o tempo de duração de cada golpe. Para um tempo de duração igual a 2s, teremos:

$$Q = 4,54 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / 2s$$

$$Q = 2,27 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / s$$

A partir desses dados, foi possível montar um gráfico da altura do poço em função do raio de influência que este apresentado na figura 4.5:

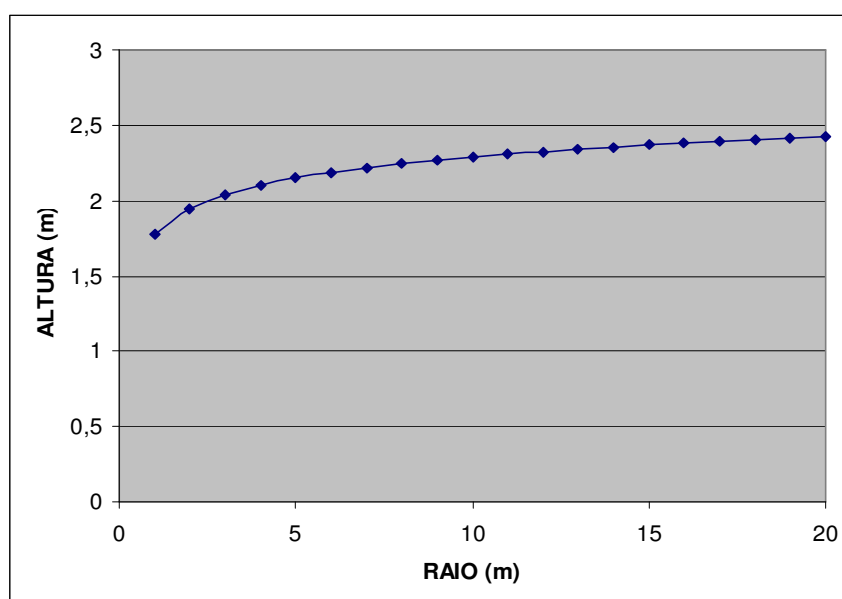


Figura 4.5-Gráfico altura da bomba x raio de influência.

A altura que será instalada a bomba será de pouco mais de 2,0 metros, para que se tenha um raio de influência de aproximadamente 5,0 metros, que é o necessário para a remoção de produtos livres e dissolvidos na água subterrânea.

4.3.4. Reservatório de Óleo

O reservatório será conectado na caixa separadora e receberá exclusivamente a fase livre separada da água subterrânea.

A caixa decantadora foi construída com um galão de aço de 100 litros de capacidade. As conexões foram feitas com adaptador flange dupla de 3/4” na entrada e saída.

4.3.5. Caixa Decantadora

A caixa decantadora recebe a água da bomba pneumática e decanta as partículas sólidas dissolvidas e suaviza a turbulência gerada pela bomba melhorando a eficiência do processo.

A caixa decantadora foi construída com um galão de aço de 100 litros de capacidade. As conexões foram feitas com adaptador flange dupla de 3/4” na entrada e saída. Na entrada da caixa na parte interna foi colocado um tubo em “Tê” para aliviar a pressão.

4.3.6. Caixa Separadora de Água e Óleo (SAO)

A caixa SAO é destinada a separar óleos não emulsivos em águas contaminadas e trabalha em regime contínuo com drenagem constante do óleo separado que se destinará para um tambor ou tanque posicionado ao lado do equipamento.

A caixa contém 4 compartimentos de separação. O primeiro, câmara decantadora, tem a principal finalidade de separar os resíduos sólidos e tornar o regime da água laminar. O segundo é a região coalescente que tem como finalidade a redução da velocidade do fluxo e produzir uma barreira de obstáculo que aglutinará e desprenderá os resíduos oleosos. O terceiro compartimento tem a finalidade de armazenar o óleo separado e em função dos dispositivos hidráulicos instalados separar o óleo da água. Finalmente no quarto compartimento, chamado de câmara de saída, irá garantir que o

efluente esteja isento de frações oleosas e finalmente ser encaminhado para a rede de coleta de esgoto.

A caixa tem 1,2m de altura, 0,45m de largura e comprimento e foi construída com chapas externas em aço com 1/8” de espessura e as divisões internas de plástico resistente do tipo PEAD. O volume da câmara decantadora e a câmara de saída é de 0,081 m³ e a região coalescente e o compartimento de armazenamento é de 0,0405 m³. As conexões das caixas e o reservatório foi feita com mangueira PT 3/4”x2,5.

4.4. CÁLCULO DA ESPESSURA REAL DA FASE LIVRE

A espessura real da fase livre no subsolo pode ser determinada a partir da espessura de fase livre de óleo tomada nos poços de monitoramento e extração e calculada através da equação empírica de Pastrovich (1979)

$$t_g = t(1 - do / da)$$

Onde,

tg – Espessura real de fase livre no aquífero

t – Espessura aparente

do – Densidade do produto

da – Densidade da água

Para o cálculo do volume de fase livre foram consideradas as espessuras reais que foram obtidas através da correção da espessura aparente. Os poços onde se verificou fase livre foram utilizados para interpolação dos pontos que foram utilizados para dimensionar a extensão da pluma de fase livre em planta.

Dessa forma, o volume da fase livre foi encontrado por meio da multiplicação da média de sua espessura pela área que ele ocupa no solo.

O volume real de fase livre do subsolo foi determinado a partir da seguinte fórmula:

$$V_{FL} = V_t \times \theta_t$$

Onde,

VFL – Volume real de fase livre do subsolo

Vt – Volume total calculado

θ_t – Porosidade total estimada no solo

A massa da fase livre foi determinada com a multiplicação do volume de fase livre encontrado pela densidade do produto.

A massa de fase livre do subsolo foi determinada a partir da seguinte fórmula:

$$m_{FL} = V_{FL} \times d_o$$

Onde,

mFL – Massa real de fase livre do subsolo

VFL – Volume real de fase livre do subsolo

do – Densidade do produto

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ESTUDO DE CASO: POSTO 1

No primeiro estudo de caso foi realizado no Posto 1, localizado em São Paulo. Foi realizada inicialmente uma investigação preliminar, com objetivo de investigar o solo e a água subterrânea e avaliar a presença de hidrocarbonetos nestes compartimentos ambientais; selecionar amostras de solo e água subterrânea para análises químicas de TPH total; comparar os resultados com padrões nacionais e internacionais; analisar os resultados e propor plano de ação com base nos resultados. Também foi caracterizado o entorno do local, e definidas as características hidrológicas e geológicas.

Logo após foi feito um detalhamento, que teve como objetivo: investigar o solo e a água subterrânea e avaliar a presença de hidrocarbonetos em pontos próximos aos PM-04 e PM-05, onde foi encontrada fase livre durante o passivo ambiental.

Em agosto de 2004, foi realizada uma Investigação complementar da água subterrânea como base para avaliação de risco.

Após o detalhamento da área e a avaliação de risco realizada, foi instalado um sistema MPE no local.

5.1.1. Avaliação do entorno

O Posto 1 está inserido em uma região de ocupação mista, constituída predominantemente residencial, as poucas atividades comerciais são pequenas oficinas.

Dentro do raio visitado apenas um estabelecimento comercial, Expo Center Norte, tinha um poço tubular profundo, que segundo informações verbais fornecidas pelo responsável pela manutenção elétrica, esse poço foi desativado. Tal poço localiza-se a jusante da garagem de ônibus, no sentido do fluxo de água subterrânea dessa empresa.

Conforme a Norma Técnica ABNT/NBR 13.786/2001, o Posto 1 se enquadra na **Classe 2**, devido ao Centro de Exposição nas proximidades do site.

5.1.2. Contexto geológico

5.1.2.1. Geologia regional

Regionalmente, a área investigada assenta-se sobre os sedimentos aluvionares terciários da Bacia de São Paulo. As unidades litológicas desta unidade compreendem areias, cascalhos e argilas em diferentes graus de diagênese, sendo que, os sedimentos aluvionares de idade quaternária são mais inconsolidados que os de idade terciária. O embasamento cristalino está sotoposto ao pacote sedimentar e é composto por rochas de composição granítica a granodiorítica, bem como por granito-gnaisses e migmatitos.

5.1.2.2. Geologia local

A geologia local foi caracterizada a partir dos perfis das sondagens dos poços de monitoramento deste trabalho. Com esses dados foram identificados, do topo para a base, um nível de aterro e três pacotes sedimentares inconsolidados.

O aterro apresenta-se com matriz argilo arenosa desagregada de coloração marrom até 1,5 m de profundidade. Ele está sotoposto a uma camada sedimentar argilo-arenosa de

coloração ocre a marrom com porções avermelhadas, granulação fina, inconsolidada até 1,20 m de profundidade. Abaixo desta camada segue-se uma camada de sedimentos arenosos de granulação fina a média com cimentação siltosa até 5,0 m. A última camada é composta por argila orgânica preta com intercalações de areia média a fina. A figura 5.1 mostra a seção geológica da área.

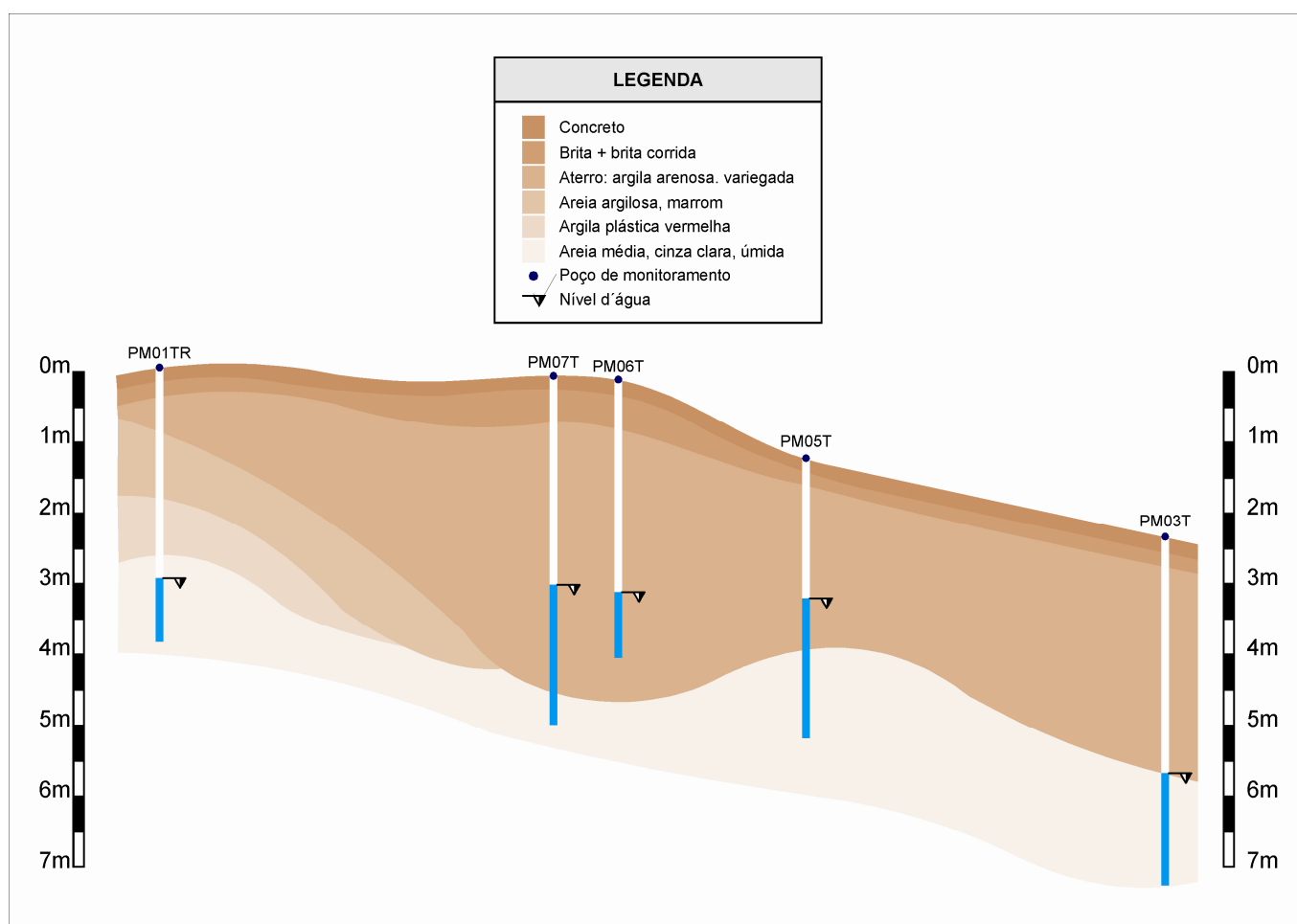


Figura 5.1- Seção Geológica Posto 1

5.1.3. Hidrogeologia

Com a interpretação da geologia local auxiliado dos resultados dos trabalhos anteriores e do perfil esquemático do poço tubular profundo, identificou-se dois aquíferos na área de estudo: aquífero livre e aquífero profundo fraturado.

O aquífero superficial livre, objeto deste estudo, é representado por sedimentos aluvionares, arenosos, inconsolidados com matriz siltosa e a parte basal desse aquífero é constituída por solos de alteração de rocha de composição granítica a granodiorítica. Os dados levantados indicam que existe um sistema aquífero livre formado por sedimentos aluvionares e solo de alteração de rocha. O sistema de recarga desse aquífero é por infiltração pluviométrica nas áreas permeáveis e de recarga. Ainda sob o ponto de vista hidrológico, o fluxo subterrâneo do aquífero livre segue na direção do rio Tietê.

O aquífero fraturado na área é constituído por rochas do embasamento cristalino e não foi objeto de estudo deste trabalho.

5.1.4. Investigação Preliminar

Durante a investigação preliminar na unidade foram executadas 05 (cinco) sondagens (ST-01 até ST-05), potencialmente impactados, foram instalados os poços de monitoramento (PM-01 a PM-05). As amostras de solo foram selecionadas nos 5 furos de sondagens (ST-01 ao ST-05). A coleta de amostras de água subterrânea foi realizada nos 5 poços de monitoramento instalados. Foram realizadas análises químicas do solo e água subterrânea para hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH). As cinco sondagens e poços de monitoramento foram distribuídos na área.

As concentrações detectadas para avaliação da qualidade do solo indicaram valores de TPH na amostra ST-04 (4670 mg/kg) acima do limite de Intervenção do Padrão Holandês.

Foram identificados, por meio dos resultados de análises realizadas nas amostras dos poços de monitoramento, a presença de TPH acima do limite de Intervenção do padrão holandês. O poço de monitoramento PM-04, indicou a presença de TPH com valores de 45 mg/L e o poço de monitoramento PM-05, indicou a presença de TPH com valores de 1,7 mg/L.

Considerando a presença destas concentrações, foi recomendado se executar um detalhamento das investigações no setor de tancagem (PM-04) e no setor de manutenção (PM-05), para definir a extensão deste comprometimento, avaliar as causas e eventualmente proceder às intervenções necessárias.

5.1.5. Investigação detalhada / confirmatória

A fase de detalhamento teve como objetivo: investigar o solo e a água subterrânea e avaliar a presença de hidrocarbonetos em pontos próximos aos PM-04 e PM-05; comparar os resultados com padrões ambientais nacionais e internacionais; delimitar a área comprometida, descrevendo suas respectivas concentrações; analisar os resultados, propor um plano de ação preventivo e de remediação na área comprometida.

Na área da unidade foram executadas 09 (nove) sondagens denominadas de ST-01 até ST-09, 4 (quatro) amostras de solo foram selecionadas para análises químicas. Nos 09 (nove) pontos em que foram realizadas as sondagens foram instalados os poços de monitoramento temporários com as denominações: PT-01 a PT-09. A coleta de amostras de água subterrânea foi realizada em 4 (quatro) poços de monitoramento temporários instalados. Foram realizadas análises químicas do solo e água subterrânea para TPH.

A amostra de solo ST-03 apresentou concentrações de TPH acima do limite de intervenção do Padrão Holandês. Tal concentração, também encontradas no ST-04 Fase I, se deve aos possíveis derramamentos durante as atividades de abastecimento de ônibus no

local haja vista que neste local a pavimentação possuía fissuras tornando o piso inadequado, (piso permeável).

Nas análises de solo próximas ao poço de monitoramento PM-05 (pátio de manutenção) não foram detectadas concentrações de TPH acima do limite de detecção, confirmando um comprometimento pontual próximo ao tanque de armazenamento subterrâneo (TAS) de óleo queimado.

Os poços de monitoramento temporários PT-01 a PT-05 apresentaram presença de fase livre de óleo diesel e concentrações na água subterrânea ente 329 mg/L a 931 mg/L de TPH.

Estas concentrações se devem aos possíveis derramamentos durante as atividades de abastecimento de carros/ônibus neste setor, a pluma se movimentando para jusante do mesmo. Resultando na detecção de fase livre de hidrocarbonetos nos poços de monitoramento provisórios PT-01 a PT-05.

Com a elaboração do mapa de pluma de isoespessura, determinou-se que a pluma de fase livre estava compreendida em uma área de aproximadamente 292 m², com o poço de monitoramento PM-04 possuindo a maior espessura e com um volume aproximado de 0,29 m³.

Próximo ao poço de monitoramento PM-05, no pátio de manutenção, foi detectado concentração no poço de monitoramento temporário PT-07 de TPH igual a 13 mg/L.

Baseado nesses resultados foi recomendado um plano de ação, incluindo um sistema de remediação na área de tancagem, próximo ao PM- 04.

Após a fase de detalhamento de campo foram realizadas análises químicas para caracterizar a qualidade da água subterrânea com o objetivo de uma avaliação da

evolução do impacto da água subterrânea e se avaliar os resultados, propondo medidas corretivas, caso necessário.

Os pontos selecionados para a coleta das amostras de água foram definidos seguindo o plano de ação, executados nos trabalhos anteriores, ou seja, foram coletadas amostras nos 5 (cinco) poços de monitoramento já existentes na área.

Foram identificados, através dos resultados de análises realizadas nas amostras coletadas em poços de monitoramento, a presença de compostos orgânicos voláteis (VOC) e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAH) acima do limite de intervenção estabelecido pela CETESB e pelo padrão holandês. Nos poços PM-01, PM-02 e PM-03 não foram detectados nenhum composto de VOC ou PAH.

O poço PM-04 apresentou concentrações de PAH acima do limite permissível, sendo detectados os seguintes compostos: naftaleno (679 µg/l) e fenantreno (475 µg/l). As análises de VOC apresentaram concentrações de etilbenzeno e xilenos totais com valores acima do estabelecido pela CETESB e pelo padrão holandês.

O poço PM-05 apresentou fenantreno em concentrações de 41 µg/l estando acima do estabelecido pelo padrão holandês. Para análise de VOC foram detectados apenas traços (abaixo do limite de intervenção dos padrões adotados) de Acetona e Tolueno.

5.1.6. Análise de risco

Em agosto de 2004, foi realizada uma Investigação complementar da água subterrânea como base para avaliação de risco, o qual tinha como objetivo de: instalação de 3 novos poços de monitoramento sentinelas, para detalhar o conhecimento do comportamento e da qualidade da água subterrânea, além de servirem como pontos de aviso, para eventuais saídas dos impactos identificados; pesquisa da existência de poços

de extração vizinhos à área de estudo junto ao DAEE; amostragem dos poços tubulares profundos e Avaliação de Risco à Saúde Humana.

Os resultados analíticos da água subterrânea mostraram que os principais compostos identificados na área compreendiam os PAH's e BTEX.

O setor próximo ao antigo tanque de óleo queimado apresentou fase livre de 4 mm, que estava sendo removida com auxílio de manta hidrofóbica, nas análises de PAH's da fase dissolvida foi identificado fenantreno em concentração traço abaixo do limite de intervenção dos padrões adotados.

No setor localizado próximo aos tanques de abastecimento de veículos, O poço PM-04 apresentava 3 cm de fase livre, e estava sendo remediado através do sistema de remoção de fase livre pelo método “pump and treat”. Nas análises químicas da fase dissolvida deste setor foram detectados nos poços de monitoramento PM-04 e PM-07 benzeno em concentrações acima do limite máximo permitido pela CETESB. Xilenos totais e etilbenzeno foram detectados acima do limite de intervenção dos padrões adotados apenas no PM-04.

No setor localizado no limite a jusante da posto 1 estavam localizados os poços de monitoramento PM-01, PM-06 e PM-08. Os resultados analíticos apresentaram concentração traço para o composto fenantreno no poço de monitoramento PM-06. Os demais poços não apresentaram concentrações de PAH e BTEX acima do limite de detecção analítico.

Nas análises químicas dos poços tubulares profundos não foram detectados compostos da série dos PAH's acima do limite de detecção analítico. Para análise de BTEX, foi detectado benzeno no poço PTP-01, que se encontra no setor mais a jusante da área, podendo essa ser um provável impacto residual e não de um impacto do aquífero fraturado. Foi recomendada a realização de uma vídeo inspeção e coleta de amostras estratificadas para realização de análises químicas.

Com base nos resultados obtidos na avaliação de risco, pode-se observar que foram obtidos índices de risco abaixo dos limites máximos sugeridos pela CETESB nas áreas externas à unidade do setor avaliado, para as rotas de exposição “exposição à água subterrânea” e “inalação em ambientes externos”. Foram obtidos índices de riscos potenciais carcinogênicos e não-carcinogênicos, acima dos limites máximos sugeridos pela CETESB. Vale salientar que os valores utilizados foram referentes à fase dissolvida da pluma, não levando em conta a fase livre detectada no poço de monitoramento PM-04. Essa condicionante não foi considerada já que existe um sistema de bombeamento de fase livre implantado no centro de massa da pluma de fase livre (próximo ao PM-04).

5.1.7. Remediação

Em junho de 2007 foi implantado um sistema de remediação de extração multifásica, MPE, nas áreas denominadas APE-TQ e APE-LV, as áreas estão apresentadas no ANEXO 1 – Figura 1 - Mapa de atividades Posto 1.

Com base nos perfis das sondagens e dos poços de extração foi possível caracterizar um perfil constituído, por horizontes compostos por aterro, solos argilo-arenosos e arenosos. O sistema aquífero é do tipo livre o nível de água médio local encontrava-se a 3,00 metros de profundidade. O mapa do fluxo da água subterrânea local foi elaborado com base em medições efetuadas antes do bombeamento e o fluxo

apresentou orientação no sentido de N para S (ANEXO 1- Figura 2- Potenciométrico Posto1).

Com o objetivo de caracterizar a extensão e a espessura da pluma de fase livre nas áreas de tancagem e lavagem (APE-TQ e APE-LV) foram realizadas 73 sondagens investigativas conforme detalhado no Estudos de Investigação Complementar, de maio de 2007. Destas sondagens, 09 delas identificadas como PM-01LV, PM-01T, PM-02T, PM-05T, PM-06T, PM-07T, PM-04, PM-07 e PB-01 foram aprofundadas e instalaram-se os poços de extração e de bombeamento.

Visando estabelecer a geometria espacial da pluma de fase livre e obter o volume e a massa de produto na água subterrânea foram utilizadas as informações dos pontos onde foi detectado espessuras de fase livre superiores a 5 centímetros e identificados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Espessuras de fase livre aparente e real encontradas nos poços de extração das áreas de tancagem e lavagem.

PONTO	ESPESSURA APARENTE (m)	DENSIDADE DO PRODUTO EM FASE LIVRE (kg/m ³)	ESPESSURA REAL (m)
PM-01LV	0,60	800	0,120
PM-01T	0,07	800	0,014
PM-02T	0,41	800	0,082
PM-05T	0,40	800	0,080
PM-06T	0,10	800	0,020
PM-07T	0,01	800	0,002
PM-04	0,77	800	0,150
PM-07	0,15	800	0,030
PB-01	0,30	800	0,060

O cálculo de volume e massa total de fase livre na área de tancagem e lavagem de veículos (APE-TQ e APE-LV) é apresentado na **Tabela 5.2**.

Tabela 5.2 – Massa estimada de fase livre de óleo

Área total de fase livre estimada (m ²)	2.000
Volume total de fase livre(m ³)	300
Densidade do produto (kg/m ³)	800,0
Porosidade total do solo	0,35
Massa estimada de fase livre na área (kg)	105

O valor da massa estimada foi calculado com base na interpolação de dados dos poços onde constava fase livre. Por se tratar de uma interpolação com poucos pontos em uma área relativamente grande, podem ocorrer valores finais divergentes, pois no cálculo foi considerada a maior espessura real de fase livre (0,15m) para toda a área delimitada. (ANEXO 1- Figura 3- Pluma de Fase Livre Posto1)

5.1.7.1. Monitoramento

O monitoramento do sistema de remediação considera: a medição de fase livre, funcionamento dos sensores, bóias, válvulas, integridade de mangueiras, conexões, painel elétrico, tambores e container. Serão também monitorados os efluentes gasosos e líquidos, assim como será feita a regulagem da caixa separadora.

Para garantir maior eficiência na remoção de fase livre, o procedimento de desligamento do sistema é automatizado para que haja recuperação do nível freático e a nova acumulação de fase livre no interior dos poços da área.

A figura 5.2 abaixo apresenta o gráfico do monitoramento de março de 2007, início da operação do MPE, até agosto de 2007, após o desligamento dos sistema em julho e o religamento em agosto.

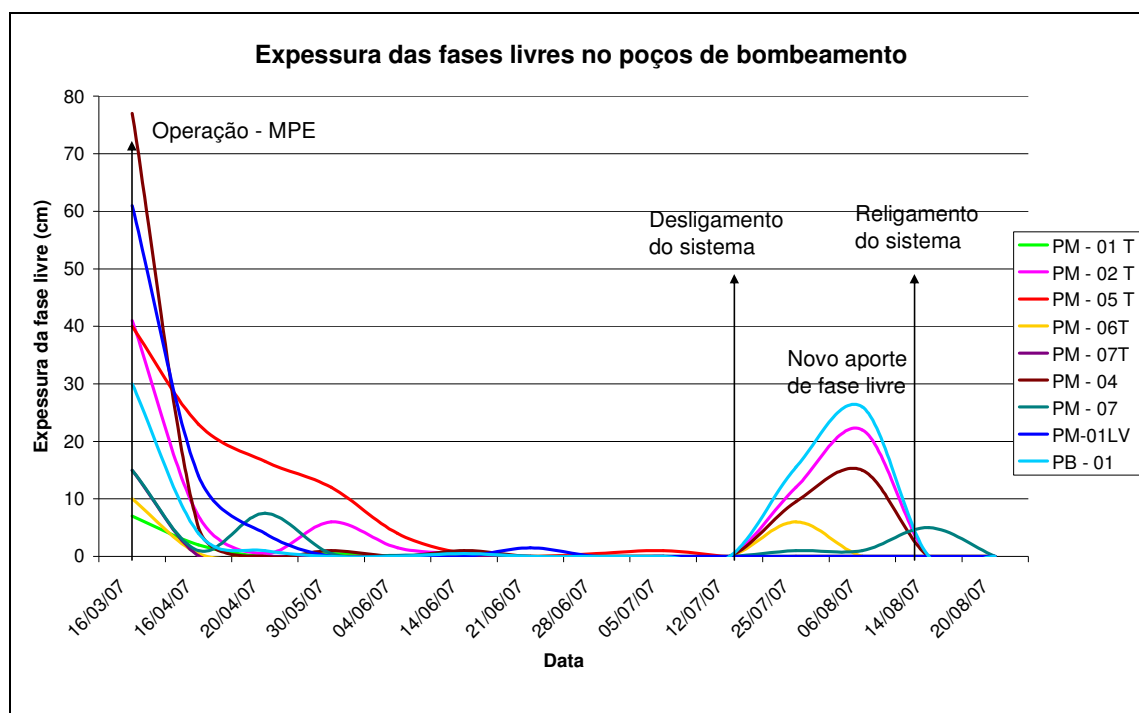


Figura 5.2-Gráficos da espessura das fases livres nos poços de bombeamento e monitoramento do Posto 1

A figura 5.3 abaixo apresenta o gráfico do monitoramento após o religamento em agosto de 2007 até novembro de 2007. Em setembro de 2007 o PM-05T foi desligado e houve um aumento na fase neste poço pontualmente. Em outubro e em novembro o sistema foi desligado para avaliação de sua eficiência. Algumas oscilações da fase livre ocorreram, menor que as anteriores, com sistema ligado, a fase livre aproximou-se a zero como pode ser observado no gráfico.

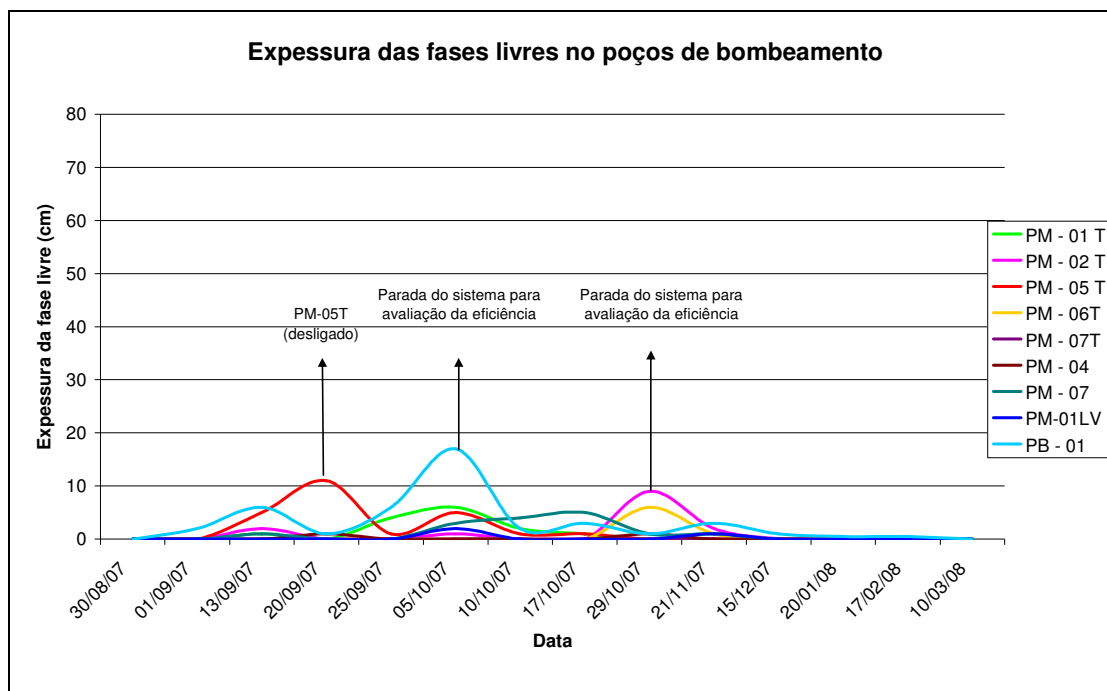


Figura 5.3 - Gráfico da espessura das fases livres nos poços de bombeamento e monitoramento do Posto 1.

5.2. ESTUDO DE CASO: POSTO 2

Em Dezembro de 2006 foi realizada a investigação de passivo ambiental na área do posto 2, localizado em São Bernardo dos Campos. Foi investigado o solo e a água subterrânea e avaliada a presença de hidrocarbonetos nestes compartimentos ambientais; seleccionar amostras de solo e água subterrânea para análises químicas de BTEX e PAH; comparar os resultados com padrões nacionais e internacionais; analisar os resultados e propor plano de ação com base nos resultados. Neste caso também foi caracterizado o entorno do local, e definidas as características hidrológicas e geológicas.

A fase de detalhamento teve como objetivo: verificar da qualidade do solo e água subterrânea através de análises químicas laboratoriais; comparar os resultados analíticos com base em padrões nacionais e internacionais e análise de risco realizada para o local; mapear as plumas de compostos químicos; avaliar os resultados obtidos, principalmente próximo aos poços de monitoramento PM-01 e PM-03, os quais apresentavam fase livre.

Após o detalhamento da área foi instalado um sistema de remediação. Após 6 meses de operação do sistema a área não apresentava mais fase livre.

Em março de 2009, foi realizada uma Investigação complementar da água subterrânea como base para avaliação de risco, onde foi determinado que o sistema de remediação deveria voltar a operar.

5.2.1. Avaliação do entorno

O Posto 2 está inserido em uma região de ocupação mista, constituída por comércios e residências. Destaca-se a existência de um córrego aproximadamente 350 metros a norte/nordeste do site.

A água utilizada para consumo e serviços gerais no posto provém da rede pública de distribuição SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). E através de um poço semi-artesiano e um reservatório de águas pluviais localizado na área do posto, é captada água para uso na lavagem de veículos.

Conforme a Norma Técnica ABNT/NBR 13.786/2001, o Posto 2 se enquadra na Classe 3, uma vez que há um corpo hídrico nas proximidades do site.

5.2.2. Contexto geológico

5.2.2.1. Geologia regional

De acordo com o mapa geológico do Estado de São Paulo, a área analisada em São Bernardo do Campo, está inserida entre os Complexos Embu e Pilar, ambos parte do Grupo Açungui, e a geologia regional consiste em migmatitos heterogêneos de variadas estruturas, além de xistos, filitos e quartzitos. Acima destas unidades encontram-se

também sedimentos fluviais, incluindo argilitos, siltitos, arenitos argilosos da Formação Terciária São Paulo. Na subsuperfície são encontrados sedimentos aluvionares, tais como areia inconsolidada com grãos de variados tamanhos, argilas e aluviões.

5.2.2.2. Geologia local

A geologia local foi caracterizada a partir dos perfis das sondagens dos poços de monitoramento. Com esses dados foram identificados, do topo para a base, um aterro silto argiloso e 3 pacotes argila.

O aterro apresenta-se com matriz silto argilosa de coloração variegada com até 2,0 m de profundidade. Ele está sobreposto a uma camada de argila siltosa de coloração marrom amarelada, granulação fina, inconsolidada até 1,0 m de profundidade. Abaixo desta camada segue-se uma camada de argila orgânica. A última camada é composta por areia argilosa com granulação fina, cinza amarelado. A figura 5.4 mostra a seção geológica da área.

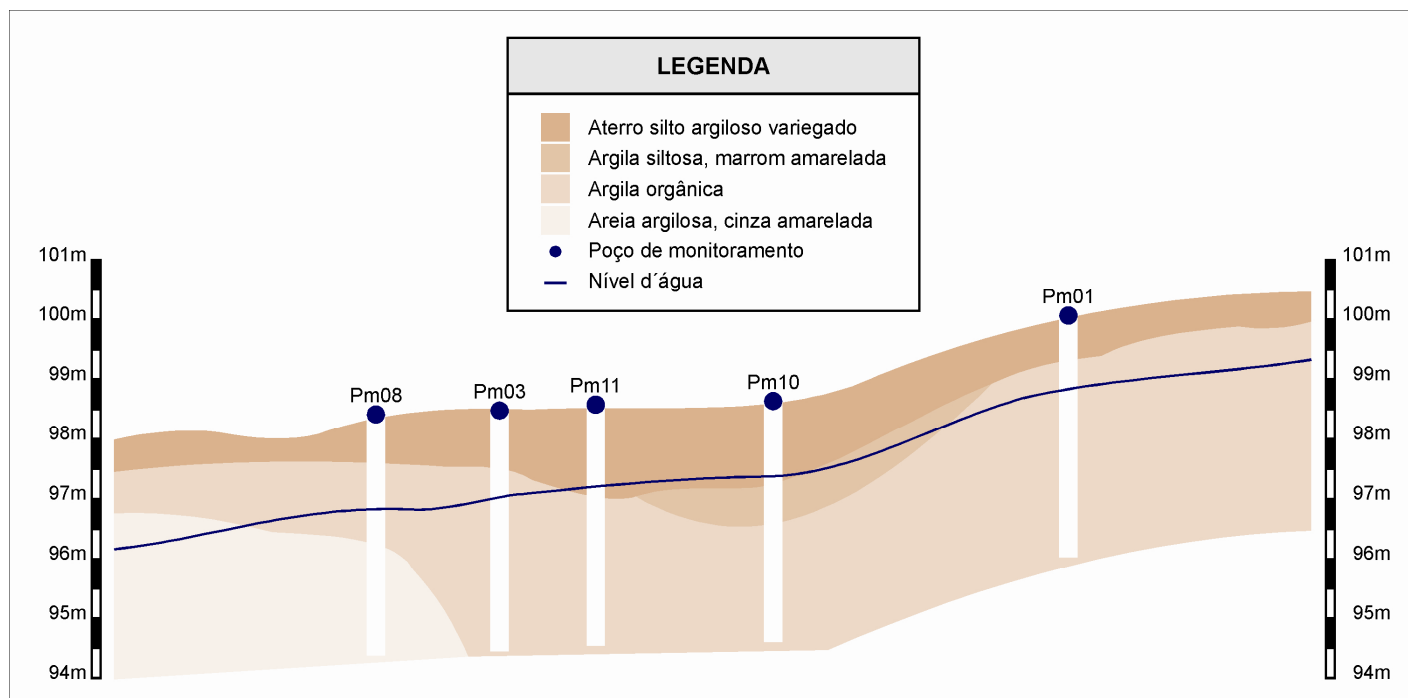


Figura 5.4- Seção Geológica Posto 2

5.2.3. Investigação Preliminar

Na unidade foram executadas 06 (seis) sondagens (ST-01 até ST-06), potencialmente impactados, foram instalados os poços de monitoramento (PM-01 a PM-06). As amostras de solo foram selecionadas nos 5 furos de sondagens (ST-01 ao ST-05). A coleta de amostras de água subterrânea foi realizada nos 6 poços de monitoramento instalados. Foram realizadas análises químicas do solo e água subterrânea para hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH). As cinco sondagens e poços de monitoramento foram distribuídos na área.

Os resultados deste trabalho indicaram a presença de benzeno, tolueno e xilenos totais na água subterrânea e indicaram dois pontos impactados por fase livre, qual foi associada ao vazamento de gasolina ocorrido em um antigo tanque de armazenamento subterrâneo.

Desta forma, através do Auto de Infração – Imposição de Penalidade de Advertência, datado de 10/12/2007, a agência ambiental da CETESB descreveu as seguintes irregularidades: ter lançado poluentes (combustíveis) no solo e água subterrânea, passíveis de causar riscos à comunidade local, conforme estudo de passivo ambiental apresentado em 19/06/07.

A CETESB, através deste documento exigiu implantação imediata de medidas para eliminação do vazamento e também a realização de uma investigação detalhada do local, bem como o estudo de avaliação de risco à saúde humana, utilizando a metodologia ACBR.

5.2.4. Investigação detalhada / confirmatória

Durante a fase de detalhamento na área da unidade foram executadas 07 (sete) sondagens a trado manual denominadas SD-06 até SD-12. Nos 07 (sete) pontos em que foram realizadas as sondagens foram instalados os poços de monitoramento definitivos com as denominações: PM-06 a PM-12. A coleta de amostras de água subterrânea foi realizada nos 12 (doze) poços de monitoramento existentes. Foram realizadas análises químicas do solo e água subterrânea para determinações das concentrações de PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares) e BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e os Xilenos), incluindo 02 amostras de controle (réplica e Branco de campo), de forma a avaliar a extensão da contaminação e se necessário obter dados para a elaboração de um plano de trabalho para remediação da área, suprimindo as exigências da CETESB. Foi também feita amostragem de TOC (Carbono Orgânico Total) para posterior análise de risco.

Nas amostras de solo das sondagens SD-06, SD-07, SD-08, SD-09, SD-10, SD-11 e SD-12, não foram detectados valores de BTEX e PAH no solo acima dos limites impostos pela CETESB.

Foram encontrados traços de BTEX na sondagem SD-09 e SD-12 e traços de PAH nas amostras das sondagens SD-07, SD-09 e SD-12.

As águas subterrâneas coletadas dos poços de monitoramento PM-01, PM-02, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06, PM-07, PM-08, PM-09, PM-10, PM-11 e PM-12 estão impactadas por fase livre em dois pontos, os poços PM-01 e PM-03. A pluma de fase dissolvida de BTEX atinge ainda o poço de monitoramento PM-11 com valores acima do limite de intervenção da CETESB (117 ug/L). A pluma se estende da área do tanque localizado próximo a troca de óleo, em direção a área de bombas acompanhando o fluxo das águas subterrâneas. Foram ainda encontrados valores abaixo do limite de intervenção no poço de monitoramento PM-12. No que tange ao PAH, com exceção dos dois poços com fase livre (PM-01 e PM-03), foram apenas encontrados nos outros poços de monitoramento traços dos PAH.

Baseado nesses resultados foi recomendado um plano de ação, incluindo a implementação de um sistema de remediação na área dos poços PM-01 e PM-03, os quais apresentam fase livre, constatando-se risco a saúde e ao meio ambiente. Realizar análise de risco, após a remediação da fase livre, para estabelecer as metas de remediação da fase dissolvida.

5.2.5. Análise de risco

Em março de 2009, foi realizada uma Investigação complementar da água subterrânea como base para avaliação de risco. Foi instalado de 1 novo poços de monitoramento para detalhar o conhecimento do comportamento e da qualidade da água subterrânea; pesquisa da existência de poços de extração vizinhos à área de estudo junto ao DAEE; amostragem dos poços tubulares profundos e Avaliação de Risco à Saúde Humana.

No poço PM-03 no limite a jusante do posto 02 foi detectado 3cm de fase livre.

Esta área estava sendo remediado através do sistema de remoção de fase livre pelo método “pump and treat”. Nas análises químicas da fase dissolvida deste setor foram detectados nos poços de monitoramento PM-01, PM-10, PM-11 e PM-12 benzeno em concentrações acima do limite máximo permitido pela CETESB. Xilenos totais foram detectados acima do limite de intervenção dos padrões adotados apenas no PM-01.

Nas análises químicas dos poços de monitoramento foram detectados compostos da série dos PAH's acima do limite de detecção analítico, o principal composto detectado foi Naftaleno nos poços PM-01 e PM-11.

Com base nos resultados obtidos na avaliação de risco, pode-se observar que foram obtidos índices de risco abaixo dos limites máximos sugeridos pela CETESB nas áreas externas à unidade do setor avaliado, para as rotas de exposição “exposição à água subterrânea” e “inalação em ambientes externos”. Foram obtidos índices de riscos potenciais carcinogênicos e não-carcinogênicos, acima dos limites máximos sugeridos pela CETESB. Vale salientar que os valores utilizados foram referentes à fase dissolvida da pluma, pois fase livre sempre é sinal de risco eminente a saúde humana, sendo assim recomenda-se a reinstalação do sistema MPE.

5.2.6. Remediação

Em janeiro de 2008 foi implantado um sistema de remediação de extração multifásica, MPE, na área próxima aos poços de monitoramentos PM-03 e PM-09, as áreas estão apresentadas no ANEXO 1- Figura 4- Mapa de atividades Posto 2.

Com base nos perfis das sondagens e dos poços de extração foi possível caracterizar um perfil constituído, por horizontes compostos por aterro, solos argiloso. O sistema aquífero é do tipo livre o nível de água alto no local, encontrava-se a 2,00 metros de profundidade. O mapa do fluxo da água subterrânea local foi elaborado com base em medições efetuadas antes do bombeamento e o fluxo apresentou orientação no sentido de S para N (ANEXO 1- Figura 5- Potenciométrico Posto2).

Visando estabelecer a geometria espacial da pluma de fase livre e obter o volume e a massa de produto na água subterrânea foram utilizadas as informações dos pontos onde foi detectado espessuras de fase livre superiores a 5 centímetros e identificados na Tabela 5.3. O cálculo de volume e massa total de fase livre na área é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 – Espessuras de fase livre aparente e real encontradas nos poços de monitoramento

PONTO	ESPESSURA APARENTE (m)	DENSIDADE DO PRODUTO EM FASE LIVRE (kg/m ³)	ESPESSURA REAL (m)
PM-01	0,15	800	0,030
PM-03	0,10	800	0,020

Tabela 5.4 – Massa estimada de fase livre de óleo

Área total de fase livre estimada (m ²)	40
Volume total de fase livre(m ³)	1
Densidade do produto (kg/m ³)	800,0
Porosidade total do solo estimada	0,45
Massa estimada de fase livre na área (kg)	32,4

O valor da massa estimada foi calculado com base na interpolação de dados dos poços onde constava fase livre. Por se tratar de uma interpolação com poucos pontos em uma área relativamente pequena, podem ocorrer valores finais divergentes, pois no cálculo foi considerada a maior espessura real de fase livre (0,03m) para toda a área delimitada. (ANEXO 1- Figura 6- Pluma de Fase Livre Posto2)

5.2.6.1. Monitoramento

O monitoramento do sistema de remediação considera: a medição de fase livre, funcionamento dos sensores, bóias, válvulas, integridade de mangueiras, conexões, painel elétrico, tambores e container. Foram também monitorados os efluentes gasosos e líquidos, assim como será feita a regulagem da caixa separadora.

Para garantir maior eficiência na remoção de fase livre, o procedimento de desligamento do sistema é automatizado para que haja recuperação do nível freático e a nova acumulação de fase livre no interior dos poços da área.

A figura 5.5 abaixo apresenta o gráfico do monitoramento de janeiro de 2008, início da operação do MPE, até agosto de 2008, após o desligamento do sistema em julho. Após 6(seis) meses de operação do sistema os poços de monitoramento não apresentavam mais fase livre. Em março de 2009, 8 meses após o desligamento do sistema, o poço de monitoramento PM-03 voltou a apresentar fase livre e foi recomendado o religamento do sistema. Em março de 2009 o sistema voltou a operar. Em abril o sistema foi desligado para avaliação de sua eficiência e houve um aumento na fase neste poço pontualmente.

Algumas oscilações da fase livre ocorreram, mas a espessura já está se estabilizando com apenas uma película nos poços PM-01, PM-03, PM-11 e PM-12 como pode ser observado no gráfico. Atualmente o sistema apresenta-se desligado para reforma do local.

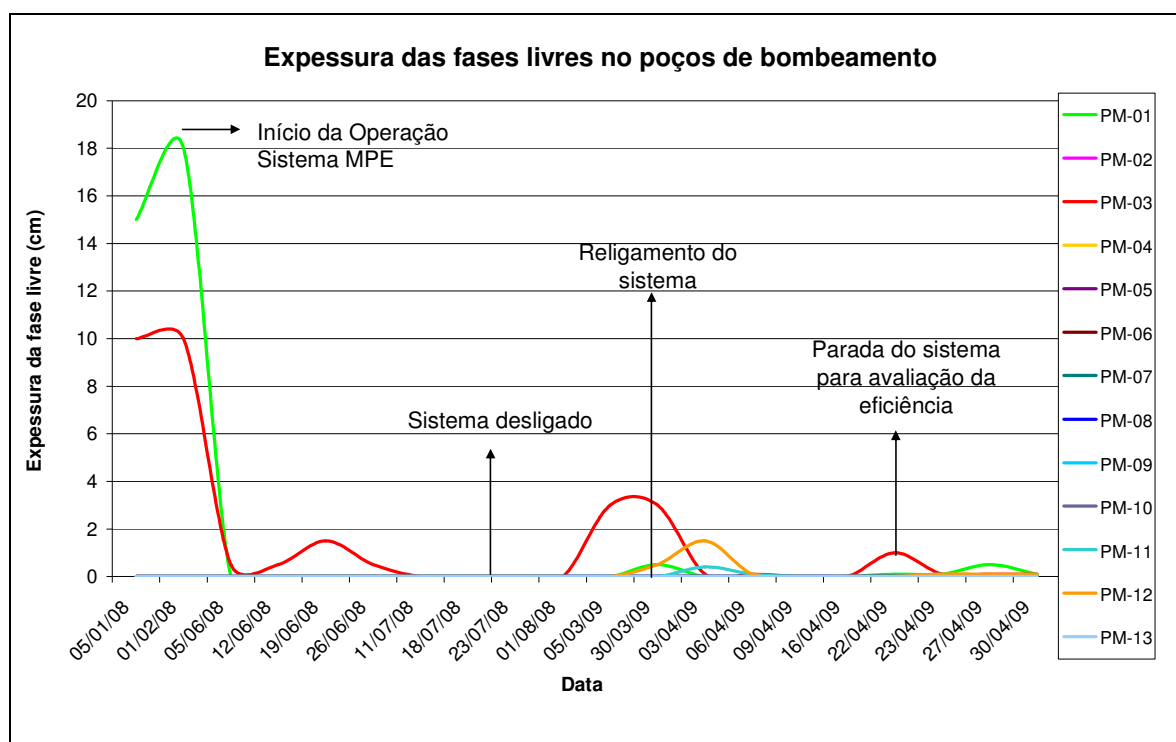


Figura 5.5- Gráfico da espessura das fases livres nos poços de bombeamento e monitoramento do Posto 2.

5. CONCLUSÕES

Nos dois casos estudados foram constatados passivos ambientais. No posto 1 foi calculada uma área de 2.000 m² de fase livre, resultando em um volume de 300 m³. O posto 2 apresentou um volume menor de fase livre, foi calculada uma área de 40 m², com volume de 1 m³. As plumas de fase livre estão delimitadas conforme apresentados nas figuras 3 e 4 do ANEXO 1.

Na análise de risco realizada nos postos, quando considerada apenas a fase caracteriza risco eminente à saúde humana. Um a nova análise de risco é recomendada após o término da remediação.

No posto 1, em março de 2007 deu-se o início da operação do MPE, 4 meses depois o sistema foi desligado para avaliação de sua eficiência, o poço crítico em março de 2007 era o PM-04, onde a queda na espessura da fase livre foi de 88%. O poço que apresentou menor queda na fase livre foi o PM-05 T que apresentou uma queda de 46%. Se a disposição do sistema for observada, o poço de bombeamento PB-01 localiza-se a apenas poucos metros do PM-04, já p PM-05T é um dos poços mais distantes. Algumas oscilações da fase livre ocorreram durante o monitoramento do sistema, mas a partir de novembro de 2007 a fase livre aproximou-se a zero, em março de 2008 o sistema foi desligado, pois nenhum poço de monitoramento apresentava fase livre a 5 meses.

No posto 2 após 6(seis) meses de operação do sistema os poços de monitoramento não apresentavam mais fase livre. Em março de 2009, 8 meses após o desligamento do sistema, o poço de monitoramento PM-03 voltou a apresentar 3 cm de fase livre e o sistema foi religado. Apesar da volta da fase livre, é importante observar que a fase livre detectada em janeiro de 2008 era de 10 cm, houve uma queda de 70%.

Como pode ser observado, nos dois casos analisados o sistema MPE em operação apresentou a diminuição da fase livre. Após o desligamento dos sistemas, alguns poços voltaram a apresentar fase livre e foi recomendado o religamento do sistema. Isso ocorre porque com o sistema de bombeamento ligado, existe o rebaixamento do aquífero, e apesar da fase livre das águas subterrâneas não estarem mais eminentes, ainda existe contaminação na fase residual do solo. Com o desligamento do sistema, o aquífero retorna ao seu nível inicial, e a contaminação existente no solo é absorvida pela água.

Pode ser observado que no solo mais argiloso, analisado no posto 2, por causa da porosidade e da condutividade do solo, o retorno da fase livre é mais lento, já no solo argilo-arenoso, analisado no posto 1, onde a porosidade é maior assim como a condutividade efetiva, as oscilações da fase livre podem ser observadas rapidamente com o desligamento do sistema.

Um fator que também influencia na recorrência de fase livre durante a remediação pelo sistema MPE são as épocas de seca e de chuva. Normalmente durante a época de chuva a água que infiltra no solo passa pela área residual, absorvendo parte dos contaminantes, antes de chegar ao aquífero, podendo ocasionar pequenas variações na fase livre.

No posto 1, após um ano de operação do sistema de MPE, toda a fase livre foi extraída, atualmente a fase dissolvida ainda esta sendo remediada, mas não foi detectada fase livre. No posto 2, ainda existe uma película sobrenadante de fase livre, mas em 16 meses de operação houve uma redução de 99% da espessura da fase livre. Atualmente o sistema encontra-se desligado devido a reformas no local, mas voltará a operar para remoção completa da fase livre.

Como esperado, a remoção da fase livre pelo sistema MPE foi mais eficiente no solo argilo-arenoso, encontrado no posto1, mas contrariando a muitos autores também

apresentou eficiência no solo argiloso do posto 2. Um fator que deve ser considerado é o tempo de operação do sistema, devido a porosidade do solo argiloso, e o tamanho das partículas do solo, o contaminante permanece mais impregnado ao mesmo, tornando sua remoção mais demorada.

Conforme anteriormente citado, a água subterrânea do Posto 2 ainda apresenta um pouco de fase livre, sendo assim, sugere-se que após a reforma do posto o sistema seja reinstalado e volte a operar com monitoramento. Também é sugerido o monitoramento semestral no posto 1 para que se aumente o grau de segurança ambiental e ocupacional desta área.

REFERÊNCIAS

ABDANUR, F. **Remediação de solo e água subterrânea contaminados por hidrocarbonetos de petróleo: estudo de caso na refinaria Duque de Caxias/RJ**. 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9896**: poluição das águas. Sao Paulo: ABNT, 1987. 66 p.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY-ATSDR. **CERCLA**: priority list of hazardous substances 2003. [S.l.:s.n.,2003?]. Disponível em: <<http://www.atsdr.cdc.gov/clist.html>>. Acesso em: 10 jul. 2009.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY- ATSDR **Toxicological profile for total petroleum hydrocarbons-TPH**. Atlanta:Public Health Service, 1999. 18 p.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY- ATSDR. **Toxicological Profile For Benzene**. [S.l.]: Department Of Health And Human Services, 1997. 428p.

AZAMBUJA, E.; CANCELIER, D.B.; NANNI, A. S. **Contaminação dos solos por LNAPL**: discussão sobre diagnóstico e remediação. Porto Alegre: [s.n], 2000. Disponível em: <<http://www.azambuja.com.br/acervo/geosul2000.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2007.

BORGES,W.; Lago,A.; Fachin,S.; Elis,V.; Santos, E. GPR utilizado na detecção da geometria de cavas usadas para disposição de resíduos de óleos lubrificantes. Rev. Bras. Geof.[S.l]: v.24 n.4 São Paulo oct./dic. 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 518, de 26 março 2004 . Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2004.

BRASIL Ministério do Meio Ambiente. Decreto lei n. 67, de 06 de abril de 2006, **CONAMA**. Disponível em: < www.mma.gov.br/port/conama>. Acesso em: 5 de ag. de 2008.

CHARLES J. NEWELL; STEVEN D. A.; RANDALL R. R.; SCOTT G. H. **Light Nonaqueous Phase Liquids**. 1995a. [S.l.]: Environmental Protection Agency – EPA. Ground Water Issue 1995. 28 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO-CETESB. **Procedimento para a identificação de passivos ambientais em estabelecimentos com sistema de armazenamento aéreo de combustíveis (SAAC)**. São Paulo: CETESB, 2006. 9 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO-CETESB. **Valores orientados para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Decisão da Diretoria da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental**. [S.l.]: CETESB, 2005. (2005-e, 195). Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>> Acesso em: 30 jul. 2008.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO-CETESB. **Relação de áreas contaminadas**. [S.l.:s.n.]: 2004. 8p .Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.asp>. Acesso em: 15 set. 2007.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO-CETESB. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 2.ed. São Paulo: CETESB/GTZ, 2001.

COHEN, R.M.; MERCER, J.W. **Properties models characterization and remediation**. [S.l.] J. of Contaminant Hydrology, 1990, p. 107-163.

COHEN, R. M.; MERCER, J. W.; GREENWALD, R. M.; BELJIN M. S. **Ground water issue design guidelines for conventional pump-and-treat systems**. [S.l.]: ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Superfund Tecnology SupportCenter for Ground Water, 1997.

CONANT, B. **A PCE plume discharging to a river:** investigations of flux, geochemistry, and biodegradation in the streambed. 2001. Dept. of Earth Sciences, University of Waterloo, Waterloo, 2001.

DE PASTROVICH, T.L.; BARADAT, Y.; BARTHEL, R.; A. CHAIPELLI, A.; FUSSELL, D.R. **Protection of groundwater from oil pollution.** The Hague; CONCAWE, 1979. 61 p. (report 3/79).

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Preliminary remediation goals.** United States: Environmental Protection Agency – Region 9-Superfund, 2004.

Disponível em: <<http://www.epa.gov/region9/waste/sfund/prg/index.html#prgtable>>. Acesso em: 10 ag. 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **A Citizen's guide to air stripping .** [S.l.]: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2001.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Monitored natural attenuation of petroleum hydrocarbons.** [S.l.]: U.S. Epa Remedial Technology Fact Sheet. National Risk Management Research Laboratory, 1999.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY–EPA. **Pump and treat of contaminated groundwater at the des moines TCE superfund site des moines, Iowa:** cost and performance report. [S.l.]: Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office, 1998.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Pump-and-treat ground- water remediation:** a guide for decision makers and practitioners. 1996a. Washington: United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington. 1996. p. 74.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Engineering Forum Issue**

Paper: soil vapor extraction implementation experiences. 1996d. [S.l.]: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY -EEA. **Europe's environment: the third assessment.** [S.l.]: European Environment Agency. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu>>. Acesso em: 23 jul. 2008.

FEITOSA, A.C.F.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** Serviço Geológico do Brasil. Fortaleza: Editora Gráfica LCR, 1997. 389p. (CPRM).

INGEBRITSEN, S.E. **Groundwater in geologic processes.** New York: Cambridge University Press, 1999. 341 p.

MARINO, N.M.R.; ANTUNES, A.M.R. **Diretrizes para apresentação de dissertação, tese, monografia e trabalho de conclusão de curso.** Guaratinguetá: Biblioteca FEG - UNESP, 2007.

MANCINI, T.M. **Métodos de caracterização de áreas potencialmente contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo.** 2002. 187f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

MILLER, A. D. **Remediação de fase livre de gasolina por bombeamento duplo: estudo de caso.** 2001. 133f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MINISTÉRIO OLANDES DE OBRAS, PALNEJAMENTO E AMBIENTE. VROM . **Circular on target values and intervention values for soil remediation. Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment DBO/1999226863.** [S.l.:s.n.],2000 Disponível em: <http://www2.minvrom.nl/Docs/internationaal/S_I2000.pdf> - Acesso em: 7 de ag. de 2008.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL- NRC. **Innovations in ground water and soil cleanup:** from concept to commercialization. Washington: National Academy Press, 1997. 314p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL-NRC. **Alternatives for ground water cleanup.** Washington: National Academy Press, 1994. 315p.

OLIVEIRA, E. **Comportamento de contaminantes orgânica em subsuperfícies.** [S.l.]: Hidroplan, 2001. 54 p.

PATNAIK, P. **Handbook of environmental analysis:** chemical pollutants in air, water, soil, and solid wastes. [S.l.:s.n.], 1996. 604p

PEDROSA, C.A.; CAETANO, F.A. **Águas subterrâneas.** Brasília: Superintendência de Informações Hidrológicas– SIH, 2002. 19 p.

PENNER, G.C. **Estudos laboratoriais da contaminação do solo por gasolina com uso de detector de fotoionização.** 2000. 132f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PERRONI, R.C. **Introdução a refinação de petróleo.** Rio de Janeiro: Petrobrás- CENAP,1965. 121-125 p.

RUSSELL, J.B. **Química geral.** 2.ed. São Paulo:Makron Books, 1994. v.1.

SAUCK, W.A. A Model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sand sediments. **Journal of Applied Geophysics**, [S.l.]: v.44, n.08, p.151-165, 2000.

SÃO PAULO. Lei Estadual n.997/76 e Regulamentado pelo Decreto Estadual 8.468/76. 31 maio 1976. **Licenciamento Ambiental:** dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Decreto n. 8.468. Aprova o Regulamento da Lei n. 997/76, de 31 de maio de 1976 que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio-ambiente. dia set. 1976.

SHWARZENBACH, R.P.; GSCHWEND, P.M; IMBPODEN, D.M. **Environmental Organic Chemistry**. [S.l.]: John Wiley Sans, 1993. 574p.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 113-138 p.

TAYLOR, P.; JONKER, L.; DONKOR, E.; GUIO, D.; MBODJI, I.; MLINGI, C.; HASSING, J.; LOPEZ, D. **Planejamento para a gestão integrada de recursos hídricos: manual de captação e guia operacional**. [S.l.:s.n.], 2005. Disponível em: <http://www.cap-net.org/captrainingmaterialesearchdetail.php?TM_ID=67>. Acesso em: 3 ag. 2007.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1997. p.393-428.

YAMATA, D.T. **Caracterização geológico-geotécnica aplicada à instalação de postos de combustíveis em Rio Claro (SP)**. 2004. 158f. Dissertação (Mestrado em Geociências)– Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo,2004.

ANEXOS

ANEXO I – FIGURAS

ANEXO II – MEMORIAL DE FOTOS

ANEXO I- Figuras

Figura 1- Mapa de atividades do Posto 1.

Figura 2- Mapa Potenciométrico do Posto 1.

Figura 3- Pluma da Fase Livre do Posto 1.

Figura 4- Mapa de atividades do Posto 2.

Figura 5- Mapa Potenciométrico do Posto 2.

Figura 6- Pluma da Fase Livre do Posto 2.

Figura 1- Mapa de atividades do Posto 1.

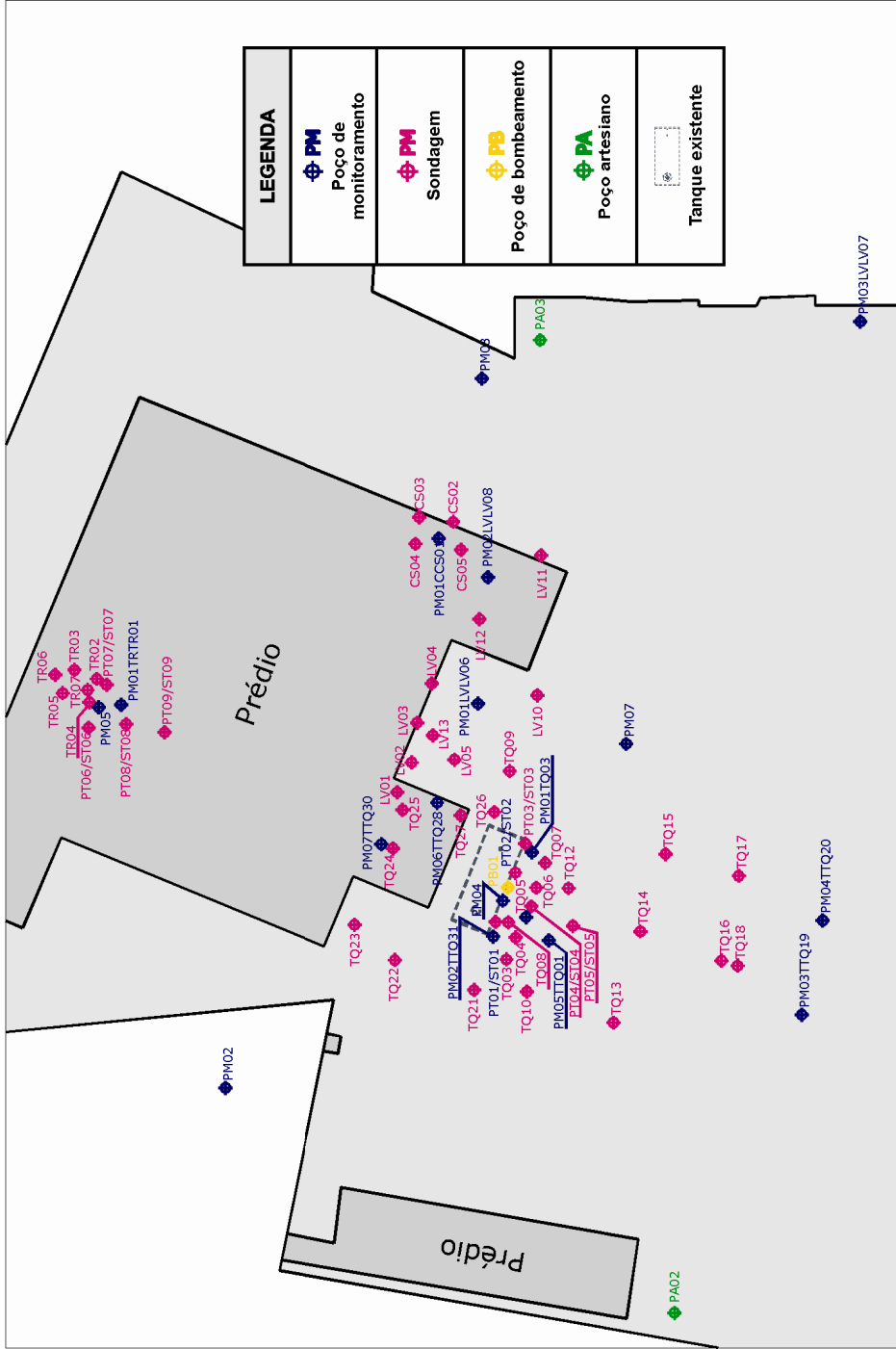


Figura 2- Mapa Potenciométrico do Posto 1.

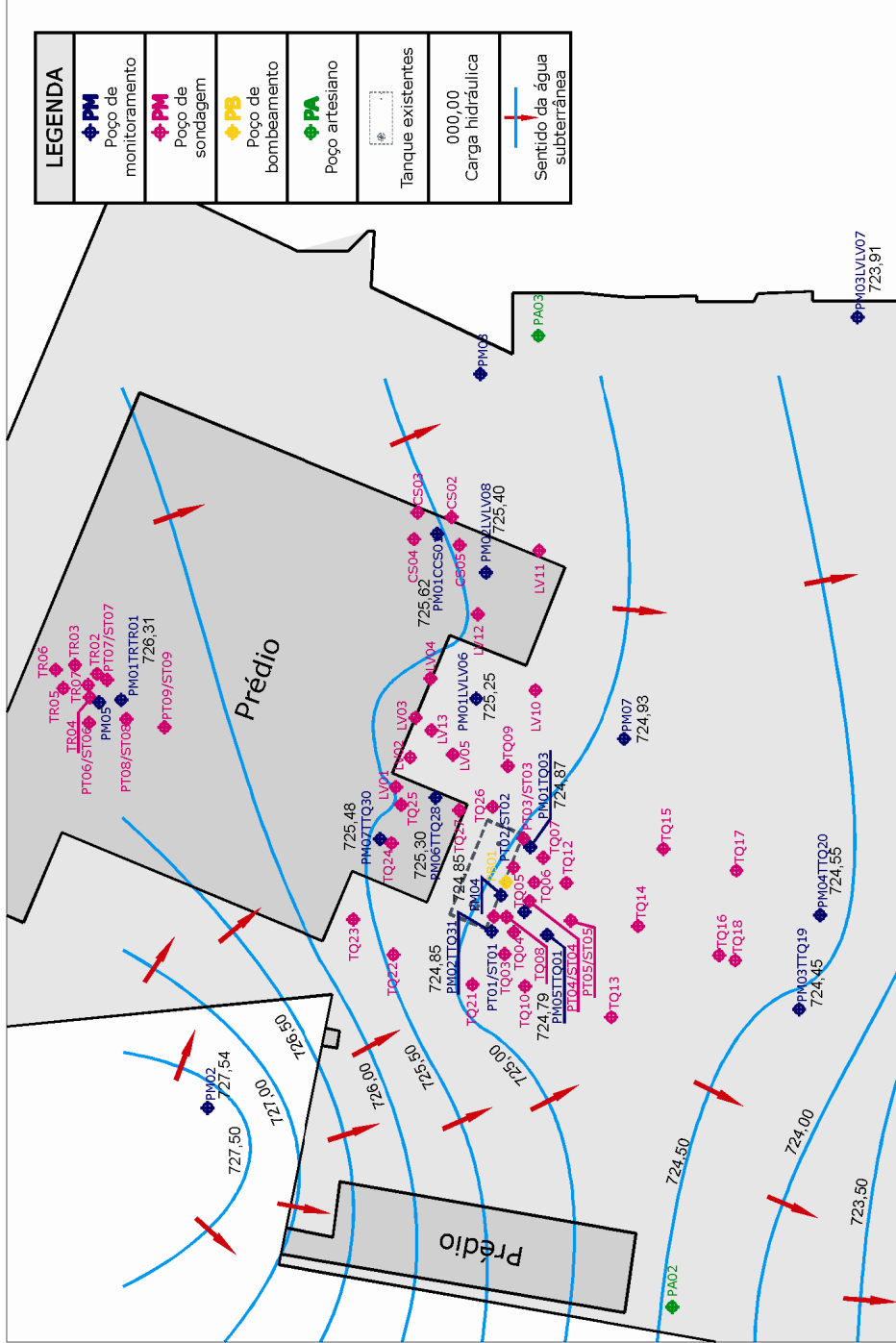


Figura 3- Pluma da Fase Livre do Posto 1.

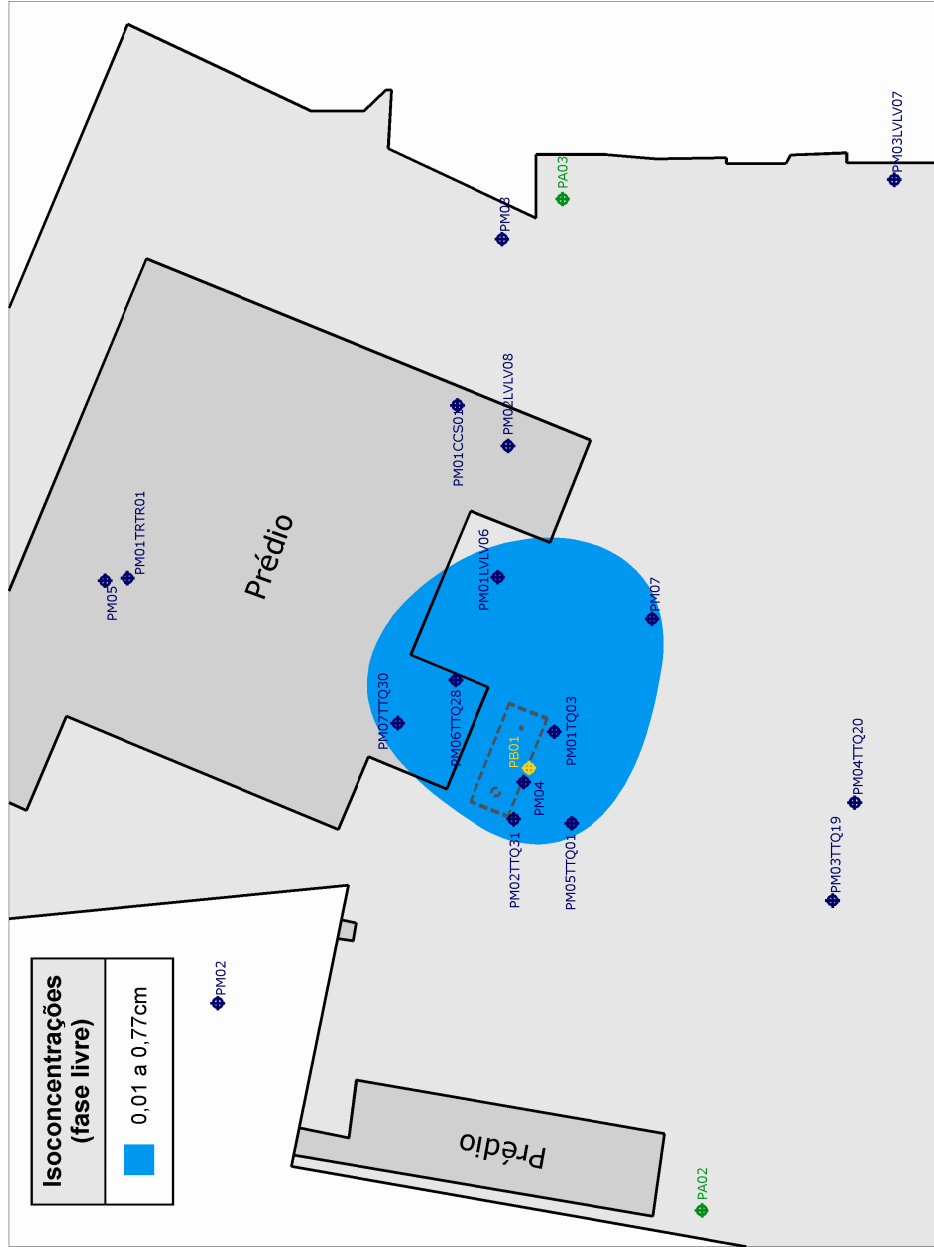


Figura 4- Mapa de atividades do Posto 2.

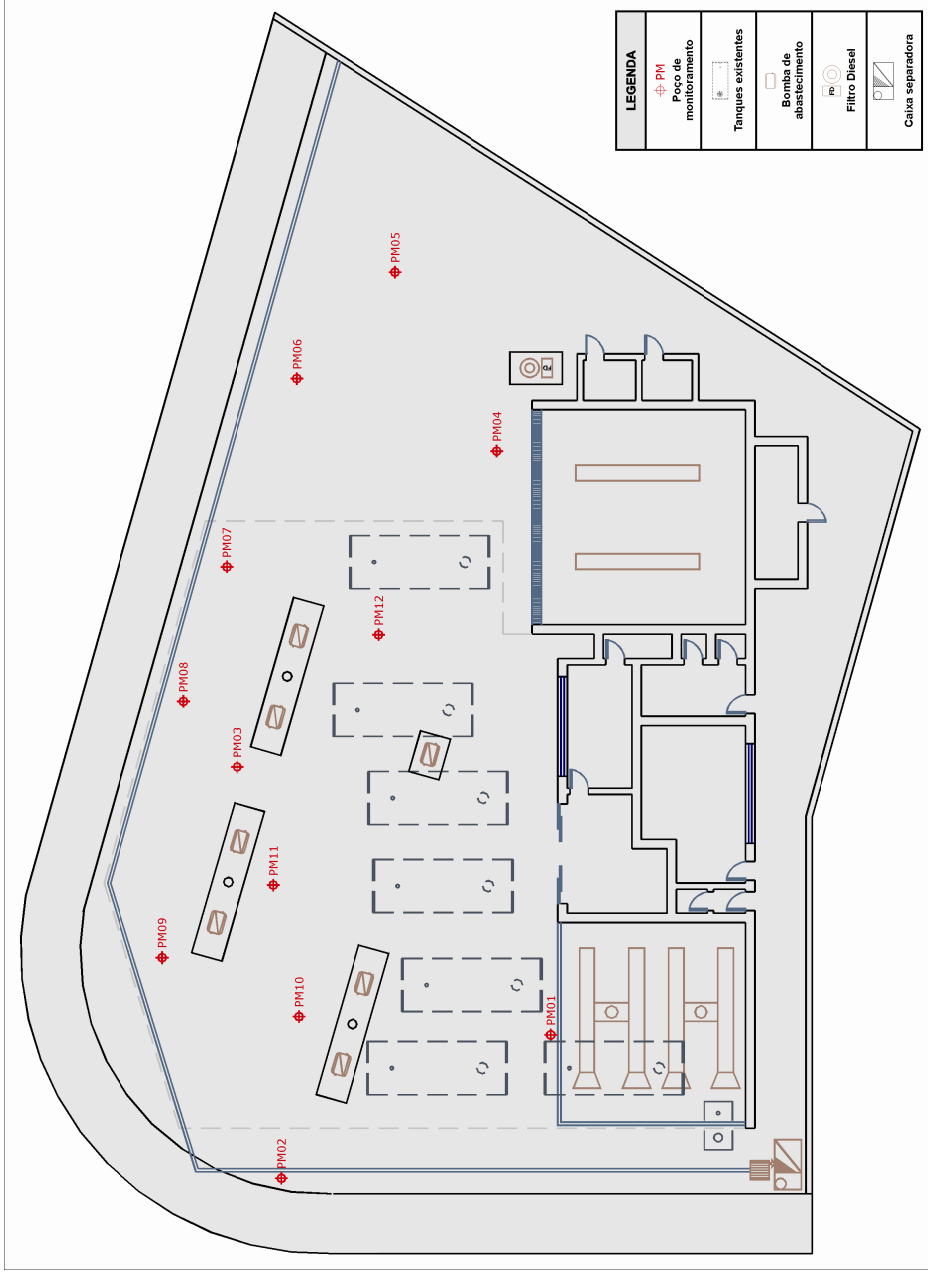


Figura 5- Mapa Potenciométrico do Posto 2.

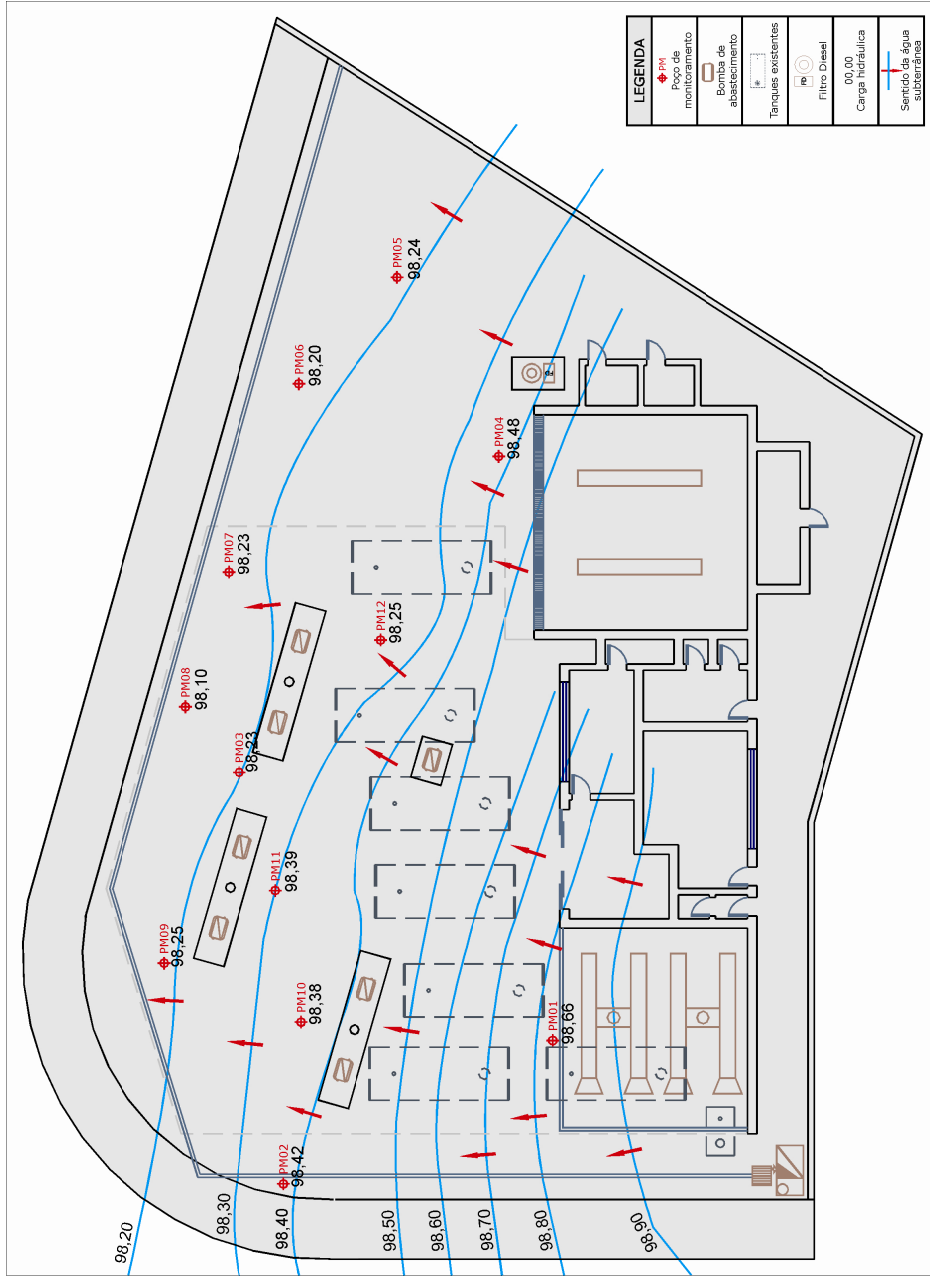
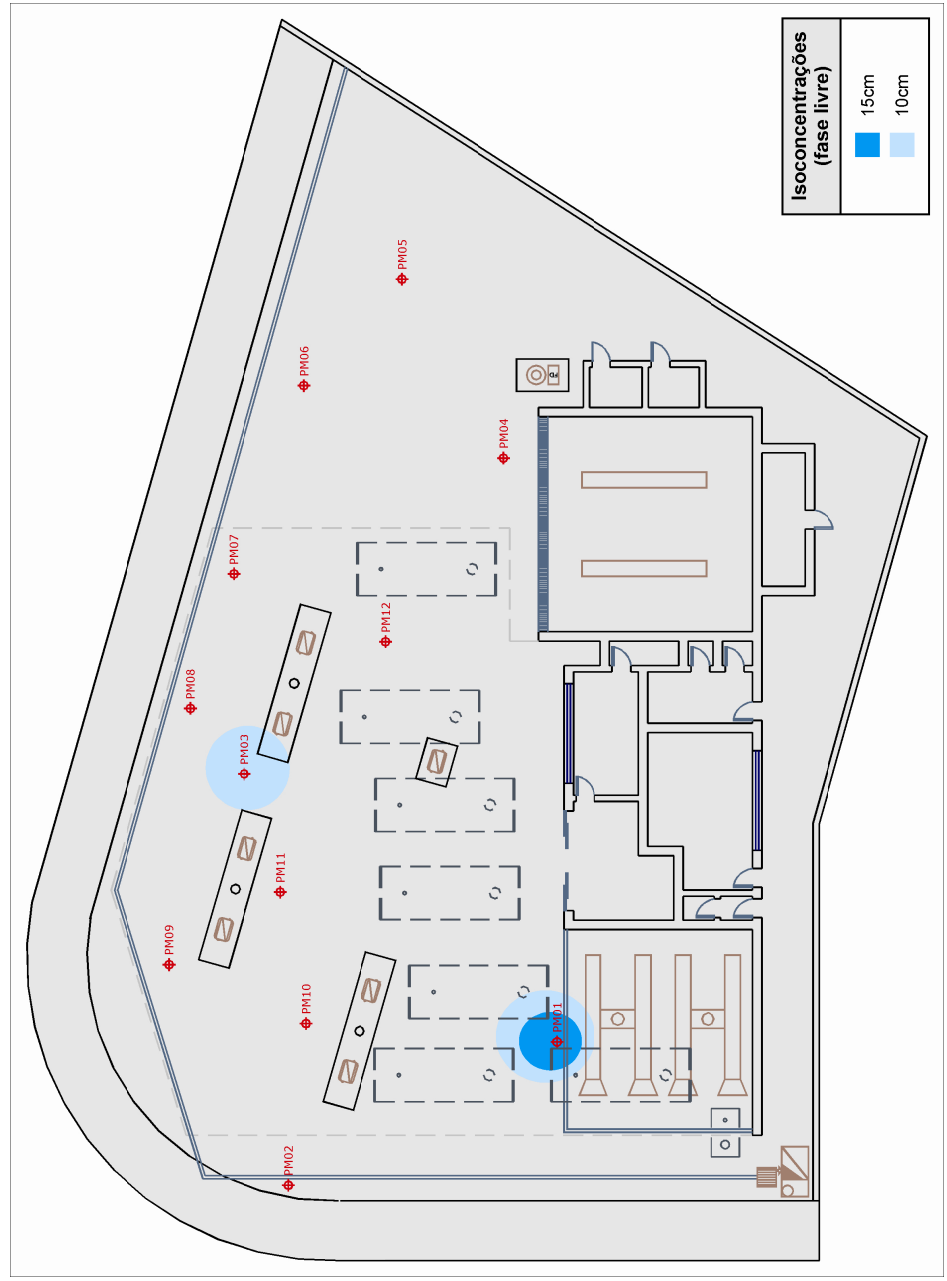


Figura 6- Pluma da Fase Livre do Posto 2.



ANEXO II- MEMORIAL DE FOTOS



Foto 1- Sistema de Remediação MPE.



Foto 2- Sistema de Remediação MPE.



Foto 3- Sistema de Remediação MPE.



Foto 4- Bomba pneumática e Compressor.



Foto 5- Caixa Decantadora.