



# **Remediação de Solo e Água Subterrânea Contaminados. Estudo de Caso: Posto de Abastecimento**

Tatiana Leonardo Pereira de Campos  
Luana Scalercio Juca da Silva

**Monografia em Engenharia Química**

**Orientadora**  
**Profa. Lídia Yokoyama, D.Sc.**  
**Profa. Denize Dias de Carvalho**

**Mai de 2009**

# **Remediação de Solo e Água Subterrânea Contaminados. Estudo de Caso: Posto de Abastecimento**

***Tatiana Leonardo Pereira de Campos***

***Luana Scalercio Juca da Silva***

**Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico**

**Aprovado por:**

-----  
**Maria José de O. C. Guimarães, D.Sc.**

-----  
**Oswaldo Galvão Caldas da Cunha, Ph. D.**

-----  
**Ysrael Marrero Vera, D.Sc.**

**Orientado por:**

-----  
**Lídia Yokoyama, D.Sc.**

-----  
**Denize Dias de Carvalho, D.Sc.**

**Rio de Janeiro, RJ – Brasil**

**Mai de 2009**

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho a minha família, meus pais José Adolfo Snajdauf de Campos e Elisabete L. P. de Campos e minha avó Solange Paes Leonardo; pelo esforço, dedicação e compreensão, em todos os momentos desta e de outras caminhadas.*

*Em especial, ao meu pai, por sua ajuda, carinho e paciência para que eu pudesse terminar este projeto a tempo e com qualidade. Pai, te amo muito e esse aprendizado juntos jamais serão esquecidos!*

*Aos meus grandes amigos que acompanharam durante toda essa longa jornada e nunca deixaram de me apoiar e torcer para que este grande dia chegasse. Obrigada!*

***Tatiana Campos***

**Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico**

## **REMEDIÇÃO DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA CONTAMINADOS. ESTUDO DE CASO: POSTO DE ABASTECIMENTO**

**Tatiana Leonardo Pereira de Campos**

**Luana Scalercio Juca da Silva**

**Maio, 2009**

**Orientador: Lidia Yokoyama, D.Sc.**

A contaminação de águas subterrâneas por vazamentos em postos de combustíveis vem merecendo cada vez mais atenção tanto da população em geral como dos órgãos de controle ambiental. O número elevado de postos de combustíveis nos centros urbanos e a idade avançada de grande parte dos tanques de armazenamento justificam a preocupação ambiental. O objetivo desse trabalho foi discutir as técnicas de remediação de contaminantes de solo e água subterrânea em um posto de abastecimento de combustíveis, com base em um estudo de caso de um empreendimento situado na orla marítima do Rio de Janeiro. O processo envolveu várias etapas que consistiram em avaliações sucessivas dos níveis de contaminantes no solo e no aquífero e aplicação de processos de remediação para atingir os níveis determinados pelo órgão ambiental. Especificamente foram utilizadas as técnicas de Aeração Manual do solo, *Pump and Treat* e Oxidação Química (Injeção do Reagente de FENTON). As técnicas de remediação empregadas foram efetivas na degradação do BTX e do PAH.

# ÍNDICE

<b>Capítulo I – Introdução</b>	1
<b>Capítulo II – Objetivos</b>	3
II.1. Objetivo Geral	3
II.2. Objetivos Específicos	3
<b>Capítulo III - Legislação Ambiental sobre Postos de Serviço</b>	4
III.1 - Detecção e Prevenção de Vazamento em Tanques e Tubulações de Combustíveis	6
III.2 - Poço de Monitoramento do Lençol Freático	6
III.3 – Teste de Estanqueidade	7
III.4 – Controle de Estoque	7
III.5 – Trocador de Óleo e Lavação de Veículos	8
<b>Capítulo IV - Remediação do Solo</b>	9
IV.1. Contaminantes do Solo	9
IV.1.1. Contaminantes BTX	11
IV.1.2. Contaminantes PAH	14
IV.1.3. Compostos Orgânicos Voláteis e Semivoláteis	15
IV.2. Técnicas de Remediação	16
IV.2.1. Processos Biológicos	16
a) Biorremediação	16
b) Biopilhas	18
c) Remediação Natural	19
IV.2.2. Processos Físicos e Químicos	20
a) Extração Multifásica (MPE)	20
b) Bombeamento e Tratamento das Águas Subterrâneas ( <i>Pump and Treat</i> )	22
c) Barreira Hidráulica	23
d) <i>Air Stripping</i>	24
e) <i>Soil Vapor Extraction</i> (SVE)	24
f) Injeção de Ar ( <i>Air Sparging</i> )	26
g) Dessorção Térmica em Baixas Temperaturas	27

h) Oxidação Catalítica	28
i) Processos Oxidativos Avançados	29
- Fotólise	30
- Ozônio/UV	30
- Fotocatálise Heterogênea	30
- Oxidação Química <i>in situ</i> (ISCR)	31
<b>Capítulo V - Estudo de Caso de um Posto de Abastecimento de Combustíveis</b>	<b>33</b>
V.1. Informações Preliminares	34
V.1.1. Breve Histórico	34
V.1.2. Contexto Geológico Regional	36
V.1.3. Caracterização das Cercanias	37
V.2. Investigação Ambiental	38
V.2.1. Caracterização Hidrogeológica	39
a) Levantamento Planialtimétrico	39
b) Ensaio de Permeabilidade	40
c) Velocidade das Águas Subterrâneas	41
V.2.2. Características do Sítio Contaminado	41
V.2.3. Análise de Risco	53
a) Metodologia Utilizada	54
b) Fatores de Exposição e Risco	54
c) Parâmetros Específicos de Solo, Água Subterrânea e Ar	54
d) Concentração dos Contaminantes nos Solos e Águas Subterrâneas	55
e) Fluxograma das Vias de Exposição	55
f) Resultados da Análise de Risco	56
V.3. Remediação da Contaminação	56
V.3.1. Retirada dos Tanques	57
V.3.2. Gerenciamento do Solo Contaminado	58
V.3.3. Coleta das Amostras de Solo	59
V.3.4. Instalação do Sistema de Remediação	60
V.3.5. Operação do Sistema de Remediação	63
<b>Capítulo VI – Considerações Finais</b>	<b>73</b>

<b>Referências Bibliográficas</b>	75
<b>Apêndices</b>	79
Apêndice A1 – Tabela de Classificação de Postos de Serviço da ABNT 13.786/01	80
Apêndice A2 – Cálculos do Ensaio de Permeabilidade	81
Apêndice A3 – Valores Orientadores da CETESB	82
Apêndice A4 – Fluxograma das Vias de Exposição	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura IV.1</b>	Sistema de Biorremediação	18
<b>Figura IV.2</b>	Sistema de Biopilhas	19
<b>Figura IV.3</b>	Equipamento usado no Sistema de MPE	21
<b>Figura IV.4</b>	Sistema de MPE Móvel	22
<b>Figura IV.5</b>	Esquema do Processo de Recuperação de Água Subterrânea	23
<b>Figura IV.6</b>	Sistema de Extração de Vapores (SVE)	25
<b>Figura IV.7</b>	Sistema <i>Air Sparging</i> associado ao SVE	27
<b>Figura V.1</b>	Esquema do Processo de Avaliação Ambiental de Posto de Combustível	33
<b>Figura V.2</b>	Planta Baixa do Empreendimento	35
<b>Figura V.3</b>	Mapa Geológico do Rio de Janeiro	37
<b>Figura V.4</b>	Cercanias do Empreendimento	38
<b>Figura V.5</b>	Mapa Potenciométrico do Sítio	40
<b>Figura V.6</b>	Localização das Sondagens/Poços de Monitoramento instalados (outubro de 2006)	42
<b>Figura V.7</b>	Perfil Descritivo das Sondagens e dos Poços de Monitoramento instalados	43
<b>Figura V.8</b>	Localização das Sondagens/Poços de Monitoramento instalados (novembro/2006)	48
<b>Figura V.9</b>	Perfil descritivo das Sondagens/Poços de Monitoramento instalados (novembro/2006)	50
<b>Figura V.10</b>	Retirada dos Tanques de Armazenamento do empreendimento	58
<b>Figura V.11</b>	Localização dos Pontos de Amostragem do Solo	59
<b>Figura V.12</b>	Localização dos Poços Ponteira instalados	61
<b>Figura V.13</b>	Planta Baixa do Sistema de Saneamento do Lençol Freático	62
<b>Figura V.14</b>	Localização da Sondagem executada (fevereiro/2008)	63



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela IV.1</b>	Principais Poluentes do Solo	10
<b>Tabela IV.2</b>	Propriedades Físico-Químicas dos BTX's e PAH's	11
<b>Tabela IV.3</b>	Parâmetros Físico-Químicos de importância para a Mobilidade de Hidrocarbonetos	12
<b>Tabela IV.4</b>	Degradação de Substratos de interesse via Fotocatálise Heterogênea	31
<b>Tabela V.1</b>	Resumo do Histórico do Empreendimento	34
<b>Tabela V.2</b>	Valores Orientadores para Solo e Água da FEEMA	36
<b>Tabela V.3</b>	Levantamento Planialtimétrico Relativo entre os Poços em outubro/2006	39
<b>Tabela V.4</b>	Resultados Analíticos das Amostras de Solo (setembro/2005)	44
<b>Tabela V.5</b>	Resultados Analíticos das Amostras de Água (setembro/2005)	45
<b>Tabela V.6</b>	SSTLs calculados para o Solo e as Águas Subterrâneas da Área	46
<b>Tabela V.7</b>	Descrição dos Poços de Monitoramento existentes	47
<b>Tabela V.8</b>	Resultados Analíticos das Amostras de Água (outubro/2006)	49
<b>Tabela V.9</b>	Resultados Analíticos das Amostras de Solo (novembro/2006)	51
<b>Tabela V.10</b>	Resultados Analíticos das Amostras de Água (novembro/2006)	52
<b>Tabela V.11</b>	Parâmetros Físicos do Solo	55
<b>Tabela V.12</b>	Resultados Analíticos das Amostras do Solo	60
<b>Tabela V.13</b>	Valores Orientadores para Solo e Água no Estado de São Paulo	65
<b>Tabela V.14</b>	Resultados Analíticos de Água subterrânea (Comparativo antes e ao final da Remediação pelo Sistema <i>Pump and Treat</i> ) – 1ª e 2ª Parte	67
<b>Tabela V.15</b>	Resultados Analíticos de Água subterrânea (Comparativos entre as Campanhas de Monitoramento de Abril e Julho de 2008)	69
<b>Tabela V.16</b>	Resultados Analíticos de Água subterrânea (Comparação após o Sistema da Remediação com após a Injeção de Fenton) – 1ª e 2ª Parte	71

## Capítulo I - Introdução

Nos últimos anos tem havido uma crescente preocupação das populações, de organismos científicos e mesmo de alguns governos com ações que agridem o meio ambiente. A conscientização cada vez maior das pessoas tem como consequência a criação de ONGs que atuam na defesa do meio ambiente (o GREENPEACE é um exemplo) e a pressão sobre governos e organismos multilaterais, no sentido de introduzir ou tornar mais rigorosa a legislação de proteção ao meio ambiente (o Protocolo de Kyoto é outro exemplo).

A escala dos problemas a serem enfrentados varia desde problemas globais - que afetam toda a humanidade, tais como o Efeito Estufa, o Buraco de Ozônio e os poluentes que bloqueiam parcialmente a radiação solar, at problemas locais que afetam mais fortemente partes de um País ou de uma região, tais como poluição de mananciais hídricos, lagoas e mares, desmatamento, contaminação do solo.

As indústrias de petróleo lidam diariamente com problemas decorrentes de vazamentos, derrames e acidentes durante a exploração, refino, transporte e operações de armazenamento do petróleo e seus derivados (CETESB, 2005). No Brasil existem 35.017 mil postos de combustíveis (ANP, 2008a), sendo que a maioria foi construída na década de 70. Os tanques subterrâneos, que têm uma vida útil média de 25 anos, armazenaram somente no ano de 2008 cerca de 13, 25 e 45 milhões de m<sup>3</sup> (ANP, 2008b), respectivamente de álcool, gasolina e diesel. É razoável supor que a maioria deles já esteja comprometida, apresentando vazamentos de combustíveis que se infiltram pelo solo e certamente atingindo os lençóis freáticos.

O presente projeto trata de um problema específico que é a contaminação de águas subterrâneas por vazamentos ocorridos em postos de combustíveis. Esta questão é uma preocupação crescente no Brasil e mais antiga nos Estados Unidos e Europa.

Uma das principais preocupações em um derramamento de gasolina é a contaminação de aquíferos, principalmente daqueles que estejam sendo usados como fonte de abastecimento de água para consumo humano. Por ser muito pouco solúvel em água, a gasolina derramada, contendo mais de 400 componentes, inicialmente estará no subsolo como Líquido de Fase Não Aquosa (NAPL), sendo parcialmente dissolvida quando em contato com a água subterrânea, ao longo do tempo. Os hidrocarbonetos mono aromáticos: benzeno, tolueno e xilenos, chamados BTX, são os componentes presentes na gasolina que possuem maior solubilidade em água e, portanto, são os primeiros contaminantes a atingir o lençol freático. Estes compos-

tos são considerados substâncias perigosas por serem depressoras do sistema nervoso central (COURSEUIL & MARINS, 1997).

A gasolina comercializada no Brasil é misturada com álcool em proporções que variam de 20 a 30%, de acordo com legislação em vigor. As interações entre o etanol e o BTEX podem causar um aumento da mobilidade e solubilidade, além de dificultar a biodegradação natural destes compostos. Os compostos oriundos de diesel e óleos lubrificantes possuem cadeias mais longas, o que contribui para menores mobilidade e solubilidade em água, quando comparados à gasolina. Os PAH's (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos) são componentes presentes no diesel e óleo lubrificante também considerados de potencial carcinogênicos.

No projeto são apresentadas as técnicas de remediação de solo e águas subterrâneas contaminadas por vazamentos ocorridos em postos de abastecimento. O desenvolvimento do projeto constará de apresentação dos objetivos pretendidos no capítulo II, seguindo-se a apresentação da legislação ambiental que deve ser obedecida para a instalação e operação dos postos de combustíveis no capítulo III. No capítulo IV apresenta-se uma revisão sobre as características dos principais contaminantes do solo e de águas subterrâneas encontrados na área de postos de abastecimento e sobre os principais métodos de remediação aplicados para a descontaminação. No capítulo V será apresentado um estudo de caso sobre a avaliação da área onde se localiza um posto de combustível situado na orla da cidade do Rio de Janeiro e se necessário, proposta de remediação. No capítulo VI as conclusões serão apresentadas. Seguem-se as referências bibliográficas e os apêndices.

## **Capítulo II - Objetivos**

### **II.1. Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de caso onde foram levantados dados para avaliação das condições ambientais do solo e da água subterrânea de um posto de abastecimento de combustíveis e propor técnicas de remediação de contaminantes de solo e água. O levantamento dos dados para a avaliação das condições ambientais da área foi realizada através de amostragens efetuadas num conjunto de poços distribuídos estrategicamente, nas proximidades da área de localização dos tanques de armazenamento, oferecendo subsídios para o diagnóstico da situação. No caso de postos de combustíveis normalmente são monitorados os compostos BTX e PAH's, a fim de verificar as contaminações por gasolina, diesel e óleo lubrificante.

### **II.2. Objetivos Específicos**

- Apresentar as Leis e Normas Ambientais que devem ser obedecidas para instalação e operação dos postos de abastecimento de combustível;
- Os procedimentos que devem ser realizados periodicamente para detecção de eventuais contaminações do solo e da água subterrânea associado à operação de postos de combustíveis;
- Apresentar os tipos de contaminantes do solo e da água subterrânea presentes na área do posto de abastecimento;
- Apresentar as técnicas de remediação de solo e água subterrânea aplicáveis aos diversos tipos de contaminação;
- Apresentar uma aplicação real dos procedimentos de detecção e remediação de solo e água subterrânea realizados em um posto de abastecimento localizado no Rio de Janeiro durante o período de 2005 a 2009;

### Capítulo III - Legislação Ambiental sobre Postos de Serviço

As atividades de um posto de revenda de combustível são bastante diversificadas e envolvem não só o abastecimento, mas também troca de óleo e lavagem de veículo, loja de conveniência, lanchonete, restaurante. Portanto, pode-se denominá-lo de Posto Revendedor de Combustível Derivados de Petróleo, Álcool e Prestação de Serviços.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, em sua resolução nº 273/2000 (CONAMA, 2000) denomina e classifica estes empreendimentos da seguinte forma:

\* **Posto Revendedor** – PR: Instalação onde se exerça a atividade de revenda varejista de combustíveis líquidos derivados de petróleo, álcool combustível e outros combustíveis automotivos, dispondo de equipamentos e sistemas para armazenamento de combustíveis automotivos e equipamentos medidores;

\* **Posto de Abastecimento** – PA: Instalação que possua equipamentos e sistemas para o armazenamento de combustível automotivo, com registrador de volume apropriado para o abastecimento de equipamentos móveis, veículos automotores terrestres, aeronaves, embarcações ou locomotivas; e cujos produtos sejam destinados exclusivamente ao uso do detentor das instalações ou grupos fechados de pessoas físicas ou jurídicas, previamente identificadas e associadas em formas de empresas, cooperativas, condomínios ou clubes;

\* **Posto Flutuante** – PF: Toda embarcação sem propulsão empregada para o armazenamento, distribuição e comércio de combustíveis que opera em local fixo e determinado.

Em decorrência da poluição ambiental provocada por combustíveis derivados de petróleo e álcool, promoveu-se a edição de leis, decretos, resoluções e normas para proteção, como também o monitoramento da qualidade do solo e dos recursos hídricos nas áreas de influência dos postos de combustíveis.

No âmbito federal, a questão de controle de impactos ambientais referentes à poluição causada por postos de combustíveis é normatizada por um amplo conjunto de leis. Essas leis surgiram para atribuir responsabilidades aos empreendimentos potencialmente impactantes, no que se refere à tomada das devidas precauções cabíveis. A contaminação ambiental é considerada crime ambiental pela Lei Federal 9.605/98 (IBAMA, 1998), regulamentada pelo Decreto 3.179/99 (IBAMA, 1999). A legislação brasileira obriga todos os postos de revenda de combustíveis a serem devidamente licenciados pelos órgãos ambientais competentes após cadastramento do mesmo.

A resolução N° 273 do CONAMA, dispõe que em caso de acidentes ou vazamentos que apresentem situações de perigo ao meio ambiente ou às pessoas, bem como na ocorrência de passivos ambientais, os proprietários, arrendatários ou responsáveis pelo estabelecimento, equipamentos, sistemas e os fornecedores de combustíveis que abastecem ou abasteceram a unidade, responderão solidariamente pela adoção de medidas para controle da situação emergencial e para o saneamento de áreas impactantes.

Algumas das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas consideradas no Licenciamento Ambiental são:

- NBR13312: Posto de serviço – Construção de tanque atmosférico subterrâneo em aço-carbono.
- NBR13781: Posto de serviço – Manuseio e instalação de tanque subterrâneo de combustíveis.
- NBR13782: Posto de serviço - Sistemas de proteção externa para tanque atmosférico subterrâneo em aço-carbono.
- NBR13783: Instalação hidráulica de tanque atmosférico subterrâneo em Postos de serviço.
- NBR13784: Posto de Serviço – Detecção de vazamento em postos de serviço.
- NBR13786: Posto de serviço - Seleção de equipamentos e sistemas para instalações subterrâneas de combustíveis.
- NBR13787: Controle de estoque dos sistemas de armazenamento subterrâneo de combustíveis (SASC) nos postos de serviço.
- NBR14623: Posto de serviço - Poço de monitoramento para detecção de vazamento.

Conforme resolução CONAMA n° 273, de 29 de dezembro de 2000, Art. 3º, os equipamentos e sistemas destinados ao armazenamento e a distribuição de combustíveis automotivos, assim como sua montagem e instalação, deverão ser avaliadas quanto à sua conformidade, no âmbito do Sistema Brasileiro de Certificação.

Além da exigência de licenças de instalação e de funcionamento para os postos novos, de acordo com a resolução, todos os postos em operação deverão, no prazo de seis meses, cadastrarem-se junto ao órgão ambiental competente.

Nos próximos itens apresentaremos alguns dos procedimentos que devem ser observados no Licenciamento Ambiental de Postos de Combustíveis.

### **III.1 - Detecção e Prevenção de Vazamento em Tanques e Tubulações de Combustíveis**

Os tanques de armazenamento de combustíveis têm no máximo 20 anos de vida útil de acordo com as especificações do fabricante. A partir daí, dependendo de fatores como o tipo de solo em que se encontram instalados, eles ficam vulneráveis a rupturas em consequência da corrosão. Assim, deverão passar por testes de detecção de vazamento a cada trinta dias; entretanto há algumas exceções. Os tanques novos podem passar por controle de estoque mensalmente, em conjunto com um teste de estanqueidade, até dez anos após suas instalações. Tanques em operação que não são novos podem passar por controle de estoque mensalmente, em conjunto com testes de estanqueidade anuais.

### **III.2 - Poço de Monitoramento do Lençol Freático**

Segundo ABNT, este sistema baseia-se na instalação de poços que permitam verificar a existência de produto em fase livre na superfície da água subterrânea (no máximo à 6 metros de profundidade). Este método requer a instalação de poços de monitoramento em lugares estratégicos, no solo adjacente ao tanque e às tubulações. Portanto, antes de se iniciar a construção, deve-se verificar quais as normas que regulamentam a construção e a instalação de tanques na região. Além disso, é necessário fazer uma avaliação do local para determinar o tipo de solo, a profundidade da água subterrânea, a direção do fluxo e geologia geral do local.

Os poços de monitoramento devem estar localizados na planta do empreendimento podendo ser: *Poço de Montante* – A rede de monitoramento deve possuir um ou mais poços localizados à montante da instalação a ser monitorada; *Poço de Jusante* – devem ser instalados pelo menos três poços, não alinhados, à jusante da instalação, para avaliar possível independência desta na qualidade original da água subterrânea local (NBR 13895/1997).

Para descobrir se o vazamento atingiu a água subterrânea, esses poços podem ser checados manualmente, em intervalos periódicos, ou podem ser checados continuamente, através da instalação de sensores. Segundo a Lei 13.583 (GOIAS, 2000), de 11 de Janeiro de 2000, art 6º, inciso I, alínea c, todos os postos de combustíveis devem implantar no mínimo 3 poços de monitoramento, um à montante e dois à jusante, independente da profundidade do lençol freático.

### **III.3 – Teste de Estanqueidade**

Os testes de estanqueidade podem ser volumétricos ou não volumétricos. Para sua execução, o tanque poderá estar vazio ou cheio, de acordo com o método adotado. Conforme a NBR – projeto 9: 403.01-005, os testes devem ser capazes de detectar vazamentos de 0,5L/hora com 95% de possibilidade de acerto e máximo de 5% de probabilidade de alarme falso, considerando a compensação do coeficiente térmico de expansão do produto. Pela legislação norte-americana, o teste de estanqueidade deve ser capaz de detectar um vazamento de 0,3L/hora.

Os testes de estanqueidade devem ser executados por técnico qualificado, com Anotação de Responsabilidade Técnica – ART do executante do teste e com procedimentos padronizados compatíveis com a metodologia empregada, devendo estar disponíveis aos órgãos de fiscalização para fins de auditoria técnica. Alguns testes de estanqueidade requerem que todas as medições e todos os cálculos sejam feitos a mão, outros métodos são altamente automatizados: após o operador instalar o equipamento para aplicação do teste, um computador controla as medições e faz as análises.

### **III.4 – Controle de Estoque**

Para fazer um controle de estoque, verifica-se a quantidade de produto que foi entregue e a quantidade de combustível que foi vendida durante o mês, através de medições diárias do volume do tanque, tiradas com o auxílio de varetas de medição. Se o volume restante no tanque for diferente do resultado da subtração entre a quantidade entregue e a quantidade vendida, o tanque pode estar apresentando vazamento.

Essas medições diárias devem ser feitas pela manhã e à noite, ou depois de cada turno de trabalho, utilizando-se uma vareta de medição. Os dados devem ser anotados em formulário padrão. O nível indicado pela vareta de medição pode ser convertido para volume do produto do tanque. Além disso, devem ser anotadas diariamente as quantidades de produto que foram colocadas e retiradas do tanque.

Uma vez por mês, os dados obtidos a partir da vareta de medição devem ser confrontados com os dados de compra e venda para verificar se há falta de produto ou se há produto excedente. Se a quantidade de produto excedente ou se a falta de produto forem maiores ou iguais a 1% do volume total de produto que passou pelo tanque, o mesmo deverá estar apresentando vazamento.



O controle de estoque é um método prático e comumente usado, porque não requer o fechamento do tanque e pode ser feito pelo próprio proprietário ou operador do tanque. A precisão desse método pode ser otimizada pelo uso de uma pasta detectora de produto. Para que haja maior eficiência no controle de estoque, ele deve ser acompanhado por testes periódicos de estanqueidade do tanque. Além disso, deve ser feita uma medição semanal para identificar a presença de água na parte inferior do tanque. Em relação à vareta de medição, ela deve ser comprida o suficiente para atingir o fundo do tanque e deve ser marcada milimetricamente para que o nível do produto possa ser determinado com maior precisão. O tubo através do qual o produto é escoado para o tanque deve se estender até pelo menos 30 cm acima do fundo do tanque.

### **III.5 – Trocador de Óleo e Lavação de Veículos**

Embora a ABNT recomende a caixa separadora de óleo para os produtos imiscíveis em água, acredita-se que somente essa unidade em um sistema de tratamento não seja suficiente, em decorrência da existência de outros resíduos lançados juntamente com o óleo, durante a lavagem do veículo. O óleo proveniente do trocador deverá ser coletado através de um dispositivo para posterior transporte e rerefino por empresa autorizada e credenciada na ANP e no Órgão Ambiental competente.

Muitos órgãos ambientais brasileiros, a exemplo da CETESB, utilizam atualmente padrões baseados na Lista Holandesa 6530 (CETESB e GTZ, 2001). Neste documento são descritos valores distintos de qualidade de solos e águas subterrâneas, onde o valor de referência (S) indica um nível de qualidade que permite considerá-los “limpos”, admitindo a sua utilização para qualquer finalidade. Em águas subterrâneas o valor de referência para cada composto BTX é de 0,2 µg/L. No caso de solos estes valores podem variar de 0,01 a 0,05 mg/kg, de acordo com o teor de matéria orgânica no mesmo.

Os Padrões de Potabilidade de água são definidos pela portaria 518 do Ministério da Saúde (MINISTÉRIO DA SAUDE, 2004) onde são especificados os valores de 5, 170, 200 e 300 µg/L, para benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, respectivamente.

## **Capítulo IV - Remediação do Solo**

A remediação de áreas contaminadas tem por objetivo retirar e/ou atenuar a concentração do contaminante em solo ou água subterrânea, com o emprego de diversos métodos de engenharia, para que a concentração seja reduzida a limites pré-determinados na Avaliação de Risco a Saúde Humana ou nas leis vigentes.

### **IV.1. Contaminantes do Solo**

Conforme estabelece o Decreto n.º 28.687/82, art. 72, a poluição do solo e do subsolo consiste na deposição, disposição, descarga, infiltração, acumulação, injeção ou enterramento no solo ou no subsolo de substâncias ou produtos poluentes, em estado sólido, líquido ou gasoso. O solo é um recurso natural básico, constituindo um componente fundamental dos ecossistemas e dos ciclos naturais, um reservatório de água, um suporte essencial do sistema agrícola e um espaço para as atividades humanas e para os resíduos produzidos.

A degradação do solo pode ocorrer por meio da desertificação, uso de tecnologias inadequadas, falta de conservação, destruição da vegetação pelo desmatamento ou pelas queimadas. A contaminação dos solos dá-se principalmente por resíduos sólidos, líquidos e gasosos, águas contaminadas, efluentes sólidos e líquidos e efluentes provenientes de atividades agrícolas. Assim, pode-se concluir que a contaminação do solo ocorrerá sempre que houver adição de compostos ao solo, modificando suas características naturais e as suas utilizações, produzindo efeitos negativos. No quadro da tabela IV.1 podem-se ver alguns dos principais poluentes do solo e seus efeitos.

A preocupação com os processos de degradação do solo vem sendo crescente, à medida que se verifica que, para além da clássica desertificação por *secura*, outros processos conducentes aos mesmos resultados se têm instalado, devido à utilização de tecnologias inadequadas em culturas de sequeiro, falta de práticas de conservação de água no solo e destruição da cobertura vegetal.

Um dos principais fenômenos de degradação dos solos é a contaminação por resíduos sólidos, líquidos e gasosos provenientes de aglomerados urbanos e áreas industriais, águas contaminadas, efluentes sólidos e líquidos lançados diretamente sobre os solos e/ou a deposição de partículas sólidas (AMBIENTE BRASIL, 2008).

**Tabela IV.1 - Principais Poluentes do Solo**

Fonte Poluidora	Produto Químico	Efeitos
Inseticidas	DDT BHC	Câncer, danos no fígado, embriões e ovos de aves Câncer, danos a embriões
Solventes, produtos farmacêuticos e detergentes	Benzina	Dor de cabeça, náusea, perda de coordenação dos músculos, leucemia
Plásticos	Cloro Vinil	Câncer do fígado e do pulmão, atinge o sistema nervoso central
Herbicidas, incineração do lixo	Dioxina	Câncer, defeitos congênitos, doenças de pele
Componentes eletrônicos, fluidos hidráulicos, luzes fluorescentes	PCBs	Danos pele e ao sistema gastrintestinal; possíveis carcinógenos
Processamento de zinco, fertilizantes, baterias	Cádmio	Câncer em animais; danos ao fígado e aos rins

Fonte: Manual Global de Ecologia (Corson, 1993)

O processo de contaminação, pode então definir-se como a adição ao solo de compostos que, qualitativa e/ou quantitativamente, podem modificar as suas características naturais e utilizações, produzindo então efeitos negativos, constituindo poluição. Estando a contaminação do solo diretamente relacionada com os efluentes líquidos e sólidos lançados nele e com a deposição de partículas sólidas, independentemente da sua origem, salienta-se a imediata necessidade de controle destes poluentes, preservando e conservando a integridade natural dos meios receptores, como sendo os recursos hídricos, solos e atmosfera. Os produtos tóxicos, acumulando-se nos solos, podem permanecer ativos durante longos anos, dependendo da velocidade de degradação natural dos mesmos (AMBIENTE BRASIL, 2008).

Vazamentos em postos de combustíveis provocam graves problemas ao meio ambiente, principalmente com respeito à contaminação de águas subterrâneas. Carregado pela chuva, o material derramado pode contaminar o solo e a água, atingindo rios, lençóis freáticos e galerias pluviais. Considerando o vazamento de 10 mL por dia, durante um ano, estima-se que pode haver comprometimento de cerca de 3 milhões de litros de água. A extensão da contaminação depende da taxa do vazamento e das condições do local onde ocorre o vazamento (tipo do solo). Salienta-se ainda que a contaminação do solo e da água pode trazer graves consequências, inclusive riscos à saúde pública, principalmente em áreas urbanas. Como exemplos pode-se citar as cidades de Cascavel e Campo Largo (PR), que tiveram durante 2001 o abastecimento de água suspenso, devido à contaminação dos mananciais por postos de combustível (TIBURTIUS et al., 2004).

A preocupação com acidentes nos postos está aumentando no Brasil, onde as principais causas de vazamentos são: falha humana durante a descarga do combustível e defeitos na estrutura do tanque. O número de postos que apresentaram problemas varia de 20 a 30% no Brasil, sendo que na maioria dos casos, só se perceberam os vazamentos depois da descoberta dos seus efeitos. O maior problema da contaminação por gasolina está relacionado com os hidrocarbonetos aromáticos, dentre os quais se destacam o benzeno, o tolueno e os xilenos (BTX) e os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH), dos quais o fenantraceno e o antraceno são os mais simples. As propriedades físico-químicas dos principais contaminantes BTX e PAH são apresentadas na tabela IV.2, que mostra também que as substâncias com menor número de anéis aromáticos possuem menores ponto de ebulição.

**Tabela IV.2 – Propriedades Físico-Químicas dos BTX's e PAH's**

Nome do Composto	Fórmula	Massa Molecular	Forma e Cor	Densidade	Ponto de Fusão (°C)	Ponto de Ebulição (°C)
<b>BENZENO</b>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,11	LÍQ. INC.	0,879 (20/4)	5,5	80,1
<b>TOLUENO</b>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	92,13	LÍQ INC.	0,866 (20/4)	-95	110,8
<b>XILENO META</b>	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH) <sub>2</sub>	106,16	LÍQ INC.	0,867 (17/4)	-47,4	139,3
<b>XILENO ORTO</b>	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH) <sub>2</sub>	106,16	LÍQ INC.	0,881(20/4)	-25	144
<b>XILENO PARA</b>	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH) <sub>2</sub>	106,16	LÍQ INC.	0,861 (20/4)	13,2	138,5
<b>ACENAFTENO</b>	C <sub>10</sub> H <sub>6</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	154,20	ROMB. AL.	1,069 (95/95)	95	278 - 279
<b>ANTRACENO</b>	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	178,22	MON. AQ.	1,088 (113/4)	113(109)	319
<b>FENANTRENO</b>	<(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> CH) <sub>2</sub> >	178,22	PLAC.AL.	1,179 (25)	99 -100	340
<b>FLUORENO</b>	(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> > CH <sub>2</sub>	166,21	CRIST. AL.	1,203 (0/4)	115 - 116	293 - 295
<b>NAFTALENO</b>	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128,16	PLAC. AL.	1,145 (20/4)	80,2	217,9
<b>PIRENO</b>	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202,24	AMAR.PRISM.	1,277 (0/4)	149 - 150	> 360

### IV.1.1. Contaminantes BTX

Os compostos aromáticos (BTX e outros alquilbenzenos) perfazem cerca de 10 a 59% da gasolina (massa/massa), enquanto que os hidrocarbonetos alifáticos compreendem 41 a 62%. Os hidrocarbonetos aromáticos são geralmente mais tóxicos que os compostos alifáticos com o mesmo número de carbonos e possuem maior mobilidade em água, em função da sua solubilidade em água ser da ordem de 3 a 5 vezes maior. Hidrocarbonetos aromáticos têm também maior mobilidade em sistemas solo-água, característica que pode ser representada significativamente pelo menor coeficiente de partição entre octanol-água (Tabela IV.3). Um menor coeficiente de partição implica em uma lenta absorção no solo e, conseqüentemente,

um transporte preferencial *via* água. Além de migrarem mais rapidamente através das águas atingindo mananciais de abastecimento, os compostos aromáticos apresentam uma toxicidade crônica mais significativa do que os hidrocarbonetos alifáticos (TIBURTIUS et al., 2004).

**Tabela IV.3 - Parâmetros Físico-Químicos de importância para a Mobilidade de Hidrocarbonetos (TIBURTIUS et al., 2004)**

Composto	Solubilidade em Água (mg/L)	Log K <sub>ow</sub>
<b>Benzeno</b>	1760	2,12
<b>Tolueno</b>	532	2,73
<b>Xileno</b>	163-185	2,95-3,26
<b>Nonano</b>	0,122	4,67
<b>Decano</b>	0,021	6,69
<b>Dodecano</b>	0,005	7,24

K<sub>ow</sub>: Coeficiente de Partição Octanol-Água

As experiências têm demonstrado que diferentes formulações na gasolina podem afetar o destino e transporte dos BTXs. O uso do etanol como ingrediente na formulação da gasolina tem aumentado mundialmente, com o intuito de minimizar a poluição atmosférica oriunda da combustão. No Brasil, por exemplo, a gasolina é aditivada com aproximadamente (20-25%) de etanol (FERNANDES et al., 2002 apud TIBURTIUS, 2004), fato que aumenta consideravelmente a probabilidade de contaminação de águas subterrâneas por BTX. O etanol é completamente miscível em água o que faz com que, por efeito de co-solvente, aumente a solubilização e migração de BTX (CORSEUIL et al., 1998 apud TIBURTIUS, 2004).

O caráter tóxico do benzeno está relacionado diretamente com o seu potencial carcinogênico e mutagênico. Investigações ocupacionais em diferentes indústrias mostram que o benzeno desempenha um indubitável papel de risco aos humanos. Os resultados sobre a poluição de aromáticos no ar, destacam que os hidrocarbonetos aromáticos provocam danos à saúde, principalmente devido à toxicidade e/ou mutagenicidade ou carcinogenicidade do BTX. A inalação de tolueno ou xilenos pode induzir distúrbios no modo de falar, na visão, na audição, no controle dos músculos dentre outros, além de possível associação com o surgimento de tumores cerebrais (TIBURTIUS et al., 2004).

A "International Agency for Research on Cancer" (Agência Internacional de Pesquisa de Câncer, da Organização Mundial da Saúde, com sede em Lyon, França) e o "National Institute for Occupational Safety and Health" (Agência Norte-Americana de Saúde e Segurança Ocupacional) incluem o benzeno em suas listas de produtos cancerígenos. Dentre os cânceres, as leucemias são as mais frequentes e, dentre elas, as mais comuns são as agudas. No Brasil, a

ação cancerígena do benzeno foi também reconhecida oficialmente a partir de 1994, pela portaria da Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho (SSST nº3), de 10 de março de 1994. A sua capacidade de provocar danos cromossômicos e à medula óssea já foram amplamente demonstradas em seres humanos e animais. Também foram observadas alterações cromossômicas numéricas e estruturais em linfócitos e células da medula óssea de trabalhadores expostos ao benzeno (MTE, 2002 apud TIBURTIUS et al., 2004).

Os efeitos tóxicos das marés negras sobre a fauna marinha, incluem os efeitos danosos do benzeno, tolueno e xilenos ao organismo humano e de outros seres vivos. As doses tóxicas são de 10 a 90 ppm para o benzeno e 4 a 5 ppm para o naftaleno. Estes poluentes influenciam sistemas endócrinos e enzimáticos, além de que os hidrocarbonetos ingeridos por organismos marinhos passam através da parede intestinal e se tornam parte da reserva lipídica. Quando dissolvidos no tecido adiposo, os hidrocarbonetos são preservados, porque estão protegidos do ataque microbiano, podendo ser transferidos da presa para o predador e, eventualmente, ao homem. A exposição prolongada a concentrações subletais de poluentes pode tornar o organismo mais susceptível às doenças. Aparecimento de tumores, alterações genéticas e leucemias são algumas conseqüências clínicas da intoxicação por hidrocarbonetos.

Quando hidrocarbonetos aromáticos são incorporados pela flora e fauna, ligam-se às moléculas protéicas e ao tecido gorduroso, sendo transferidos através da cadeia alimentar sem alterações da estrutura. Muitos seres expõem-se à contaminação por hidrocarbonetos derivados do petróleo por ingestão de cadáveres, ou de outros animais ou plantas que tenham acumulado hidrocarbonetos no seu organismo, em quantidades insuficientes para causar lesão. Isto traz sérias implicações para a pesca e a saúde pública (FMV, 2002 apud TIBURTIUS, 2004).

Em função destes fatores a legislação ambiental tem se tornado cada vez mais restritiva. A Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (EPA), por exemplo, estabelece os limites máximos para a concentração do benzeno em 5 µg/g em água potável. No Brasil, a portaria nº1469/2000 do Ministério da Saúde determina que os limites máximos permitidos para benzeno, tolueno e xilenos são de 5, 170 e 300 µg/L, respectivamente, para que a água seja considerada potável.

#### **IV.1.2. Contaminantes PAH**

Os PAH's (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) são compostos oriundos do diesel e de óleos lubrificantes que possuem cadeias mais longas, o que contribui para menor mobilidade e solubilidade em água, quando comparados à gasolina.

Os PAH's são compostos mutagênicos e carcinogênicos aos humanos e aos animais, que são introduzidos no ambiente em grandes quantidades devido às atividades relacionadas à extração, ao transporte, ao refino, à transformação e à utilização do petróleo e de seus derivados. Apesar disso, a grande maioria dos microrganismos do solo não possui a capacidade de degradá-los, o que resulta na sua acumulação no ambiente e na consequente contaminação dos ecossistemas.

Os PAH's são substâncias formadas tanto por fontes naturais como por fontes antrópicas, sendo que as atividades antrópicas são as principais responsáveis pela sua presença no meio ambiente. As fontes naturais são consequência da síntese por bactérias, plantas e fungos, além das combustões (incêndios florestais ou emissões vulcânicas). As fontes antrópicas podem ser tanto pirolíticas (queima de combustíveis fósseis e incineração de lixo, por ex.) como petrogênicas (óleos crus contêm 0,2 a 7% de PAH, por ex.). No Brasil as fontes petrogênicas são tão importantes quanto às pirolíticas, devido à intensa extração de óleo cru e à produção de gasolina e diesel nas refinarias. Além disso, um grande número de tanques de postos de gasolina do País apresenta ou já apresentou vazamentos, resultando em depósitos de PAH de origem petrogênica para os corpos aquáticos (ALMEIDA et al., 2007).

O grupo dos PAH's consiste de compostos com dois ou mais anéis aromáticos fundidos e que podem ser divididos em dois subgrupos: compostos de baixo peso molecular, formados por 2 e 3 anéis aromáticos fundidos (antraceno, acenafteno, acenaftaleno, fluoreno, naftaleno e fenantreno), e os de alto peso molecular com 4, 5 e 6 anéis fundidos (pireno, fluoranteno, benzo(a)antraceno, benzo(g,h,i)perileno). A persistência dos PAH no meio ambiente varia com a sua massa molecular, sendo os de baixa massa molecular degradados mais facilmente (tempo médio no sedimento de 9 a 43 dias para o naftaleno e antraceno, respectivamente), enquanto os de alta massa molecular são mais persistentes (valores de tempo médio em solos e sedimentos atingem alguns anos) (ALMEIDA et al., 2007).

De acordo com as indicações da EPA foram quantificados 16 tipos de PAH: Naftaleno, Fenantreno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Acenaftaleno, Antraceno, Criseno, Inde-

no(1,2,3c,d)pireno, Acenafteno, Fluoranteno, Benzo(b)fluoranteno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fluoreno, Pireno, Benzo(k)fluoranteno e Benzo(g,h,i)perileno.

### **IV.1.3. Compostos Orgânicos Voláteis e Semivoláteis**

Os Compostos Orgânicos Voláteis (VOC em inglês) são compostos que têm baixa solubilidade em água e uma elevada pressão de vapor sob condições normais, de modo a se vaporizar significativamente e entrar na atmosfera. Os VOCs são componentes frequentemente encontrados em combustíveis de petróleo, fluidos hidráulicos, diluentes de tintas e agentes de limpeza a seco. Uma grande variedade de moléculas a base de carbono, tais como aldeídos, cetonas, e outros hidrocarbonetos leves são VOCs. Os VOCs são emitidos como gases por determinados sólidos ou líquidos e estão presentes numa variedade de produtos químicos, alguns dos quais podem ter efeitos adversos para a saúde a curto e a longo prazo (IAQ, 2009). Os VOCs são contaminantes comuns de águas subterrâneas. O termo VOC é frequentemente utilizado no contexto legal ou regulatório onde a definição precisa depende da lei. Tais definições podem ser contraditórias e conter imprecisões e omissões. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) define VOC como qualquer composto orgânico que participa numa fotoreação; alguns acreditam que esta definição é muito abrangente e vaga pois compostos orgânicos não voláteis (no sentido de vaporizar sob condições normais) podem ser considerados voláteis por esta definição da EPA. O termo pode se referir tanto para compostos orgânicos bem caracterizados quanto para misturas de composição variada.

Os Compostos Orgânicos Semivoláteis (SVOCs) são compostos que apresentam uma pressão de vapor menor do que a dos VOCs e, portanto, são liberados como gás muito mais lentamente. Eles são suscetíveis de serem transferidos para os seres humanos por contato, por poeiras e por ingestão. Enquanto os VOCs tendem a serem emitidos rapidamente nas primeiras horas ou dias após a instalação de um produto, os SVOCs são liberados ao longo de um período de tempo maior.

Os SVOCs têm um ponto de ebulição superior ao da água e podem se vaporizar quando expostos a temperaturas maiores que a temperatura ambiente (O'NEILL, 2009). Algumas fontes de SVOCs são indústrias de plásticos, produtos farmacêuticos e de pesticidas, e também a combustão incompleta de combustíveis fósseis, como por exemplo, o benzo(a)pireno. SVOCs estão numa variedade de produtos químicos, que podem ter efeitos adversos para a saúde a curto e longo prazo. Muitos são suspeitos de causar câncer no ser humano e alguns são conhecidos por serem cancerígenos em animais e seres humanos.



A lista das famílias químicas dos VOCs e SVOCs pode ser vista na página do Environmental Working Group (EWG, 2009), bem como os seus efeitos relacionados com a saúde das pessoas: câncer, nascimentos e desenvolvimentos afetados, danos ao cérebro e ao sistema nervoso, efeitos no sistema reprodutivo e na fertilidade, bem como no sistema imunológico, aumentando a sensibilidade a alergias.

## **IV.2. Técnicas de Remediação**

A remediação de áreas comprovadamente contaminadas visa, na engenharia sanitária ou na engenharia ambiental, a retirar e/ou atenuar a concentração do contaminante em solo ou água subterrânea, a partir de diversos métodos, para que a concentração fique abaixo dos limites determinados em lei ou norma aplicável do CONAMA.

Os processos de remediação se classificam em dois grupos: Processos Biológicos e Processos Físico-Químicos. Existem várias opções de técnicas dentro de cada grupo, com indicações específicas para cada caso. Vamos apresentar resumidamente os métodos de: Biorremediação, Remediação Natural, Biopilhas, Extração Multifásica (*MPE*), Bombeamento e Tratamento das Águas Subterrâneas (*Pump and Treat*), Barreira Hidráulica, *Air Stripping*, Extração de Vapores do Solo (*SVE*), Injeção de Ar (*Air Sparging*), Dessorção Térmica em Baixas Temperaturas, Oxidação Catalítica, Fotólise, Ozônio/UV, Fotocatálise Heterogênea e Oxidação Química “*in Situ*” (*ISCR*).

### **IV.2.1. Processos Biológicos**

#### **a) Biorremediação**

A Biorremediação promove a remediação de uma área impactada através de técnicas naturais, utilizando microorganismos (bactérias, fungos e leveduras) para degradar substâncias ou compostos perigosos aos seres humanos e transformá-los em substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade.

A Biorremediação é o processo mais utilizado na degradação de BTX. Este processo fundamenta-se na oxidação biológica por microorganismos, decompondo a matéria orgânica em substâncias mais simples como  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (ou  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ ), com custos relativamente baixos. A capacidade de certos microorganismos para degradar substâncias orgânicas tóxicas é um fato bem documentado. Pesquisas desenvolvidas em regiões frias ou temperadas mostraram que diversos grupos de bactérias e fungos têm habilidade para degradar componentes do petróleo. A complexidade dos processos metabólicos necessários a essa degradação leva à

formação de consórcios de bactérias, com bactérias de diferentes gêneros e espécies, cada uma delas específica em degradar uma ou várias frações do óleo derramado. A grande motivação de todos os pesquisadores envolvidos em estudos de biodegradação é, sem dúvida, a busca de microorganismos versáteis capazes de degradarem, de maneira eficiente, uma grande variedade de poluentes com baixo custo operacional (TECNOHIDRO, 2008).

O benzeno é um hidrocarboneto aromático mais difíceis de degradação sob condições anóxicas. O deslocamento da nuvem de elétrons estabiliza as ligações carbono-carbono, tornando o benzeno altamente resistente ao ataque. Embora um grande número de artigos relate a degradação anaeróbia de outros hidrocarbonetos aromáticos, dentre eles o tolueno e os xilenos, muitas investigações descrevem o benzeno como recalcitrante (TECNOHIDRO, 2008).

Estudos sobre a biodegradação de poluentes voláteis – como benzeno, tolueno e xilenos – em reatores seqüenciais anóxicos/microaeróbios mostram que tolueno e p-xilenos são tratáveis sob condições anóxicas (nitrificação), enquanto benzeno, *orto* e *para*-xilenos somente são biodegradáveis sob condições microaeróbias (TECNOHIDRO, 2008).

A contaminação de lençóis aquíferos causada por tanques subterrâneos de estocagem de gasolina tem sido uma preocupação mundial. Para aumentar as dificuldades, diferentes compostos oxigenados são adicionados à gasolina, com o objetivo de diminuir a emissão de monóxido de carbono. A presença de espécies como etanol e metil-terc-butil éter (MTBE) costumam dificultar, de maneira significativa, a biorremediação dos resíduos, em função da sua baixa biodegradabilidade.

A biodegradação de BTX em sistemas aeróbios e anaeróbios foi investigada, com respeito à presença de etanol na gasolina, por Corseuil et al. (1996). Os estudos demonstraram que em condições aeróbias o etanol retarda a biodegradação de BTX, devido à utilização preferencial de etanol pelos microorganismos. O benzeno mostra-se recalcitrante em condições de nitrificação, sulfonogênicas e metanogênicas, em um período de 99 dias de incubação. Este fato é particularmente importante, já que benzeno é o mais tóxico dos BTXs.

A Biorremediação pode ser utilizada para descontaminar tanto o solo quanto a água, e se enquadra em duas grandes categorias: *in situ* e *ex-situ*. Na remediação *in situ*, o tratamento do solo ou da água subterrânea contaminada é feito no próprio local. O tratamento é mais eficaz em solos permeáveis, como os arenosos. As medidas biocorretivas *ex-situ* consistem em escavar o solo contaminado ou extrair a água subterrânea por bomba para aplicar o tratamento em outro local. As medidas *ex-situ* apresentam uma maior versatilidade para o tratamento de

grande número de contaminantes e tipos de solo. A figura IV.1 apresenta um esquema do Sistema de Biorremediação.

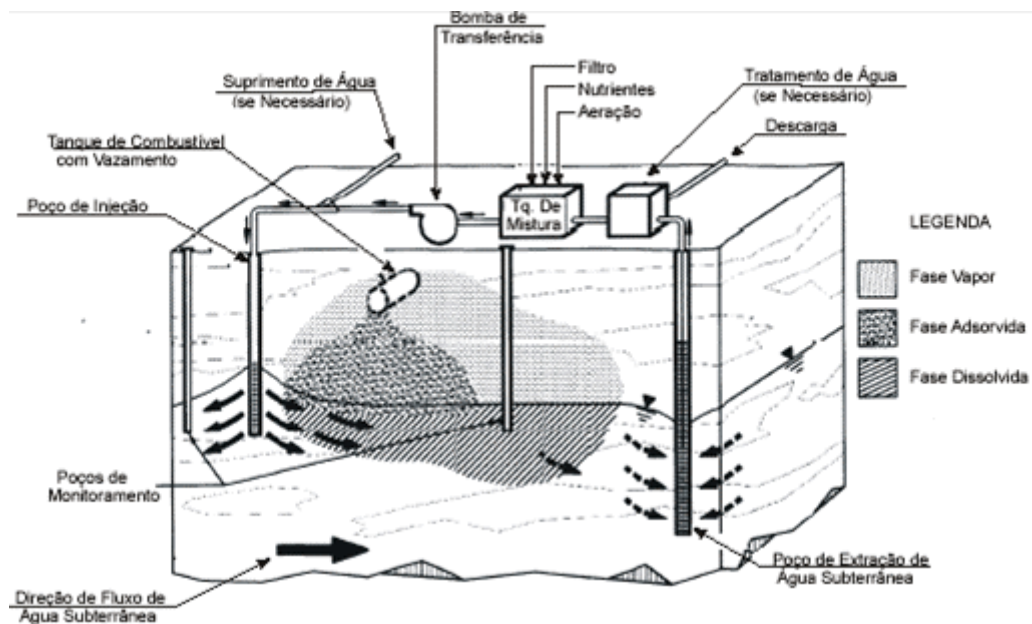


Figura IV.1 - Sistema de Biorremediação (TECNOHYDRO, 2008).

## b) Biopilhas

As Biopilhas são utilizadas para reduzir concentrações de hidrocarbonetos de petróleo presentes no solo através da biodegradação. Essa técnica *ex-situ* que envolve a disposição do material contaminado em pilhas e a estimulação da atividade aeróbica microbiana através de aeração e/ou adição de nutrientes e aumento da umidade do solo. O aumento da atividade microbiana resulta na degradação do produto de petróleo adsorvido através da respiração microbiana, reduzindo as concentrações desses contaminantes.

As Biopilhas são eficientes na redução da concentração da maioria dos produtos derivados de petróleo. Os produtos mais leves (mais voláteis) de petróleo como gasolinas, tendem a ser removidos por evaporação durante o processo de aeração e são menos degradáveis pela respiração microbiana. Os produtos de cadeia média, como diesel e querosene, possuem uma biodegradação mais significativa do que a evaporação. Elas são eficientes por destruir os contaminantes, promovendo uma redução na toxicidade, e por ser um sistema relativamente simples de se implantar (TECNOHYDRO, 2008).

As Biopilhas são tipicamente construídas sobre uma base impermeável para reduzir o potencial de migração do lixiviado para a subsuperfície. São cobertas com uma membrana impermeável para prevenir a liberação de contaminantes e/ou solo contaminado para o ambiente, e para proteger o solo de ventos e chuvas.

O tratamento por Biopilhas é controlado por processos biológicos onde contaminantes biodegradáveis são convertidos em seus constituintes minerais básicos (água e dióxido de carbono) sob condições aeróbias. O solo é escavado, preparado, colocado em pilhas e aerado para promover a biodegradação. Na maioria dos casos, a biodegradação é conseguida por microorganismos endógenos e a eficiência máxima de degradação depende da quantidade de água, do pH, da aeração, da temperatura e da fração de carbono/nitrogênio.

Para a implantação do sistema de Biopilhas, é necessário realizar a preparação do local, a preparação da base, a coleta do lixiviado, a aeração, a adição de água, a adição de nutrientes, a correção microbiológica e a construção da pilha. A figura IV.2 apresenta um esquema do Sistema de Biopilha.

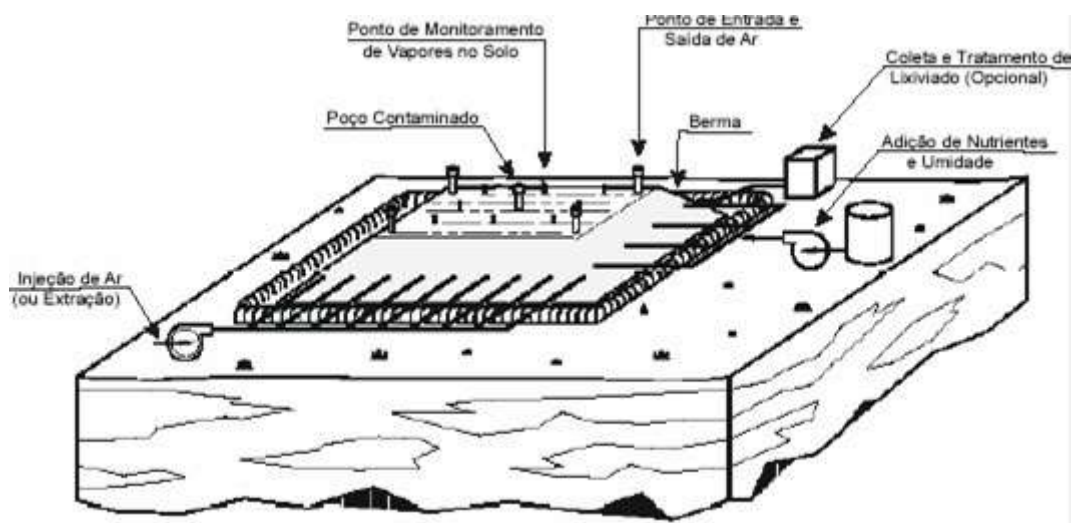


Figura IV.2 - Sistema de Biopilhas (TECNOHYDRO, 2008).

### c) Remediação Natural (Atenuação Natural)

Uma nova abordagem para a descontaminação de solos e águas subterrâneas, chamada de Remediação Natural, vem ganhando aceitação nos últimos anos, principalmente em locais contaminados por derramamentos de derivados de petróleo. A Atenuação Natural refere-se aos processos físicos, químicos e biológicos que facilitam a remediação natural. Este processo limita bastante o deslocamento dos contaminantes e, portanto, reduz a extensão da contaminação do meio ambiente (TIBURTIUS et al., 2004).

O princípio desta tecnologia é fazer uso de processos naturais para degradar os contaminantes e reduzir suas concentrações a níveis aceitáveis. Os processos empregados são a diluição, volatilização, biodegradação, adsorção e reações químicas com os materiais presentes

na subsuperfície. Os grupos alvo de contaminantes da atenuação natural são os compostos orgânicos voláteis (VOC) não halogenados, os SVOC's e combustíveis derivados de petróleo.

Um estudo constata que a adição do nitrato para a estimulação de um consórcio de microorganismos endógenos na degradação de BTX, efetivamente eleva a concentração de microorganismos, fato que facilita a biorremediação dos poluentes (TIBURTIUS et al., 2004).

A Atenuação Natural não é uma tecnologia que age sozinha, sem monitoramento ou acompanhamento e requer modelagem da evolução dos contaminantes, taxas de degradação e refinamento dos modelos de exposição. Amostragens e análises químicas devem ser realizadas durante o processo, para verificar se a taxa de degradação está condizente com as metas de remediação.

Dados para a modelagem, amostragens e análises químicas são necessários para justificar e monitorar a atenuação natural. A extensão da degradação depende de vários parâmetros como: tipos e concentrações de contaminantes, umidade, nutrientes disponíveis, oxigênio presente, dentre outros.

A biorremediação natural tem tido grande progresso na América do Norte e Europa. Apesar disto, as experiências demonstram que a adequação deste método no Brasil precisa de muito cuidado, em decorrência da presença de etanol como constituinte da gasolina. Estudos para avaliar a atenuação natural em derramamentos de gasolina contendo etanol, diesel puro e diesel com etanol estão sendo realizados na Fazenda Experimental da Ressecada, em Florianópolis-SC. Os resultados demonstraram que a atenuação reduz o potencial de contaminação dos locais onde ocorreram derramamentos de gasolina, principalmente pelo efeito de degradação biológica, que transforma espécies poluentes em compostos inócuos à saúde humana. Contudo, as plumas de contaminação desapareceram somente após 1000 dias de tratamento (TIBURTIUS et al., 2004).

## **IV.2.2. Processos Físicos e Químicos**

### **a) Extração Multifásica (MPE)**

O Sistema de Extração Multifásica combina as técnicas de bioventilação e remoção de massa a vácuo, possibilitando a extração das fases livre, vapor e dissolvida na matriz do solo e estimulando o processo de biodegradação natural na zona não saturada (TECNOHIDRO, 2008).

A Extração Multifásica ocorre por meio da instalação de um sistema de ventilação a vácuo em poços de extração distribuídos na área de interesse, visando criar uma zona de influência do sistema em toda a extensão da pluma de contaminação.

Através da aplicação do vácuo nos poços de extração cria-se um gradiente de pressão dirigido para estes pontos, de onde são extraídas as fases livre, vapor e dissolvida do contaminante. O gradiente de pressão é diretamente proporcional ao vácuo aplicado, logo a eficiência na extração das diferentes fases do contaminante será função do sistema a ser implantado. A mistura bombeada deve ser direcionada para uma caixa separadora de água e óleo, com o combustível recuperado armazenado em tambores e a água contaminada destinada para tratamento em filtro de carvão ativado para posterior reinjeção. O vapor extraído é direcionado para um sistema de carvão ativado e lançado na atmosfera. O sistema possui um dispositivo de auto-operação a partir de *timers*, que devem ser ajustados para intervalos de tempo de operação que otimizem a extração do contaminante da zona não saturada.

No Sistema de Extração Multifásica promove-se o acompanhamento do desempenho de extração da fase livre e da fase vapor na área em estudo, tomando como base a velocidade de extração, a vazão e volume de água, a pressão, o VOC, o pH, o potencial de oxiredução, a condutividade, o volume recuperado de fase livre, o nível d'água dos poços de monitoramento e a espessura de fase livre.



**Figura IV.3 – Equipamento usado no Sistema de MPE (GEOESFERA AMBIENTAL, 2009)**

Esta técnica é mais utilizada na remediação de hidrocarbonetos do petróleo e promove a extração simultânea dos combustíveis (gasolina, diesel e etc.), dos VOC's presentes na zona não saturada do solo e também da fase dissolvida nas águas subterrâneas. A extração multifásica tem um efeito secundário na área contaminada, uma vez que a extração a vácuo promove uma circulação de ar forçada na zona não saturada do solo, estimulando por sua vez as ativi-

dades bacterianas aeróbias (Processo de Biorremediação). A figura IV.3 apresenta um equipamento usado no Sistema MPE.



**Figura IV.4 - Sistema de MPE Móvel**

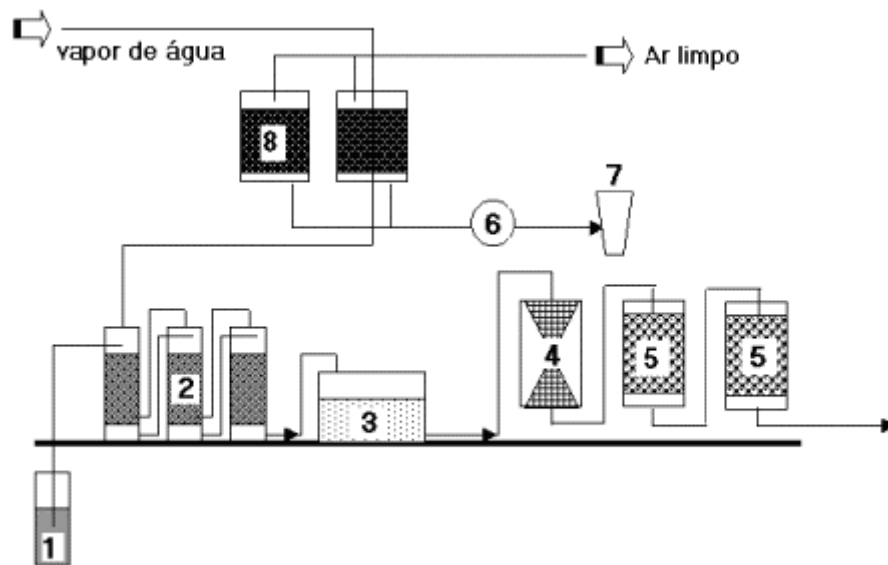
Existe uma variante da técnica, mais barata e mais simplificada, chamada de MPE Móvel, onde não se precisa de cortes no pavimento, sendo bombeados individualmente os pontos contaminados para um mini sistema. Este sistema é usado quando a pluma de contaminação esta concentrada numa pequena área. A figura IV.4 apresenta um Sistema MPE móvel.

#### **b) Bombeamento e Tratamento das Águas Subterrâneas (*Pump and Treat*)**

Os sistemas de Contenção Hidráulica Convencional (*Pump and Treat*) são ainda utilizados na maioria dos sítios contaminados. Apesar da necessidade de remover grandes volumes de água do subsolo de forma a extrair os contaminantes, essa metodologia pode ser uma medida eficiente de remediação, em certas condições, devido às lentas taxas de dessorção e dissolução dos compostos. O uso de tecnologias alternativas poderá, de fato, melhorar o desempenho do sistema e reduzir o custo total do projeto de remediação, o que vem se tornando uma prática cada vez mais comum em projetos de reabilitação de aquíferos (NOBRE & NOBRE, 2003).

Neste procedimento, a água contaminada por poluentes orgânicos é retirada por bombeamento, submetida a um processo de remoção de poluentes e descarregada, às vezes, de volta ao reservatório natural. Utilizam-se sistemas providos de bombas, elétricas ou pneumáticas, para captação das águas subterrâneas contaminadas que receberão depois o tratamento adequado para os compostos de interesse. O bombeamento e tratamento também podem ser utilizados como espécie de barreira de contenção (linha de poços de bombeamento conhecida

como barreira hidráulica, descrito posteriormente), que altera as condições hidrológicas do local e impedindo que a contaminação siga o fluxo subterrâneo natural.



**Figura IV.5 - Esquema do Processo de Recuperação de Água Subterrânea: 1. Poço de retirada da água, 2. Coluna de "stripping", 3. Biorreator, 4. Filtro de cascalho, 5. Filtro de carvão ativado (úmido), 6. Condensador, 7. Separador, 8. Filtro de carvão ativado. (TIBURTIUS et al., 2004).**

O insucesso de sistemas *Pump and Treat* em muitos sítios não decorre apenas de limitações técnicas ou da complexidade do sítio. É resultado de uma caracterização preliminar insuficiente ou inadequada do problema. Sistemas de bombeamento de águas subterrâneas bem executados podem ser uma parte importante do programa e, quando implementados, podem controlar a migração da pluma para regiões mais afastadas, permitindo a remoção de fontes secundárias da contaminação. Adicionalmente, o uso de tecnologias de remediação alternativas requer, na maioria dos casos, a implantação preliminar de um sistema efetivo de controle hidráulico. A figura IV.5 apresenta um Sistema de *Pump and Treat*.

### c) Barreira Hidráulica (Bombeamento)

Barreira Hidráulica é um sistema de contenção hidráulica composto por poços de extração de água subterrânea. Esses estão situados na região compreendida pela água subterrânea contaminada, de tal forma que o cone de rebaixamento do nível freático originário do processo de extração atinja toda a extensão da pluma e inverta o fluxo local, evitando assim que ela continue a ser transportada na direção geral de fluxo da água subterrânea (TECNO-HIDRO, 2008).



A aplicação do vácuo nos poços de extração cria um gradiente de pressão dirigido para os pontos nos quais a água subterrânea é extraída. O gradiente de pressão é diretamente proporcional ao vácuo aplicado. Assim, a eficiência na extração das diferentes fases do contaminante será função do sistema a ser implantado (TIBURTIUS et al., 2004).

#### **d) *Air Stripping***

O processo físico de transferência de massa é considerado uma boa tecnologia para tratar de muitos compostos orgânicos voláteis, presentes na água subterrânea contaminada. O sistema utiliza ar relativamente limpo para remover VOC's dissolvidos na água, transferindo-os para a fase gasosa. Uma configuração convencional de “*Air Stripping*” utilizado no tratamento de água subterrânea é a coluna de *Stripping*. Nesta configuração, a água subterrânea contaminada é bombeada para o topo de uma coluna e, simultaneamente, ar limpo é soprado na base da mesma. O fluxo de ar promove transferência de meio, a água é distribuída no topo e, posteriormente, desce por gravidade. O fluxo de ar locado na base da coluna sobe por anéis que promovem o *stripping* no interior da coluna (TECNOHIDRO, 2008).

O processo de transferência de massa depende das características físico-químicas de cada contaminante, da temperatura da água, da taxa de ar/água, da superfície de contato ar/água na coluna e do fator de empacotamento dos anéis na coluna. Como a aplicação de um sistema *Air Stripping* depende em grande parte das características dos contaminantes a serem tratados, é mais indicado para tratamentos de VOC's e compostos com concentração inferiores a 200mg/l (TECNOHIDRO, 2008). Os parâmetros que têm importância significativa no desempenho do sistema são as vazões de bombeamento, o fluxo de ar injetado na coluna e a concentração de contaminantes.

Embora eficiente, o processo apresenta serias limitações, principalmente relacionadas com o seu caráter não destrutivo. A remoção de voláteis por "*Air Stripping*" implica na liberação de gases poluentes para a atmosfera e apresenta baixa eficiência para a remoção de espécies de caráter fenólico, usualmente de maior solubilidade em água. Adicionalmente, a necessidade de associar diversas tecnologias de tratamento faz com que o processo se torne demorado e dispendioso, principalmente pela complexidade das instalações.

#### **e) *Soil Vapor Extraction (SVE)***

O Sistema de Extração de Vapores no Solo (SVE) é uma tecnologia de remediação aplicada para zonas não saturadas, onde se usa vácuo com o objetivo de induzir o fluxo contro-

lado de ar e assim remover contaminantes voláteis e semivoláteis do solo. Em seguida, o gás retirado deve passar por uma estação de tratamentos de vapores. Extrações verticais são utilizadas em profundidades que variam de 1,5 a 90 metros. Extrações horizontais (instaladas em trincheiras ou furos horizontais) podem ser instaladas como garantia, dependendo da geometria da pluma e de outras especificidades (TECNOHIDRO, 2008).

O rebaixamento do lençol freático pode ser utilizado para reduzir a elevação do nível d'água no poço induzido pelo vácuo ou aumentar a faixa de zona não saturada. A injeção de ar é efetiva para facilitar a extração em contaminações profundas, em baixas permeabilidades e em zona saturada.

O grupo alvo de contaminantes do SVE são os VOC's e alguns combustíveis. A tecnologia é aplicada somente para compostos voláteis com a constante da Lei de Henry acima de 0.01 Pa ou pressão de vapor maior que 0.5 mm Hg (0.02 polegadas de Hg). Outros fatores, como umidade e quantidade de matéria orgânica, afetam a permeabilidade de ar no solo e por consequência a eficiência do sistema. O processo envolve o fluxo contínuo de ar no solo que promove a biodegradação *in situ* dos compostos de baixa volatilidade, que podem estar presentes. Vários fatores podem limitar a aplicabilidade e eficiência do processo, tais como:

- Solos compactos ou com mais de 50% de umidade requerem muito vácuo, aumentando custos e/ou impedindo a operação do SVE;

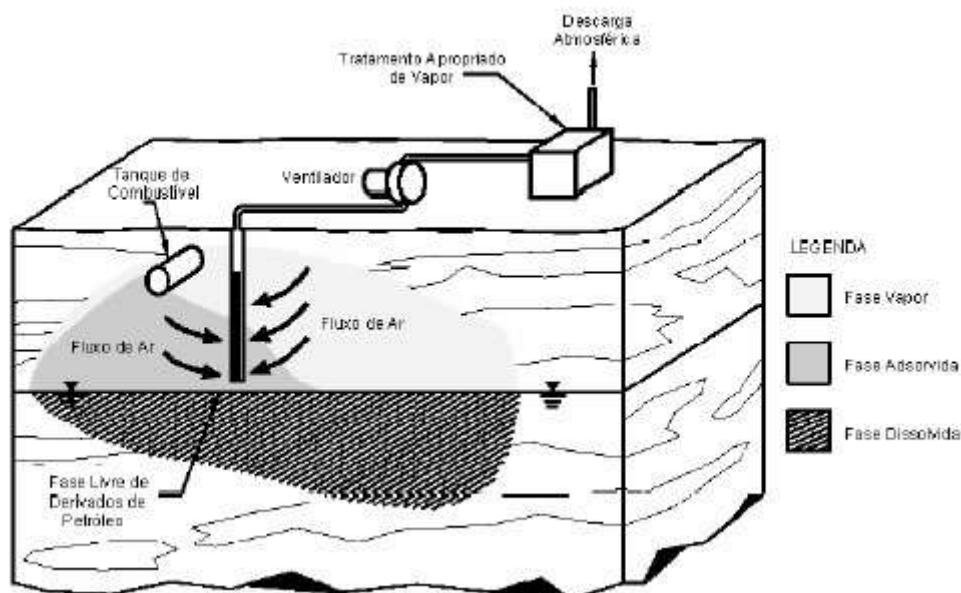


Figura IV.6 - Sistema de Extração de Vapores (SVE) (TECNOHYDRO, 2008).

- Solos com alto índice de matéria orgânica ou extremamente secos apresentam alta capacidade de absorção de VOC's, o que resulta em redução das taxas de remoção;

- O controle da emissão gasosa pode ser necessário para eliminar possíveis danos ao público e ao meio ambiente;
- O resultado da produção de efluentes gasosos, líquidos residuais e resíduos, poderá requerer tratamento com carvão ativado;
- SVE não é efetivo em zona saturada, porém pode-se conjuga-lo com o rebaixamento do lençol freático para ocorrer maior exposição da zona não saturada.

Os dados necessários incluem a profundidade e a área de extensão da contaminação, a concentração de contaminantes, a profundidade do nível d'água, o tipo de solo e as propriedades do mesmo (estrutura, textura, permeabilidade e umidade). Testes-piloto devem ser realizados para obter informações da pluma, incluindo raio de influência dos poços de extração, taxas de fluxo de gás, vácuo ótimo aplicado e taxas de remoção de contaminantes. A figura IV.6 ilustra um típico Sistema de Extração de Vapores.

#### **f) Injeção de Ar (*Air Sparging*)**

É uma tecnologia *in situ*, que introduz ar no aquífero contaminado para produzir borbulhamento na água. As bolhas de ar são atravessadas horizontalmente e verticalmente pela coluna de solo, criando uma aeração que remove os contaminantes por volatilização. Tem-se notado que o tempo necessário para aumentar o nível de oxigênio dissolvido depende da difusão de oxigênio nos arredores dos canais de ar. Deve existir um bom controle da evolução das mudanças de oxigênio dissolvido nos poços de monitoramento após o início do processo (TECNOHIDRO, 2008).

Na maioria das situações naturais, a biodegradação aeróbica de compostos biodegradáveis na zona saturada é limitada pela taxa de oxigênio disponível. Concentrações típicas de oxigênio dissolvido em águas subterrâneas não contaminadas são inferiores a 4,0 mg/l; em condições de aplicação do "*Biosparging*" a taxa eleva-se para 6,0 a 10 mg/l em condições de equilíbrio. Este incremento nos níveis de oxigênio dissolvido contribui para o aumento da taxa de biodegradabilidade aeróbica na zona saturada.

O "*Air Sparging*" normalmente é utilizado em conjunto com o Sistema de Extração de Vapores, para onde os contaminantes são carregados. Esta tecnologia opera com altas taxas de fluxo de ar, a fim de se manter contato constante entre a água e o solo e propiciar maior aeração da água subterrânea. Os grupos-alvo de contaminantes do "*Air Sparging*" são VOC's e combustíveis derivados de petróleo.

Os fatores que podem limitar a aplicabilidade e eficiência do processo são:

- Profundidade da contaminação e do nível d'água local;
- Tipos litológicos pouco permeáveis;
- A injeção de ar deve ser projetada para condições específicas;
- O fluxo de ar através da zona não saturada pode não ser uniforme, reduzindo o desempenho da técnica.

As principais características que determinam a eficiência do método são a permeabilidade gasosa na zona não saturada, taxa de fluxo d'água, permeabilidade do aquífero, volatilidade do contaminante e a sua solubilidade. A figura IV.7 demonstra o funcionamento do Sistema “*Air Sparging*”.

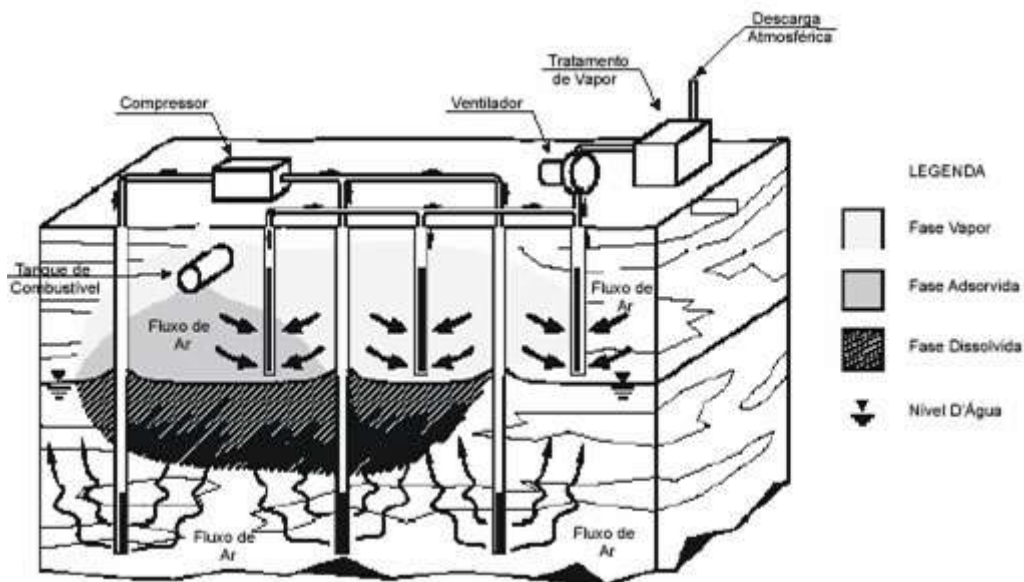


Figura IV.7 - Sistema *Air Sparging* associado ao SVE (TECNOHYDRO, 2008).

### g) Dessorção Térmica em Baixas Temperaturas

O processo é também conhecido como Volatilização Térmica em Baixas Temperaturas, Dissociação Térmica, e Aquecimento Controlado de Solo. Trata-se de uma técnica de remediação *ex-situ* que utiliza calor para separar fisicamente hidrocarbonetos de petróleo de solos escavados. Dissociadores térmicos são projetados com o intuito de aquecer solos a temperaturas suficientes para causar a volatilização dos compostos e dissociá-los (separar fisicamente) do solo. O calor utilizado objetiva a redução da pressão de vapor dos contaminantes, redução da viscosidade, tensão superficial e aumento da solubilidade da maioria dos compostos, além de acelerar o processo de Biorremediação. Embora sua função não seja decompor

compostos orgânicos, os dissociadores térmicos podem, dependendo dos compostos presentes e da temperatura do sistema, causar a decomposição completa ou parcial de alguns dos compostos (TECNOHIDRO, 2008).

Os hidrocarbonetos volatilizados são geralmente tratados em uma unidade de tratamento secundária (usualmente câmaras de oxidação catalítica, condensadores ou unidade de adsorção de carbono) antes de sua liberação na atmosfera. Os oxidantes destroem os compostos orgânicos. Condensadores e unidades de adsorção de carbono “prendem” compostos orgânicos para posterior tratamento ou disposição.

Esta técnica geralmente é empregada concomitantemente com outras tecnologias para captação dos contaminantes despreendidos no aquecimento, tais como a Extração Multifásica, Extração de Vapores e Bombeamento e Tratamento. As formas mais conhecidas que utilizam o emprego do calor no solo e água subterrânea são: a Injeção de Vapor de Água, Injeção de Ar Quente, Aquecimento por Radiofrequência; Aquecimento por Eletrodos e por Resistência Elétrica (WIKIPÉDIA, 2008).

#### **h) Oxidação Catalítica**

Outro processo utilizado para descontaminação é a Oxidação Catalítica. Neste processo o ar é aquecido à 300- 500°C por um tempo curto, sobre uma platina. O processo é eficiente, embora bastante dispendioso, pelo alto custo da energia para aquecimento de grandes volumes de vapor de água. É importante salientar também que os catalisadores comerciais utilizados na oxidação de compostos voláteis são, na sua maioria, à base de metais nobres, de elevado custo. Shih et al. (Apud TIBURTIUS, 2004) realizaram um estudo para validar e otimizar a capacidade do carvão ativado granulado na remoção de MTBE (metil-terc-butil éter), na presença de competidores como matéria orgânica e compostos orgânicos voláteis presentes na gasolina (ex: benzeno, tolueno e xilenos). O estudo constatou que a competitividade de adsorção de MTBE e BTX causa uma diminuição da ordem de 30% na capacidade de remoção do carvão ativado (TIBURTIUS et al, 2004).

A associação de um processo físico e um térmico foi proposta por Chih-Ju et al. (Apud TIBURTIUS, 2004). Neste trabalho, a extração com carvão ativado granulado, seguida de tratamento por microondas, leva à geração de uma chama vermelha com temperaturas de aproximadamente 1200 a 1800°C.

## **i) Processos Oxidativos Avançados**

As regulamentações relacionadas com a qualidade das águas vêm se tornando cada vez mais restritivas, principalmente em função da constatação definitiva da vulnerabilidade deste recurso essencial. Em função do elevado custo, da complexidade operacional dos tratamentos físicos disponíveis, e, em algumas situações, apresentam-se ineficientes, as tecnologias alternativas têm recebido bastante atenção nos últimos anos. Dentro deste contexto, o tratamento de poluentes orgânicos recalcitrantes por Processos Oxidativos Avançados (POA's) tem se mostrado uma alternativa bastante promissora (TIBURTIUS et al, 2004).

Os POA's têm como principal característica a geração de radicais hidroxilas ( $\text{HO}\cdot$ ), que reagem rápida e indiscriminadamente com muitos compostos orgânicos, ou por adição à dupla ligação ou por abstração do átomo de hidrogênio em moléculas orgânicas alifáticas. O resultado é a formação de radicais orgânicos que reagem com oxigênio, dando início a uma série de reações de degradação que pode resultar em espécies inócuas, tipicamente  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Vários processos de produção do radical hidroxila têm sido estudados, geralmente utilizando ozônio, peróxido de hidrogênio, semicondutores e reagente de Fenton.

### **- Fotólise**

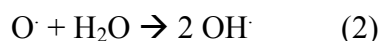
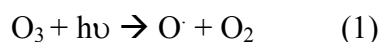
A potencialidade da radiação ultravioleta na remediação de resíduos tem sido avaliada extensamente, principalmente visando à desinfecção. Em função da elevada eficiência da radiação UV na destruição de microorganismos, muitos equipamentos baseados na utilização de lâmpadas a vapor de mercúrio foram comercializados, principalmente para servirem de alternativa à desinfecção química.

Nos últimos anos, pesquisadores estenderam a aplicação desta tecnologia para o tratamento de compostos orgânicos voláteis. Na Fotólise direta, as moléculas orgânicas podem absorver fótons de radiação ultravioleta, gerando espécies eletronicamente excitadas que podem transferir elétrons para receptores presentes no meio, formando radicais livres. Estas espécies radicalares podem reagir com o oxigênio molecular, gerando radicais peroxi que tendem a se decompor naturalmente, formando intermediários parcialmente oxidados (TIBURTIUS et al, 2004).

Em geral, a fotodegradação em fase gasosa é mais atrativa do que em fase líquida, devido à baixa absorção UV pelo ar, à presença de oxigênio e à ausência de sequestradores de radicais, como os íons carbonato e bicarbonato.

## - Ozônio/UV

Quando associado à radiação ultravioleta, o poder oxidante de ozônio aumenta significativamente, em função da geração do forte oxidante radical hidroxila (Equações 1 e 2).

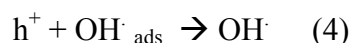
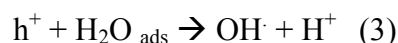


Recentemente, alguns pesquisadores propuseram a utilização deste sistema para degradação de compostos orgânicos voláteis, em fase gasosa. Entretanto, a utilização desta técnica na destruição de poluentes voláteis em fase aquosa está sujeita a um fator limitante, representado pela libertação das moléculas voláteis da solução por adição de  $\text{O}_3$ , de forma similar à prática de "*Air Stripping*" (TIBURTIUS et al, 2004).

## - Fotocatálise Heterogênea

Dentro do contexto dos POA's, a fotocatalise heterogênea pode ser considerada uma técnica clássica, a partir da qual grande parte dos conceitos envolvidos nos processos oxidativos avançados foram elucidados. A degradação de compostos orgânicos através de Fotocatálise Heterogênea, assim como os princípios que fundamentam o processo, foram bastante documentados.

A Fotocatálise Heterogênea envolve a ativação de um semicondutor (geralmente  $\text{TiO}_2$ ) por luz solar ou artificial. O semicondutor é caracterizado por bandas de valência e bandas de condução, sendo a região entre elas chamadas de "*band gap*". A absorção de fótons com energia superior à energia do "*band gap*" resulta na promoção de um elétron da banda de valência para a banda de condução, com geração concomitante de uma lacuna ( $h^+$ ) na banda de valência. Estas lacunas mostram potenciais bastante positivos, na faixa de +2,0 a 3,5 eV. Este potencial é suficientemente positivo para gerar radicais hidroxilas  $\text{HO} \cdot$ , a partir das moléculas de água adsorvidas na superfície do semicondutor (Equações 3 e 4), os quais podem subsequentemente oxidar o contaminante orgânico (TIBURTIUS et al, 2004).



Dentro do contexto das espécies químicas relacionadas com o tipo de contaminação aqui tratado, a Fotocatálise Heterogênea tem sido utilizada com bastante sucesso na degradação de inúmeros substratos de interesse, utilizando-se principalmente  $\text{TiO}_2$  como catalisador,

como mostrado na tabela IV.4 (TIBURTIUS et al., 2004). Estes estudos demonstram uma baixa seletividade oxidativa do radical hidroxila e, portanto, uma boa potencialidade para a degradação de BTX's.

**Tabela IV.4 - Degradação de Substratos de interesse via Fotocatálise Heterogênea**

Espécie Química	Sistema
<b>BTX</b>	TiO <sub>2</sub> imobilizado
<b>Benzeno</b>	TiO <sub>2</sub> imobilizado
<b>Tolueno</b>	TiO <sub>2</sub> imobilizado
<b>Tolueno</b>	TiO <sub>2</sub> e Pt/ TiO <sub>2</sub>
<b>Tolueno</b>	TiO <sub>2</sub>
<b>Tolueno</b>	TiO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (fase vapor)
<b>Tolueno</b>	Adsorção - TiO <sub>2</sub>

Fonte: TIBURTIUS et al., 2004

Métodos heterogêneos orientados para a remediação de efluentes industriais ou para substratos de interesse ambiental são abundantes. Entretanto, a aplicação destes procedimentos em níveis industriais é bastante discutida, principalmente em função de desvantagens que derivam do seu caráter heterogêneo. Neste sentido, a dificuldade na penetração da radiação em um meio que contém uma fina suspensão de partículas opacas e a dificuldade na remoção dos fotocatalisadores, uma vez terminado o processo, constituem-se nas principais desvantagens destes métodos. Com o intuito de contornar estes problemas, muitos trabalhos sobre imobilização de semicondutores, em suportes como zeólitas, cerâmicas, sílicas, vidros, polímeros e outros, estão sendo desenvolvidos (TIBURTIUS et al., 2004).

#### **- Oxidação Química “*in Situ*” (ISCR)**

A Oxidação Química “*in situ*” (ISCR) é uma tecnologia baseada na injeção de oxidantes químicos em meios contaminados (água subterrânea e solo), com o objetivo de destruir o contaminante através de reações químicas e converter a sua massa em compostos inertes encontrados na natureza. Os oxidantes usualmente aplicados neste processo são: peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>) e em menor escala o oxigênio dissolvido (OD).

As aplicações mais comuns deste processo vêm sendo baseadas no Reagente de Fenton, onde o peróxido de hidrogênio é aplicado junto a um catalisador, o ferro (Fe), gerando radicais hidroxilas livres que oxidam os compostos orgânicos presentes no meio. O peróxido de hidrogênio residual decompõe-se em água e oxigênio, e o ferro sofre precipitação. Abaixo é apresentada a equação representativa da oxidação química gerada pelo Reagente de Fenton.



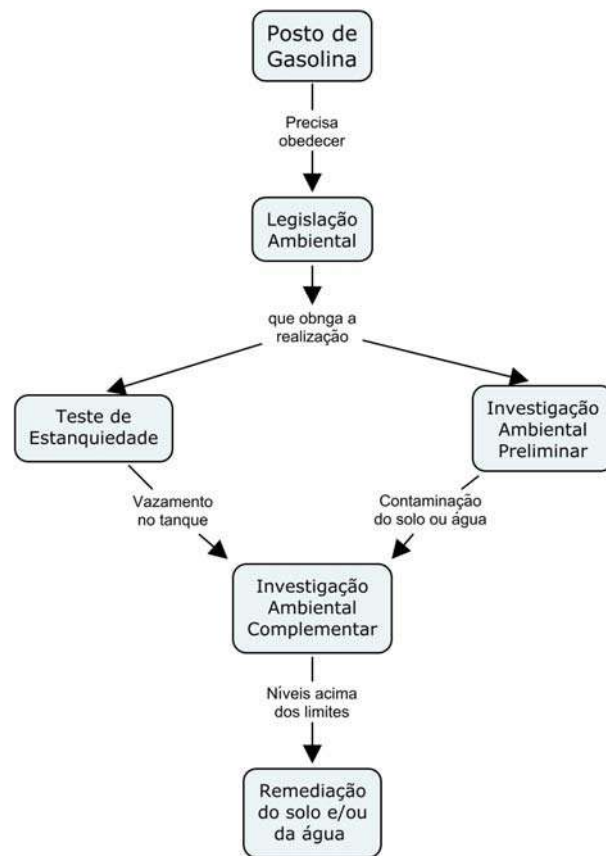


A oxidação *in situ* é muito empregada na remediação de solo e água subterrânea. Ela pode ser aplicada a diversos tipos de granulometria de solos (silte e argiloso), no tratamento de compostos orgânicos voláteis (VOC's), incluindo dicloroetano (DCE), tricloroetileno (TCE), tetracloroetileno (PCE), benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, assim como os compostos orgânicos semi-voláteis (SVOC's) tais como os pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH's) e os bifenilas policloradas (PCB's) (TECNOHIDRO, 2008).

A sua aplicação no solo e em água subterrânea promove reação química de oxiredução dos compostos orgânicos, transformando-os em água, gás carbônico e sais.

## Capítulo V - Estudo de Caso: Posto de Abastecimento de Combustíveis

Segundo a legislação, os postos de abastecimento de combustíveis devem a cada 15 anos, realizar *Testes de Estanqueidade* periodicamente nos tanques de armazenagem de combustíveis (ver item III.1) e uma *Investigação Ambiental Preliminar*. Se alguns dos tanques apresentar vazamento e/ou contaminação do solo ou de águas subterrâneas, deverá realizar uma *Investigação Ambiental Complementar*, e propor processo de *Remediação* caso necessário. Mesmo que os contaminantes estejam abaixo das concentrações determinadas pela análise de risco, deverá ser feito o monitoramento ambiental pelo período determinado pelo órgão ambiental responsável. Normalmente as análises devem ser realizadas semestralmente durante dois anos (norma da CETESB). Esquemáticamente a sequência do processo pode ser vista na figura V.1.



**Figura V.1 – Esquema do Processo de Avaliação Ambiental de Posto de Combustível**

O estudo de caso usado para a avaliação e análise das condições do sítio em relação às possibilidades de contaminação foi uma área circundante de um posto de serviços. Esta avaliação envolverá análises do solo e da água subterrânea e fornecerá subsídios para averiguar a necessidade de remediação. No caso da necessidade de remediação será apresentado o processo adequado para tal.

Neste projeto é um caso da remediação de água e solo de um Posto de Abastecimento de Combustível, localizado na cidade do Rio de Janeiro, próximo da orla litorânea, ocupando uma área de aproximadamente 1.200 m<sup>2</sup>, cujo terreno foi vendido para construção de um edifício residencial.

## V.1. Informações Preliminares

### V.1.1. Breve Histórico

O empreendimento encontrava-se desativado e sem instalações desde dezembro de 2006. Todos os tanques já foram retirados restando apenas o tanque de óleo queimado. A figura V.2 apresenta a planta baixa do empreendimento, com a localização original das instalações e dos equipamentos. A tabela V.1 apresenta um histórico das ações de investigação e remediação realizadas no empreendimento e que são o objeto do estudo de caso.

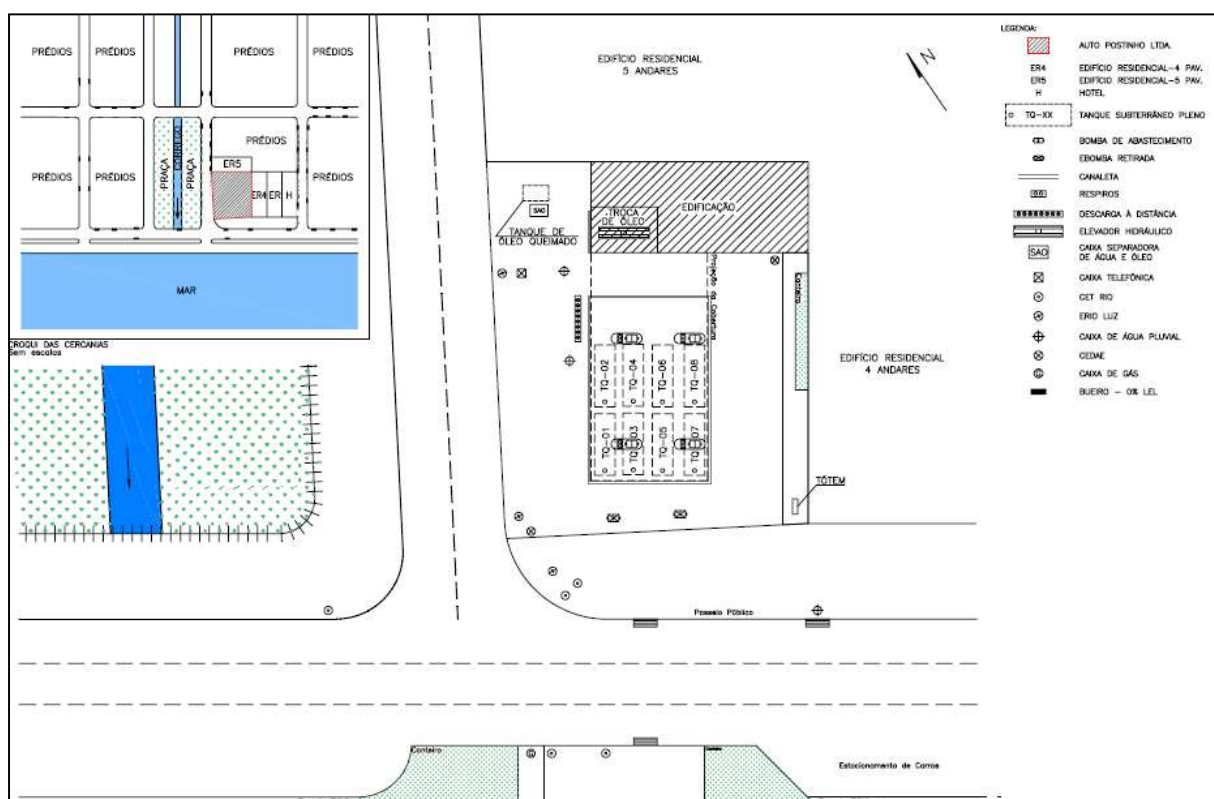
Em janeiro de 2004 foi realizada uma Investigação Ambiental Preliminar e a Análise de Risco RBCA TIER 1. Em julho de 2005 foi realizada uma Investigação Ambiental Complementar com o objetivo de monitorar as concentrações dos contaminantes no sítio. Em setembro do mesmo ano foi realizada outra Investigação Ambiental Complementar além da Análise de Risco RBCA TIER 2, devido a um registro de vazamento de combustível.

**Tabela V.1 - Resumo do Histórico do Empreendimento**

<b>DATA</b>	<b>AÇÃO</b>
<b>Janeiro de 2004</b>	Investigação Ambiental Preliminar e Análise de Risco Tier 1
<b>Julho de 2005</b>	Investigação Ambiental Complementar
<b>Setembro de 2005</b>	Investigação Ambiental Complementar e Análise de Risco Tier 2
<b>Outubro de 2006</b>	Monitoramento Ambiental
<b>Novembro de 2006</b>	Investigação Ambiental Complementar
<b>Dezembro de 2006</b>	Retirada dos Tanques Existentes
<b>Janeiro de 2007</b>	Instalação e Operação do Sistema de Remediação
<b>Fevereiro de 2007</b>	Operação do Sistema de Remediação
<b>Março de 2007</b>	Operação do Sistema de Remediação e Desmobilização do Sistema de Remediação
<b>Abril de 2007</b>	Retirada do Tanque de Óleo Queimado e Monitoramento Ambiental
<b>Julho de 2007</b>	Monitoramento Ambiental
<b>Novembro de 2007</b>	Aplicação de Reagente de FENTON
<b>Janeiro de 2008</b>	Aplicação de Reagente de FENTON
<b>Abril de 2008</b>	Aplicação de Reagente de FENTON
<b>Junho de 2008</b>	Monitoramento Ambiental
<b>Dezembro de 2008</b>	Monitoramento Ambiental
<b>Março de 2009</b>	Monitoramento Ambiental

Com base nos resultados encontrados, foi feito um monitoramento em outubro de 2006 para verificar a pluma de fase dissolvida e o risco existente no local. No mês seguinte foi necessária uma nova investigação complementar para delimitar a pluma encontrada. Em janeiro de 2007 foi instalado um sistema de remediação para reduzir as concentrações dos

contaminantes na água subterrânea do empreendimento, tendo sido operado por 3 meses. Em abril de 2007 foi removido o tanque de óleo queimado e realizado um monitoramento dos poços existentes para amostras de água. Em julho de 2007 foi realizado um monitoramento das águas subterrâneas para efeito de comparação com os valores amostrados de água em abril, tendo como resultado uma diminuição das concentrações dos contaminantes de forma geral. Em novembro de 2007 por exigência do órgão ambiental do Rio de Janeiro (FEEMA), foi aplicada a técnica de remediação por oxidação química, sendo continuada a sua aplicação até o mês de abril de 2008, com a finalidade de reduzir ainda mais as concentrações encontradas no empreendimento.



**Figura V.2 – Planta Baixa do Empreendimento**

Em junho de 2008 foi realizado um novo monitoramento para verificar a eficiência do processo de remediação aplicado, obtendo-se um resultado positivo na redução dos contaminantes que não mais apresentavam risco à saúde humana. Em dezembro do mesmo ano foram novamente coletadas amostras de água com o objetivo de se constatar a permanência dos resultados obtidos no último monitoramento, que por exigência do órgão ambiental, deverá se manter estável e dentro dos níveis admitidos durante o período em que o mesmo determinar ou quando houver alguma solicitação do órgão responsável. Com base nisto foi realizado novamente um novo monitoramento em março de 2009, comprovando as concentrações dos

contaminantes abaixo dos níveis de intervenção da lista orientadora da FEEMA mostrados na tabela V.2.

**Tabela V.2 - Valores Orientadores para Solo e Água da FEEMA**

Compostos	Valores Orientadores			
	Solos (mg/kg)			Água (µg/L)
	Referência	Alerta	Intervenção	Intervenção
<b>Benzeno</b>	0,05	0,53	1,00	5,00
<b>Tolueno</b>	0,05	65,00	130,00	170,00
<b>Etilbenzeno</b>	0,05	25,00	50,00	200,00
<b>Xilenos</b>	0,05	12,50	25,00	300,00
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos)</b>				
<b>Naftaleno</b>	-	-	-	70,00
<b>Fenantreno</b>	-	-	-	5,00
<b>Antraceno</b>	-	-	-	5,00
<b>Fluoranteno</b>	-	-	-	1,00
<b>Criseno</b>	-	-	-	0,05
<b>Benzo(a)Antraceno</b>	-	-	-	0,50
<b>Benzo(k)Fluoranteno</b>	-	-	-	0,05
<b>Benzo(a)Pireno</b>	-	-	-	0,70
<b>Indeno(123-cd)Pireno</b>	-	-	-	0,05
<b>Benzo(ghi)Perileno</b>	-	-	-	0,05
<b>PAH TOTAL</b>	1,00	20,50	40,00	-

### V.1.2. Contexto Geológico Regional

A cidade do Rio de Janeiro encontra-se inserida geologicamente na Faixa Ribeira, que possui estruturação regional de direção nordeste para sudoeste, englobando um conjunto de rochas Proterozóicas<sup>1</sup> e Fanerozóicas<sup>2</sup>. Os corpos geológicos predominantes na região são constituídos principalmente por gnaisses<sup>3</sup> que se distribuem ao longo das serras, morros, morrotes e também subjacente às camadas de sedimentos nos vales, baixadas, planícies litorâneas e baías que configuram o cenário geomorfológico da região. Estes se distribuem irregularmente como faixas ou bolsões entre os Migmatitos<sup>4</sup> (DNPM, 1984). O mapa geológico regional é apresentado na figura V.3.

<sup>1</sup> Rochas Fanerozóicas são rochas surgidas no Éon Fanerozóico, que é o período de tempo durante o qual tem existido abundante vida animal. Abrange cerca de 545 milhões de anos a partir de hoje para traz até o momento em que diversos animais casca dura apareceram pela primeira vez (Knowledgegerush, 2009).

<sup>2</sup> Rochas Proterozóicas são rochas surgidas na Era Proterozóica, que é anterior ao surgimento de abundante vida complexa sobre a Terra (Knowledgegerush, 2009).

<sup>3</sup> Um gnaisse é uma rocha de origem metamórfica. Rocha é uma substância composta de minerais. As rochas são geralmente classificadas de acordo com os processos que as formaram: ígneas, sedimentares ou metamórficas.

<sup>4</sup> Migmatitos são rochas na fronteira entre rochas metamórficas e rochas ígneas.

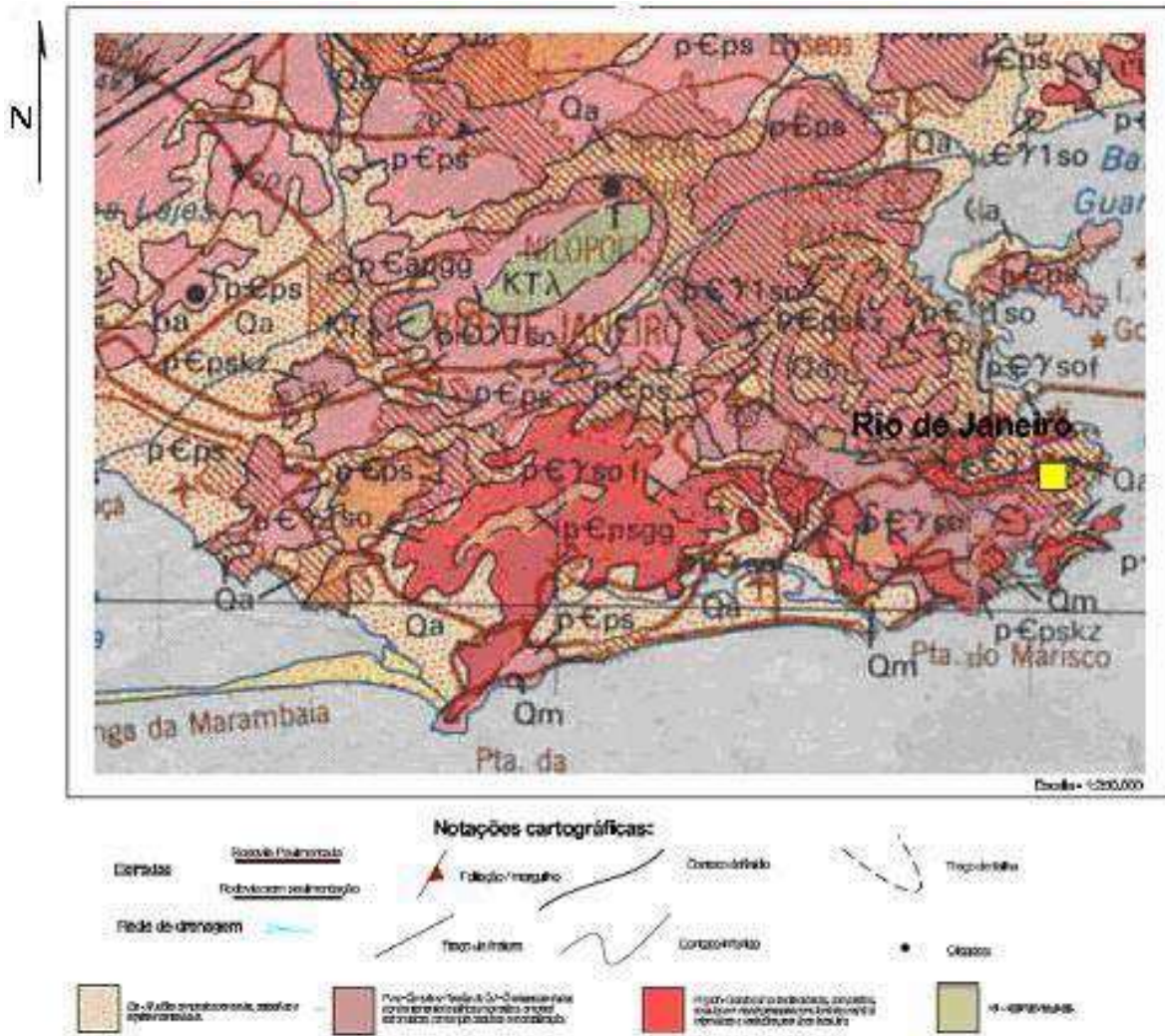
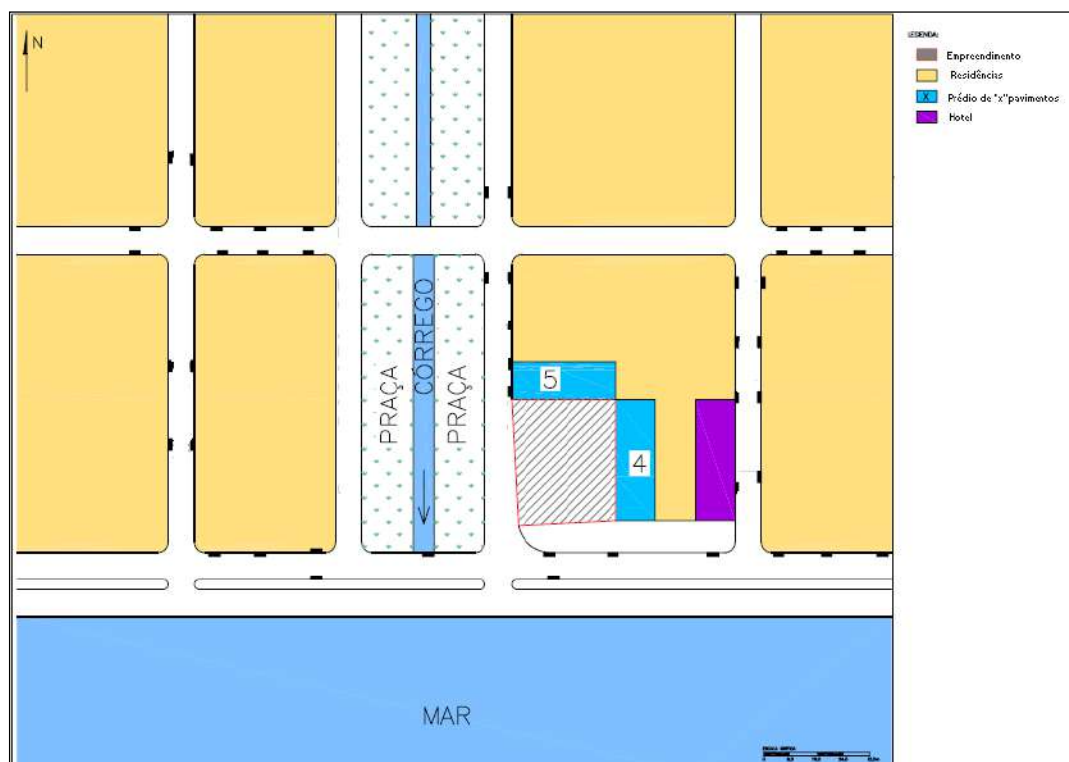


Figura V.3 - Mapa Geológico do Rio de Janeiro

### V.1.3. Caracterização das Cercanias

De acordo com a Tabela de Classificação de Postos de Serviços da ABNT 13.786/01, o empreendimento é classificado como Classe 3, devido à presença num raio de 100 m de garagens residenciais construídas em cota inferior a do solo e de corpo d'água superficial, destinado à recreação, à criação natural ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana e à proteção de comunidades aquáticas – praia (Apêndice A1). A morfologia da região é plana e a área é classificada como zona urbana e marítima, com ocupação predominantemente residencial (Figura V.4). A água utilizada para consumo doméstico das cercanias é fornecida pela concessionária local CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgoto).



**Figura V.4 - Cercanias do Empreendimento**

## V.2. Investigação Ambiental

No processo de investigação ambiental são perfurados vários poços em locais estrategicamente distribuídos no terreno do posto de abastecimento. Em seguida são analisadas amostras de água e de solo, para verificar se a quantidade de contaminantes em cada poço está dentro dos limites determinados pela legislação ambiental, que estabelece níveis diferenciados para uso comercial (Tabela V.2) e residencial (Tabela V.6). A diferença entre uma investigação ambiental preliminar e uma complementar está no número de poços que são perfurados para averiguação da contaminação.

Constatada a contaminação do solo e/ou da água subterrânea e determinada a extensão da pluma, deverá ser aplicado à área um processo de remediação em que poderão ser usados um ou mais métodos para reduzir os níveis de contaminantes.

### V.2.1. Caracterização Hidrogeológica

A caracterização hidrogeológica do terreno é necessária para determinar a direção do fluxo das águas subterrâneas, sua velocidade e a permeabilidade do solo.

### a) Levantamento Planialtimétrico

O levantamento planialtimétrico foi realizado para determinar a presença e profundidade do aquífero.

Com base em dados de campo levantados em novembro de 2006, pode-se afirmar que, até a profundidade investigada (6,0 m), há um único aquífero, de caráter livre. O nível médio do lençol freático local é de 3,36 m de profundidade. Na tabela V.3 encontram-se as profundidades do nível d'água e a cota da superfície dos poços de monitoramento existentes em outubro de 2006.

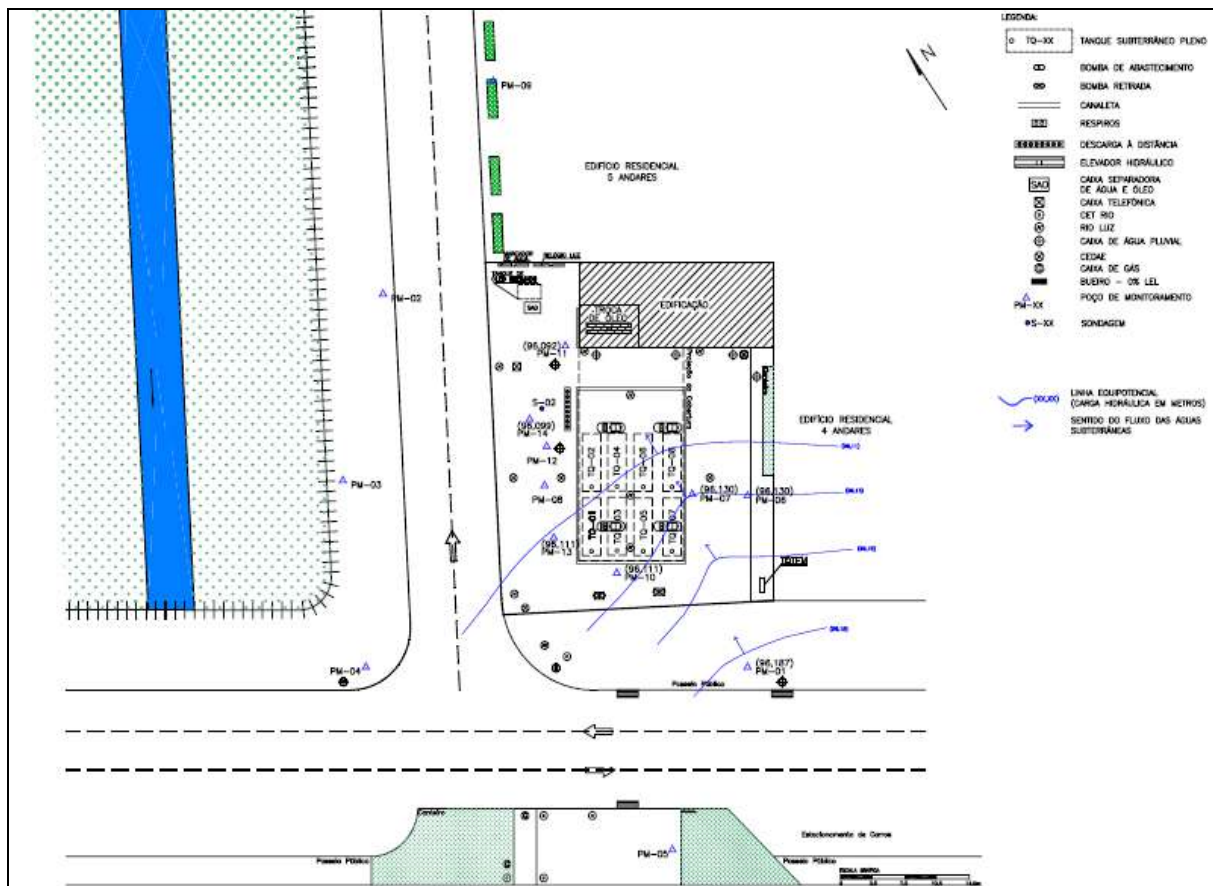
**Tabela V.3 - Levantamento Planialtimétrico Relativo entre os Poços em outubro/2006**

Poços	Cota Corrigida	Profundidade	Espessura	Carga Hidráulica (m)
PM-01	99,447	3,26	-	96,187
PM-06	99,630	3,50	-	96,130
PM-07	99,520	3,39	-	96,130
PM-10	99,511	3,40	-	96,111
PM-11	99,562	3,47	-	96,092
PM-13	99,411	3,30	-	96,111
PM-14	99,369	3,27	-	96,099

Abreviações: NA - nível d'água; FL – fase livre; Cc – cota corrigida; \* - leitura a partir da boca do poço

O mapa potenciométrico (Figura V.5) foi confeccionado a partir da interpolação dos dados de carga hidráulica, onde foram traçadas curvas equipotenciais e perpendiculares a estas, as setas representando a direção do fluxo subterrâneo que se **desloca preferencialmente para norte**. Deve-se levar em consideração que a área do empreendimento está localizada em uma área de influência das marés. Desta forma o fluxo das águas subterrâneas poderá estar direcionado para outros sentidos, dependendo do horário em que a topografia for realizada.





**Figura V.5 - Mapa Potenciôométrico do Sítio**

## b) Ensaio de Permeabilidade

O ensaio geotécnico de permeabilidade, de caráter pontual, foi realizado com a finalidade de determinar os coeficientes de permeabilidade do terreno investigado. A validade do ensaio depende da escolha do tipo mais adequado ao terreno em estudo, do acompanhamento detalhado de sua realização e da elucidação dos fenômenos que porventura venham a ocorrer. Com base no tipo de aquífero local e na geologia do terreno, são calculados os valores do coeficiente de permeabilidade.

O ensaio do tipo recuperação a nível variável, com diferencial de pressão negativo aplicado ao aquífero e recuperação superior a 63% da carga inicial foi realizado no (PM-14), sendo o tempo ( $T_0$ ), decorrido até que o nível d'água atinja 37% da profundidade inicial, de 1,101 minutos.

As leituras obtidas ao longo do ensaio foram tratadas, para obtenção do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), sendo obtido o valor de  $6,64 \times 10^{-4}$  cm/s (Apêndice A2). Estes resultados são compatíveis com a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade ( $k = 10^{-5}$  a  $10^{-3}$  cm/s) apresentados por Mello & Teixeira 1967 (ABGE, 1996) para terrenos compostos por

solos com areias finas e siltes. A partir de ensaio geotécnico realizado na investigação ambiental anterior (setembro/2005), pode-se admitir uma porosidade efetiva ( $\eta_e$ ) de 33,37% para o material em questão.

### c) Velocidade das Águas Subterrâneas

Adotando-se as cargas hidráulicas dos poços PM-01 (96,187) e do PM-11 (96,092), e admitindo-se entre os dois uma distância de 38,7 m, obtém-se um gradiente hidráulico ( $i$ ) de 0,245. Considerando a condutividade hidráulica ( $k$ ) de  $6,64 \times 10^{-4}$  cm/s e uma porosidade efetiva ( $\eta_e$ ) de 33,37% para o material em questão obteve-se, através da Lei de Darcy, a velocidade das águas subterrâneas igual a **1,54 m/ano**.

$$\text{Lei de Darcy: } V = (k \cdot i) / \eta_e$$

Onde:

V - velocidade média linear das águas subterrâneas (m/ano)

k - condutividade hidráulica (m/ano)

i - gradiente hidráulico (adimensional)

$\eta_e$  - porosidade efetiva do material (%)

### V.2.2. Características do Sítio Contaminado

O empreendimento operava há cerca de 60 anos recebendo, armazenando e distribuindo gasolina, álcool e diesel para o abastecimento de veículos, quando começaram a ser realizados os serviços ambientais em 2004. Em setembro de 2005 o empreendimento operava com 8 (oito) tanques subterrâneos de combustíveis, com descarga selada e boca de visita, localizados na área de abastecimento e um tanque de óleo queimado. Há aproximadamente 10 anos foram retiradas 2 (duas) bombas de abastecimento. O posto era todo pavimentado em concreto e o serviço de troca de óleo era realizado em box próprio. O óleo queimado era armazenado em um tanque subterrâneo de 1.500 L que era coletado bimensalmente para reciclagem.

As áreas da pista de abastecimento e do serviço de troca de óleo eram contempladas por canaletas de drenagem diretamente ligadas à caixa Separadora de Água e Óleo (SAO). O empreendimento não possuía serviço de lavagem de veículos. Os efluentes da SAO eram dirigidos à rede pública de esgotos e a água utilizada, para consumo humano e uso geral, era fornecida pela CEDAE. Não havia poços de captação de água subterrânea na área do empreendimento e não havia poços de monitoramento pré-existent no local.

Em janeiro de 2004 foi realizada uma investigação ambiental preliminar no posto de abastecimento, obtendo para o solo índices de BTX e PAH abaixo dos limites de detecção do método/aparelho utilizado pelo laboratório e para água nos níveis de intervenção CETESB (Apêndice A3) para os mesmos parâmetros. Foi rodado então o programa RBCA TIER 1 para se analisar o risco desta contaminação e que resultou em risco apenas para receptores residenciais. Como o posto iria continuar operando como área comercial não foi necessária uma remediação.

Em julho de 2005 uma avaliação ambiental complementar de solo e água foi feita, quando constatou-se a iridescência na água nos poços PM-02, PM-03 e PM-06 e valores acima do nível de intervenção da FEEMA nos poços PM-02, PM-03, PM-07 e PM-08 para os parâmetros BTX e PAH. Para o solo foram encontrados nas sondagens S-05 e S-03 valores acima do nível de intervenção para PAH e com relação ao BTX, todas as sondagens se encontravam com valores abaixo do limite de detecção do método/aparelho.

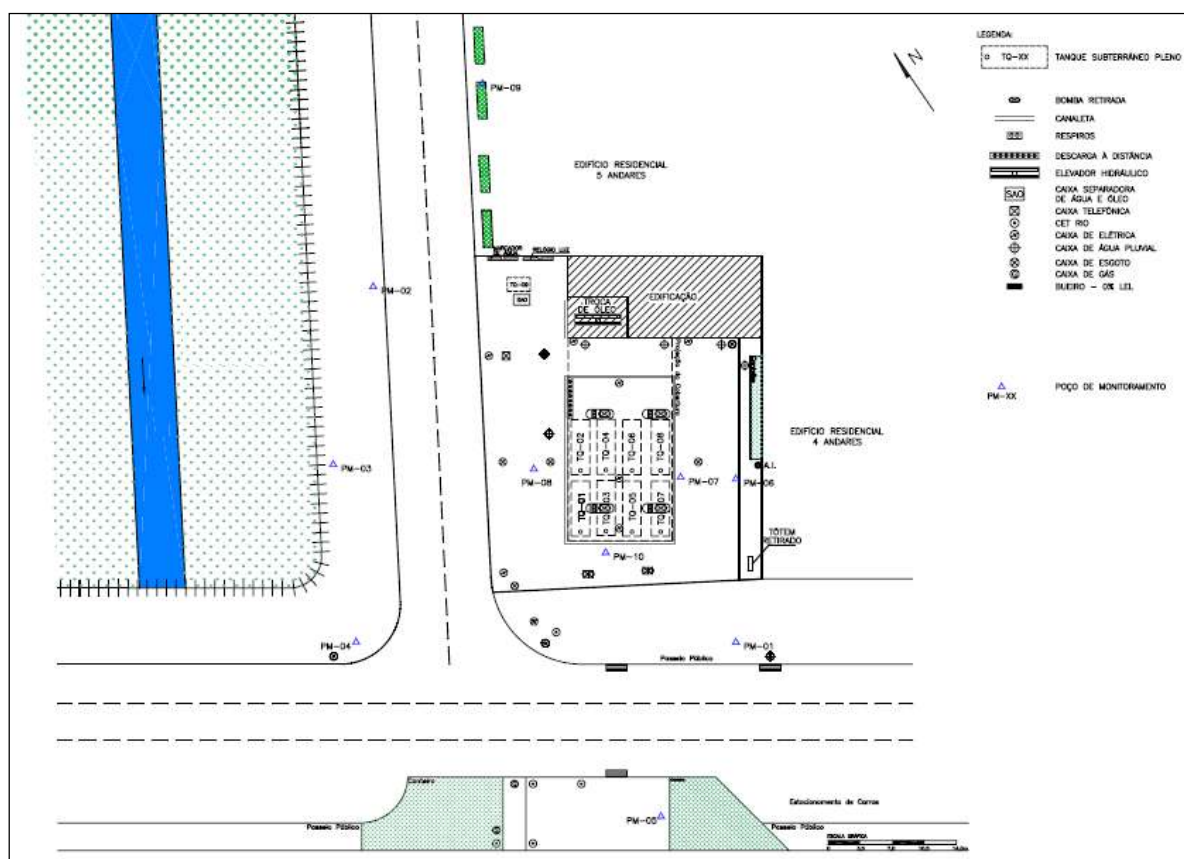
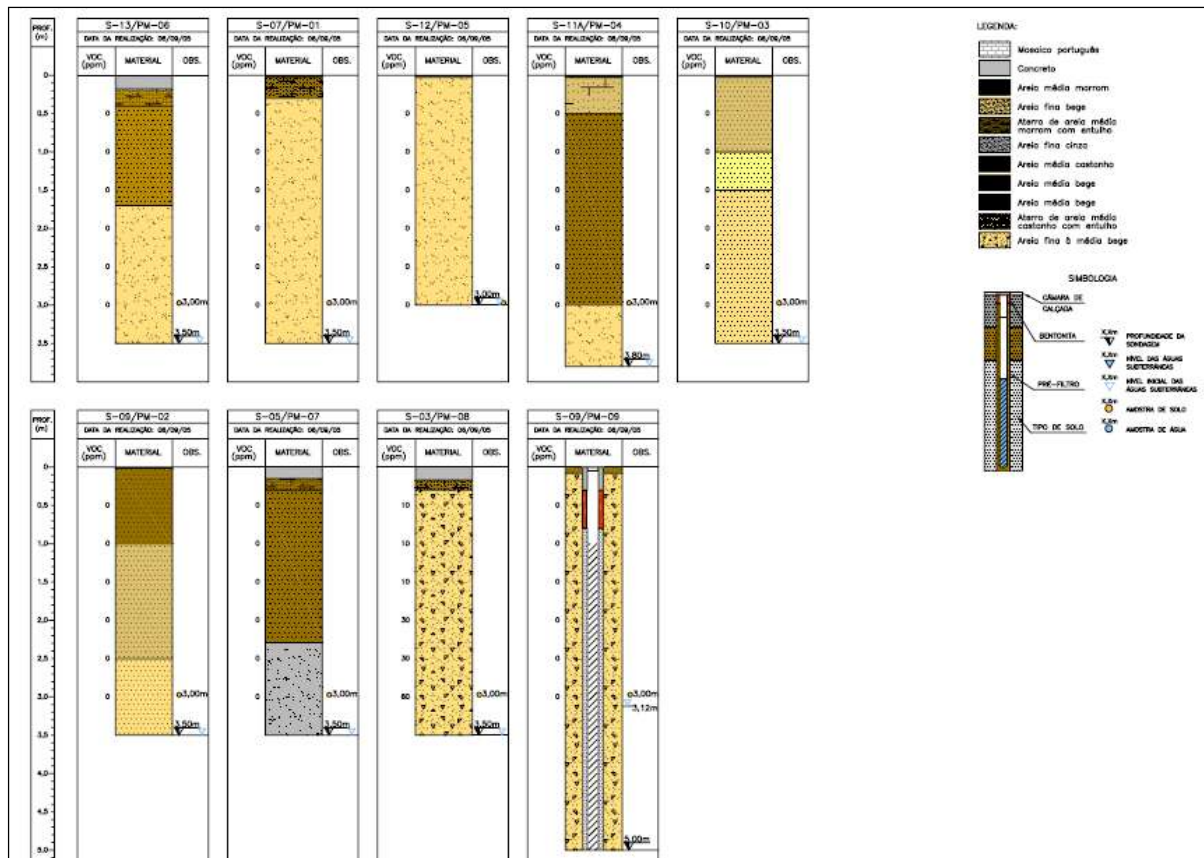


Figura V.6 - Localização das Sondagens/Poços de Monitoramento instalados (outubro/2006)

Em setembro do mesmo ano foi realizada outra investigação ambiental complementar e a análise de risco RBCA TIER 2, para verificar os níveis dos contaminantes no empreendimento e delimitar a pluma existente devido à um vazamento no local (o tanque 3 foi testado

resultando em não estanqueidade). Foram realizadas nove sondagens com trado manual, com uma profundidade média de 3,7m e instalado um poço de monitoramento (PM-09). A localização das sondagens/poço de monitoramento instalados em outubro de 2006 encontra-se na figura V.6 e o perfil descritivo de sondagens e poços de monitoramento instalados está na figura V.7.



**Figura V.7 - Perfil Descritivo das Sondagens e dos Poços de Monitoramento instalados**

Os resultados analíticos de BTX para todas as amostras de solo indicaram concentrações abaixo do limite de detecção do método/aparelho utilizado pelo laboratório. Para os compostos PAH, os resultados analíticos indicaram concentrações de naftaleno, fluoranteno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(k)fluoranteno, indeno(123-cd) e benzo(g,h,i)perileno nas amostras ASAP-01, ASAP-02, ASAP-03 e ASAP-07 com valores próximos ao limite de detecção que é de 0,01 mg/kg. As demais amostras apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção do método/aparelho utilizado pelo laboratório, conforme apresentado na tabela V.4.

Para as amostras de água, os resultados analíticos de BTX apresentaram concentrações para as amostras AAAP-05, AAAP-06, AAAP-07 e AAAP-08 que ultrapassaram os valores orientadores para BTX (para os compostos benzeno e etilbenzeno).

Tabela V.4 - Resultados Analíticos das Amostras de Solo (setembro/2005)

Compostos	S-13	S-07	S-12	S-11a	S-10	S-09	S-05	S-03	S-14	Limite de Detecção	Valores Orientadores (µg/kg)		
	A-SAP-01	A-SAP-02	A-SAP-03	A-SAP-04	A-SAP-05	A-SAP-06	A-SAP-07	A-SAP-08	A-SAP-09		Referência	Alerta	Intervenção
<b>BTX (µg/kg)</b>													
<b>Benzeno</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	1,0	50,0	530,0	1000,0
<b>Tolueno</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	1,0	50,0	65000,0	130000
<b>Etilbenzeno</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	1,0	50,0	25000,0	50000,0
<b>Xilenos</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	1,0	50,0	12500,0	25000
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>													
<b>Naftaleno</b>	0,01	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Fenantraceno</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Antraceno</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Fluoranteno</b>	nd	0,01	0,02	nd	nd	Nd	0,02	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Criseno</b>	0,02	nd	0,01	nd	nd	Nd	0,01	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Benzo(a)antraceno</b>	0,01	nd	0,01	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Benzo(k)fluorantra-</b>	nd	nd	0,01	nd	nd	Nd	0,01	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Benzo(a)pireno</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	0,01	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Indeno(1,2,3-</b>	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	0,01	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>Ben-</b>	0,01	nd	nd	nd	nd	Nd	0,02	Nd	nd	0,01	-	-	-
<b>PAH TOTAL</b>	0,05	0,01	0,06	nd	nd	Nd	0,08	Nd	nd	-	1,00	20,50	40,00

Métodos: USEPA 5021/8021 (BTX), USEPA 8270 B (PAH)

**Simbologia:** “ - ” – sem referência; **Abreviação:** nd – valor não detectado pelo método/equipamento utilizado pelo laboratório

Tabela V.5 - Resultados Analíticos das Amostras de Água (setembro/2005)

Compostos	PM-01	PM-02	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-07	PM-08	PM-09	Limite de Detecção	Valores Orientadores
	AAAP-02	AAAP-06	AAAP-05	AAAP-04	AAAP-03	AAAP-01	AAAP-07	AAAP-08	AAAP-09		Intervenção
<b>BTX (µg/L)</b>											
<b>Benzeno</b>	nd	286	73	nd	nd	nd	147	1247	nd	1,0	5,0
<b>Tolueno</b>	nd	26	12	nd	nd	nd	7	160	nd	1,0	170
<b>Etilbenzeno</b>	nd	460	169	nd	nd	nd	59	180	nd	1,0	200,0
<b>Xilenos</b>	nd	268	98	nd	nd	nd	48	271	nd	1,0	300
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (µg/L)</b>											
<b>Naftaleno</b>	nd	218,50	15,68	1,9	nd	0,13	3,58	227,10	nd	0,03	70,0
<b>Fenantraceno</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	0,32	0,33	nd	0,03	5,00
<b>Antraceno</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	0,04	nd	nd	0,03	5,00
<b>Fluoranteno</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	0,43	0,19	nd	0,03	1,00
<b>Criseno</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	0,08	0,07	nd	0,03	0,05
<b>Benzo(a)antraceno</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	0,07	0,05	nd	0,03	0,50
<b>Benzo(k)fluorantra-</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,05
<b>Benzo(a)pireno</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	0,05	0,05	nd	0,03	0,70
<b>Indeno(1,2,3-</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,05
<b>Benzo(g,h,i)perileno</b>	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,05
<b>Parâmetros Físicos</b>											
<b>PH</b>	7,9	7,5	7,4	7,6	7,3	7,5	6,9	7,1	7,9	-	-
<b>Temperatura (°C)</b>	24,5	24,2	24	24,7	24	24,5	24,3	24,8	23,6	-	-
<b>Condutividade (µS)</b>	2,1	3,5	1,4	1,1	2,6	1,3	2,2	2,3	1,2	-	-

Métodos: USEPA 5021/8021 (BTX), USEPA 8270 B (PAH)

**Simbologia:** “ – “ – sem referência; **Abreviação:** nd – valor não detectado pelo método/equipamento utilizado pelo laboratório

**Valores em destaque (vermelho) indicam concentrações nos níveis de intervenção das listas de referência adotadas**

Para PAH apresentaram concentrações nas amostras AAAP-01, AAAP-04, AAAP-05, AAAP-06, AAAP-07, AAAP-08 e AAAP-09, mas apenas as amostras AAAP-06 e AAAP-08 ultrapassaram os valores orientadores para PAH (para o composto naftaleno), conforme apresentada na tabela V.5. Não foi constatada a presença de iridescência em nenhum poço de monitoramento.

As amostras AAAP-10 e AAAP-11 são duplicatas das amostras AAAP-08 e AAAP-09 respectivamente e as amostras AAAP-12 e AAAP-13 são branco de viagem e branco de equipamento respectivamente.

Para a elaboração da análise de risco RBCA TIER 2, foram utilizadas as concentrações obtidas nas amostras de solo coletadas durante esta Investigação Ambiental em função de um novo cenário ambiental.

A análise de risco RBCA TIER 2 realizada indicou a presença de risco carcinogênico e tóxico para o caminho de exposição no ar, em ambiente fechado. A concentração máxima de benzeno na água subterrânea (1,247 mg/L) excedeu o SSTL calculado (0,14 mg/L), na via de exposição inalação de vapores em ambientes fechado por receptor residencial *on site*. A tabela V.6 apresenta os SSTL's calculados.

**Tabela V.6 - SSTLs Calculados para o Solo e as Águas Subterrâneas da Área**

Compostos	SSTL - Solo (mg/kg)	SSTL - Água Subterrânea (µg/L)
<b>Benzeno</b>	0,14	140
<b>Tolueno</b>	25	24000
<b>Etilbenzeno</b>	77	58000
<b>Xilenos</b>	18000	>198000
<b>Naftaleno</b>	26000	>31000
<b>Fenantreno</b>	>201	>2000
<b>Antraceno</b>	NC	NC
<b>Fluoranteno</b>	>70	>0,206
<b>Criseno</b>	2,5	1,7
<b>Benzo(a)antraceno</b>	3,9	>5,7
<b>Benzo(k)fluoranteno</b>	39	>4,3
<b>Benzo(a)pireno</b>	0,39	>1,6
<b>Indeno (1,2,3,cd)Pireno</b>	3,9	0,84
<b>Benzo(g,h,i)perileno</b>	>10	>0,7

Legenda: "<" indica concentrações abaixo do limite de detecção; ">" indica concentrações maiores que o valor de saturação residual do composto; NC – não calculado.

Em outubro de 2006 foi realizado um monitoramento que foi solicitado em função da existência de contaminação em fase dissolvida nas águas subterrâneas, caracterizada por con-

centrações de BTX e/ou PAH nas amostras dos poços PM-02, PM-03, PM-07, PM-08 e PM-10, além da caracterização de risco para águas subterrâneas na Análise de Risco RBCA TIER 2, conforme dados da Investigação Ambiental Complementar do Solo e das águas Subterrâneas e Análise de Risco RBCA TIER 2 realizado entre setembro e outubro de 2005.

Foi constatada a presença de dez poços de monitoramento pré-existent instalados por uma empresa entre setembro e outubro de 2005 durante a investigação ambiental. A descrição dos poços pré-existent encontra-se na tabela V.7.

Foram coletadas amostras das águas subterrâneas nos poços PM-01, PM-02, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06, PM-09 e PM-10 com o auxílio de *bailler's* descartáveis. Não foram coletadas amostras dos poços PM-07 e PM-08, pois ambos apresentavam-se secos.

**Tabela V.7- Descrição dos Poços de Monitoramento existentes**

Poços	Profundidade (m)	Diâmetro	Nível da água (m)	Fase Livre (espessura em cm)
PM-01	3,5	2"	3,26	-
PM-02	3,5	2"	3,41	-
PM-03	3,5	2"	3,35	-
PM-04	3,8	2"	3,28	-
PM-05	3	2"	3,29	-
PM-06	3,5	2"	3,50	-
PM-07	3,5	2"	Seco	-
PM-08	3,5	2"	Seco	-
PM-09	4,8	2"	3,40	-
PM-10	4,8	2"	3,40	-

(-) ausência de hidrocarbonetos em fase livre.

As amostras que apresentaram concentrações no nível de intervenção segundo as diretrizes da lista orientadora da FEEMA foram às coletadas nos poços PM-02 e PM-03 para o composto benzeno, e no poço PM-10 para os compostos benzeno, etilbenzeno e naftaleno. A figura V.6 mostra a localização dos poços de monitoramento existentes no empreendimento.

Os demais resultados apresentaram concentrações de BTX e PAH's abaixo do nível de intervenção da lista orientadora e/ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho utilizado. Em relação aos níveis-alvo, as concentrações de benzeno nos poços PM-03 e PM-10 ultrapassaram o SSTL calculado para este composto conforme apresentado na tabela V.6.

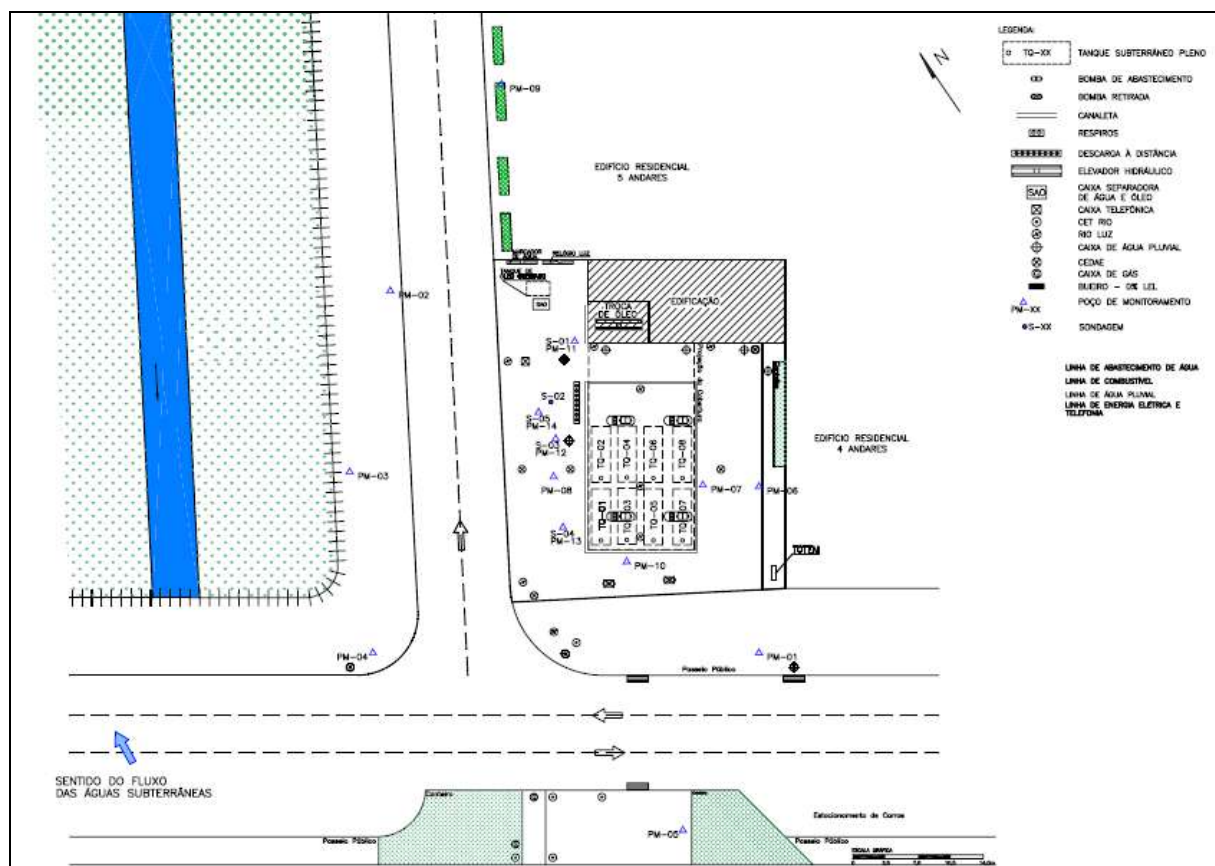
Com base nesses resultados encontrados e mostrados na tabela V.8, em novembro foi feita uma avaliação ambiental complementar do solo e da água subterrânea. Foram realizadas



cinco sondagens com a utilização de trado manual de 4” de diâmetro (S-01 a S-05). As sondagens atingiram profundidade máxima de 6,0 m, totalizando 25,0 m sondados. Uma das sondagens (S-02) foi perdida, em função de ter atingido material impenetrável ao trado manual a 1,0 metros de profundidade.

Foram instalados quatro poços de monitoramento (S-01/PM-11, S-03/PM-12, S-04/PM-13 e S-05/PM-14) de 2” de diâmetro, objetivando a delimitação da pluma de hidrocarbonetos em fase livre (se existente) e dissolvida. Durante a execução das sondagens e instalação dos poços não foi verificada a presença de hidrocarbonetos em fase livre.

A localização e a numeração dos poços instalados encontram-se na Figura V.8 e os perfis descritivos das sondagens e construtivos dos poços instalados encontram-se na figura V.9.

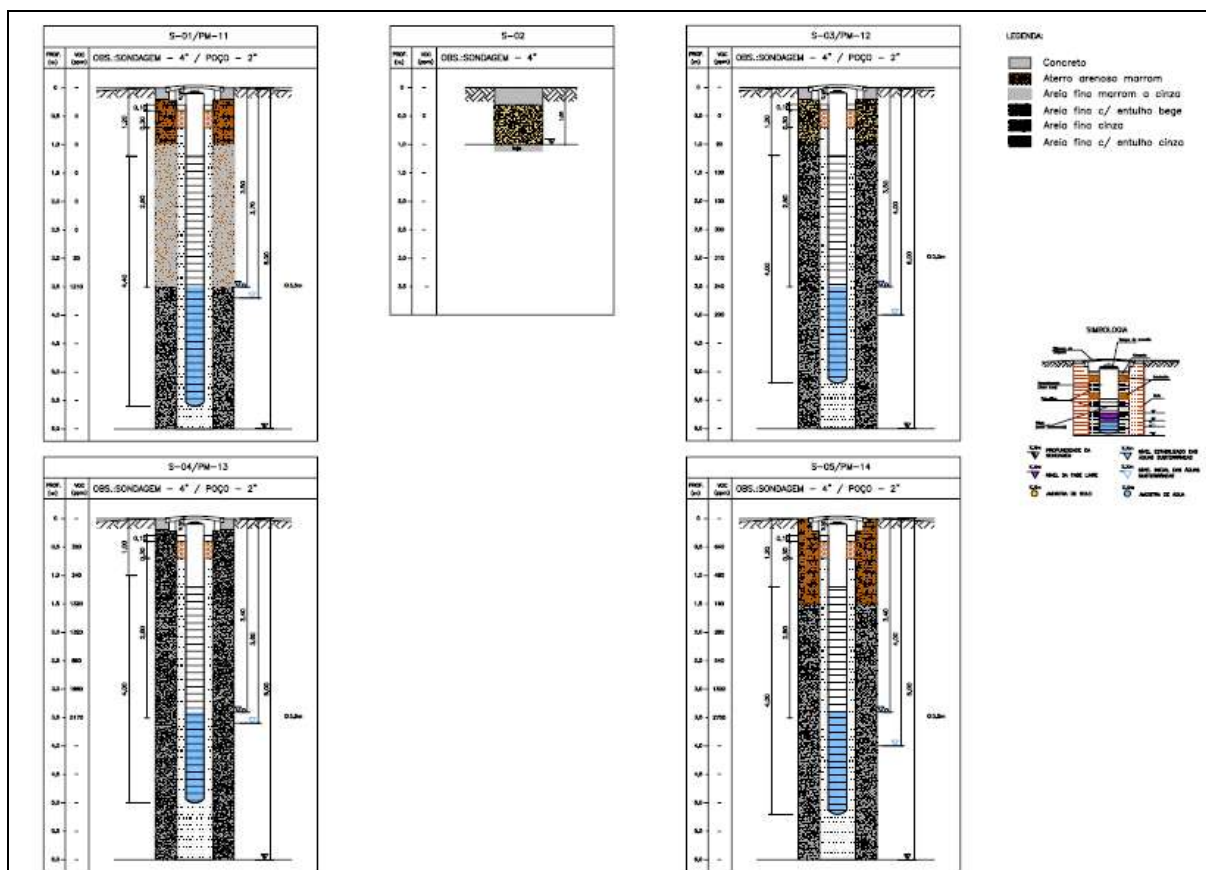


**Figura V.8 - Localização das Sondagens/Poços de Monitoramento instalados (novembro/2006)**

Foram coletadas amostras de solo nas sondagens S-01 (ASPT-01), S-03 (ASPT-03), S-04 (ASPT-04) e S-05 (ASPT-05). Os resultados de todas as amostras de solo coletadas apresentaram concentrações abaixo do nível de intervenção da lista orientadora da FEEMA, abaixo dos SSTLs calculados e/ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho utilizado pelo laboratório, apresentados na tabela V.9.

Tabela V.8 - Resultados Analíticos das Amostras de Água (outubro/2006)

Compostos	PM-01	PM-02	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-09	PM-10	Limite de Detecção	SSTL	Valores Orientadores
	AAAP-02	AAAP-06	AAAP-05	AAAP-04	AAAP-03	AAAP-01	AAAP-09	AAAP-10		Água	Intervenção
<b>BTX (µg/L)</b>											
<b>Benzeno</b>	Nd	48,4	322,6	nd	Nd	nd	nd	324,5	0,1	140,0	5,00
<b>Tolueno</b>	Nd	1,3	10	nd	Nd	nd	nd	13,7	0,1	24000,0	170,00
<b>Etilbenzeno</b>	Nd	83,9	109,7	nd	Nd	nd	nd	429,3	0,1	58000,0	200,00
<b>Xilenos</b>	Nd	44,6	12,3	nd	Nd	nd	nd	228,7	0,1	>198000	300,00
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>											
<b>Naftaleno</b>	Nd	10,58	30,80	2,56	Nd	0,03	nd	84,40	0,03	>31000	70,00
<b>Fenantraceno</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	>2000	5,00
<b>Antraceno</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	NC	5,00
<b>Fluoranteno</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	>0,206	1,00
<b>Criseno</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	1,7	0,05
<b>Benzo(a)antraceno</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	>5,7	0,50
<b>Benzo(k)fluorantra-</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	>4,30	0,05
<b>Benzo(a)pireno</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	>1,6	0,70
<b>Indeno(1,2,3-</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	0,84	0,05
<b>Benzo(g,h,i)perileno</b>	Nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	nd	nd	0,03	>0,7	0,05



**Figura V.9 - Perfil descritivo das Sondagens/Poços de Monitoramento instalados (novembro/2006)**

Já as amostras de água com concentrações no nível de intervenção, segundo as diretrizes da lista orientadora da FEEMA, foram encontradas nos poços PM-02 e PM-03 para o composto benzeno; PM-10 e PM-12 para os compostos benzeno, etilbenzeno e naftaleno; PM-11 para os compostos etilbenzeno e naftaleno; PM-13 para os compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos e naftaleno e PM-14 para os compostos benzeno, etilbenzeno, xilenos e naftaleno. As amostras coletadas nos poços PM-03, PM-11, PM-12, PM-13 e PM-14 apresentaram concentrações de benzeno classificadas acima dos níveis-alvo calculados (SSTLs) para este composto (140 µg/L).

Os demais resultados apresentaram concentrações de BTX e PAH's abaixo do nível de intervenção da lista orientadora utilizada e/ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho utilizado pelo laboratório. Os resultados analíticos das amostras de água são apresentados nas tabelas V.8 (coletada em outubro/2006) e V.10 (coletada em novembro/2006).

Conforme apresentado nas tabelas os resultados para as amostras de água estão acima do SSTL permitido, calculado pela análise de risco RBCA TIER 2 feita em setembro de 2005. Portanto, deverá ser feita a remediação do solo e da água subterrânea do empreendimento.

**Tabela V.9 - Resultados Analíticos das Amostras de Solo (novembro/2006)**

Compostos	S-01 3,5m	S-03 3,0m	S-04 3,5m	S-05 3,5m	Limite de Detecção	SSTL	Valores Orientadores (µg/kg)		
	ASAT- 01	ASAT- 03	ASOT- 04	ASAT- 05		Solo	Referência	Alerta	Intervenção
<b>BTX (µg/kg)</b>									
<b>Benzeno</b>	nd	nd	nd	nd	1,0	0,14	50,0	530,0	1000,0
<b>Tolueno</b>	nd	nd	nd	nd	1,0	25,00	50,0	65000,0	130000
<b>Etilbenzeno</b>	nd	nd	nd	nd	1,0	77,00	50,0	25000,0	50000,0
<b>Xilenos</b>	nd	nd	37,0	5,0	1,0	18000,00	50,0	12500,0	25000
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>									
<b>Naftaleno</b>	0,33	nd	1,70	1,12	0,01	26000,00	-	-	-
<b>Fenantraceno</b>	nd	nd	0,01	nd	0,01	>201,00	-	-	-
<b>Antraceno</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	NC	-	-	-
<b>Fluoranteno</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	>70,00	-	-	-
<b>Criseno</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	2,50	-	-	-
<b>Benzo(a)antraceno</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	3,90	-	-	-
<b>Ben-</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	39,00	-	-	-
<b>Benzo(a)pireno</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	0,39	-	-	-
<b>Indeno(1,2,3-</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	3,90	-	-	-
<b>Benzo(g,h,i)perileno</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	>10,00	-	-	-
<b>PAH TOTAL</b>	0,33	nd	1,71	1,12	-	-	1,00	20,50	40,00

nd: não detectado

NC - não calculado

">" indica concentrações maiores que o valor de saturação residual do composto

**Valores na faixa de Intervenção da Lista Orientadora da FEEMA.**

**Valores acima do SSTL.**

Tabela V.10 - Resultados Analíticos das Amostras de Água (novembro/2006)

Compostos	PM-11	PM-12	PM-13	PM-14	Limite de Detecção	SSTL	Valores Orientadores
	AAAP-01	AAAP-03	AAAP-04	AAAP-05		Água	Intervenção
<b>BTX (µg/L)</b>							
<b>Benzeno</b>	nd	1088,60	555,20	1751,00	0,1	140,0	5,00
<b>Tolueno</b>	0,90	16,40	5745,00	164,30	0,1	24000,0	170,00
<b>Etilbenzeno</b>	324,30	366,40	1874,00	2142,00	0,1	58000,0	200,00
<b>Xilenos</b>	45,40	228,70	5765,00	6114,00	0,1	>198000	300,00
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>							
<b>Naftaleno</b>	77,15	125,05	293,50	86,08	0,03	>31000	70,00
<b>Fenantraceno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	>2000	5,00
<b>Antraceno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	NC	5,00
<b>Fluoranteno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	>0,206	1,00
<b>Criseno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	1,7	0,05
<b>Benzo(a)antraceno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	>5,7	0,50
<b>Benzo(k)fluorantreno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	>4,30	0,05
<b>Benzo(a)pireno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	>1,6	0,70
<b>Indeno(1,2,3-cd)pireno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	0,84	0,05
<b>Benzo(g,h,i)perileno</b>	nd	nd	nd	nd	0,03	>0,7	0,05

nd: não detectado

NC - não calculado

">" indica concentrações maiores que o valor de saturação residual do composto

Valores na faixa de Intervenção da Lista Orientadora da FEEMA.

Valores acima do SSTL.

### V.2.3. Análise de Risco

A Análise de Risco RBCA TIER 2 realizada segue a metodologia RBCA, estabelecida através das normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*) E-1739/1995 e ASTM PS-104/98, que é amplamente utilizada pelas autoridades ambientais dos Estados Unidos da América para o gerenciamento de áreas contaminadas, tendo sido desenvolvidas adaptações desta metodologia para as condições específicas de cada região ou estado daquele país e de outros países como o Canadá, Austrália e União Européia. No Brasil, esse instrumento tem sido aplicado e é aceito por diferentes órgãos ambientais.

A Análise de Risco nos moldes *RBCA (Risk-Based Corrective Action)* é utilizada em casos de investigação e remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, com o objetivo de priorizar as ações, de acordo com os riscos que representam aos receptores (residentes, trabalhadores, corpos d'água, etc.) suscetíveis à contaminação. É uma ferramenta auxiliar na tomada de decisões relacionadas à alocação de recursos, à necessidade de remediação, à urgência de ações corretivas, aos níveis de remediação aceitáveis e às alternativas tecnológicas aplicáveis tendo como objetivo principal a proteção da saúde humana e meio ambiente.

O risco é calculado através de uma modelagem matemática onde são simulados os efeitos da presença dos contaminantes nos solos e águas subterrâneas sobre os ocupantes do sítio, levando-se em consideração a forma de utilização da área (residencial ou comercial). Através do *software RBCA Tool Kit for Chemical Releases* é calculado o risco de toxicidade (coeficiente de periculosidade), que permite fazer uma estimativa da taxa de exposição a que os ocupantes do sítio estão expostos, comparando-se os resultados com os valores máximos toleráveis. Admite-se como tolerável o índice 1, e valores acima deste configuram um risco de toxicidade. O risco de carcinogenicidade fica caracterizado quando as concentrações dos contaminantes presentes são superiores a  $1 \times 10^{-5}$ , ou seja, que esta contaminação eleve a incidência natural da carcinogenicidade de 1 caso em uma população de 100.000 indivíduos.

Caso a análise conclua que o risco é real e fiquem caracterizadas as vias de exposição, será necessária a implantação de um sistema de remediação que reduza os teores dos contaminantes presentes a níveis que não ofereçam risco ou a implementação de medidas mitigatórias, que descaracterizem as vias de exposição.

### **a) Metodologia Utilizada**

A modelagem utilizada está de acordo com as metodologias desenvolvidas pela ASTM (EUA), com base nas normas ASTM E-1739: *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites* (1995) e ASTM-PS-104: *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action* (1998). Para a modelagem foi utilizado o programa *RBCA Tool Kit for Chemical Releases*, versão 1.3.a da *Groundwater Services, Inc.* O RBCA integra as práticas de Análise de Risco da *Environmental Protection Agency (EPA)* com as atividades de investigação e remediação para a determinação de medidas eficazes para a proteção da saúde humana, e preliminarmente dos recursos do meio ambiente. Este software simula o quanto de contaminante potencial pode atingir um receptor ocupante do sítio, assim incrementando o risco de carcinogenicidade e toxicidade. Desta forma, para desenvolvimento do modelo, faz-se necessário o levantamento dos dados: Caracterização das vias de exposição, caracterização das cercanias, concentração dos contaminantes (BTX e PAH) nos solos e águas subterrâneas e identificação do modelo de transporte mais adequado ao cenário criado.

Como resultado desta modelagem, obtêm-se os Níveis-Alvo Específicos da Área (SSLs), ou seja, as concentrações máximas dos compostos de interesse a serem atingidas pelos métodos de remediação.

Para a elaboração deste estudo, considerou-se que a área permanecerá nos aspectos gerais com a configuração atual. Caso haja mudanças da utilização da área, deverá ser elaborado um novo estudo considerando o novo cenário.

### **b) Fatores de Exposição e Risco**

Foram utilizados os parâmetros de exposição definidos no “Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas” (CETESB, 2005), e no relatório “Ações Corretivas Baseadas em Risco Aplicadas a Áreas Contaminadas com Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo e Outros Contaminantes Líquidos” (CETESB & GTZ, 2001). O limite de risco considerado aceitável para compostos carcinogênicos é de  $1 \times 10^{-5}$ , e para efeitos tóxicos é considerado o fator de risco de 1 (*Hazard Quotient* e *Hazard Index*).

### **c) Parâmetros Específicos de Solo, Água Subterrânea e Ar**

Os parâmetros físicos do solo foram obtidos através do ensaio geotécnico realizado por laboratório, para verificação dos seguintes parâmetros: teor de umidade, matéria orgânica,

porosidade total, porosidade efetiva e granulometria, coletados na zona não saturada próximo a edificação. A tabela V.11 apresenta os resultados dos parâmetros geotécnicos utilizados.

**Tabela V.11 - Parâmetros Físicos do Solo**

Parâmetros	Unidades	Resultados
Massa Específica Real	g/cm <sup>3</sup>	2,688
Massa Específica Aparente Úmida	g/cm <sup>3</sup>	1,791
Massa Específica Aparentemente	g/cm <sup>3</sup>	1,704
Umidade	%	5,12
Matéria Orgânica	%	0,89
Porosidade Total	%	36,62
Porosidade Efetiva	%	33,37

Fonte: LSC - Laboratório de Análise de Solos e Concretos Ltda.

Para os parâmetros relacionados às águas subterrâneas, foram considerados alguns valores *default* do programa e para os parâmetros específicos de ar, foram considerados todos os valores *default* do programa. Os demais dados referentes ao solo, água subterrânea e ar foram utilizados do *default* do programa.

#### **d) Concentração dos Contaminantes nos Solos e Águas Subterrâneas**

As concentrações dos contaminantes nos solos e águas subterrâneas são os principais fatores considerados nesta modelagem, sendo utilizadas as maiores concentrações de cada parâmetro detectados no laboratório. Os compostos não detectados nas análises químicas também foram incluídos como compostos de interesse, em concentrações correspondentes ao limite de detecção mínimo. Para elaboração desta análise de risco, foram consideradas as maiores concentrações medidas em solo e água subterrânea, obtidos na campanha de setembro de 2005, em função da necessidade de reamostragem em virtude de um vazamento.

#### **e) Fluxograma das Vias de Exposição**

Os dados obtidos permitiram traçar o fluxograma fonte → receptor (Apêndice A4). As fontes são os solos superficial e subsuperficial e águas subterrâneas contaminados, sendo considerados os mecanismos de transporte por erosão eólica, volatilização através da dispersão atmosférica e acumulação em espaço fechado e lixiviação do solo com transporte pelas águas subterrâneas. Os meios de exposição e potenciais receptores definidos para o sítio são:



- contato dermal e ingestão de solo superficial contaminado, por trabalhadores de construção e por receptores comerciais (frentistas e funcionários da administração do empreendimento), a partir de obras no empreendimento, que envolvam escavação no solo e solo exposto na área;
- inalação de vapores e/ou particulados em ambiente aberto por trabalhadores de construção e por receptores comerciais, a partir de solo e água subterrânea contaminada – em função da pavimentação e presença de canteiro;
- inalação de vapores e/ou particulados em ambiente aberto por receptores residenciais, a partir de água subterrânea contaminada – em função da presença de solo exposto na área residencial ao lado da área-fonte;
- inalação de vapores em ambiente fechado, por receptores comerciais (*on site*) e residenciais (*off site*), a partir de água subterrânea contaminada, devido às concentrações na água subterrânea;
- e recreação em corpo hídrico (Mar), por receptor residencial, a 50 metros da área-fonte.

#### **f) Resultados da Análise de Risco**

A modelagem realizada indicou a existência de risco carcinogênico e tóxico à saúde humana, para a via de exposição de inalação em ambiente confinado. O risco carcinogênico individual calculado e cumulativo foi de  $8,7 \times 10^{-5}$ , acima do limite considerado de  $1 \times 10^{-5}$ . O risco tóxico individual e cumulativo calculado foi de 3,2 acima do risco permitido de 1,0.

A comparação entre os teores máximos existentes no solo e os valores *SSTL* calculados mostra que, nos pontos investigados, as concentrações não representam risco à saúde humana a partir de solo. Comparando os valores máximos presentes nas águas subterrâneas com os valores *SSTL* calculados verifica-se que, o risco existente está nas concentrações de benzeno, onde o valor observado para este composto (1,2 mg/L) ultrapassa o *SSTL* calculado ( $1,4 \times 10^{-1}$  mg/L) em 8,9 vezes para a via de exposição em inalação em ambiente fechado.

### **V.3. Remediação da Contaminação**

Uma vez constatada a contaminação do sítio, deverão ser tomadas medidas para a descontaminação constituindo o Processo de Remediação. Este processo pode usar um ou mais métodos de remediação e, após a descontaminação, deverá ser feito periodicamente o monitoramento para verificar se não houve nova contaminação.

Conforme o cenário apresentado pelo posto, em uma primeira instância, foi feita a contenção hidráulica para o tratamento e a redução das concentrações de hidrocarbonetos em fase livre e/ou dissolvida nas águas subterrâneas, usando um sistema *Pump and Treat*. Também foi feito um acompanhamento da retirada dos tanques existentes e foi constatada a necessidade da segregação do solo. Num segundo momento houve a necessidade da aplicação da técnica de Oxidação Química para redução ainda maior do nível dos contaminantes, devido a exigências da FEEMA.

### **V.3.1. Retirada dos Tanques**

O processo de retirada dos tanques de armazenamento de combustíveis TQ-01 ao TQ-08 foi feito em dezembro de 2006. Antes da retirada dos tanques do empreendimento, os mesmos foram tornados inertes através dos processos de lavagem com hidrojateamento e sucção com caminhão a vácuo, seguido de introdução de gelo seco e, posteriormente, de nitrogênio. A explosividade dos tanques foi avaliada com o explosímetro e com o GASTECH. Todos os tanques apresentaram medições de explosividade de 0% LEL.

Durante a retirada dos tanques, o solo proveniente das cavas (o subsolo é composto predominantemente por areia fina à média) foi avaliado quanto à contaminação através da avaliação dos compostos orgânicos voláteis (VOC). As medições de VOC tiveram como finalidade determinar e quantificar sua presença no subsolo local da área investigada, objetivando a segregação do solo limpo e do solo contaminado. As análises de VOC foram realizadas utilizando-se aparelho que detecta e quantifica, por correlação com a explosividade, os hidrocarbonetos voláteis de baixo peso molecular, típicos de derivados leves (combustíveis, solventes, nafta etc.).

Para a medição de VOC do solo dos tanques, foram realizadas coletas de todas as cavas dos tanques e em várias localizações diferentes, desde a camada mais superficial de solo até o fundo da cava. As amostras de solo eram segregadas, sendo considerado como padrão para um solo limpo concentrações de VOC inferiores a 500 ppm. Constatou-se que, de uma maneira geral, as amostras mais superficiais não apresentavam concentrações elevadas de VOC, no entanto, as concentrações de VOC foram aumentando com o aprofundamento das cavas. As áreas dos tanques mais contaminadas estavam localizadas nas cavas do TQ-02, TQ-03 e TQ-05, sendo que a área localizada entre estes dois últimos tanques foi a que apresentou maior contaminação, avaliada através de análises de VOC do solo coletado em horizontes a cada 0,5m. Foi observada uma concentração máxima de 6.490 ppm de VOC nas amostras de

solo coletadas, mas esta foi uma amostra pontual. A maioria das amostras segregadas para posterior tratamento apresentou concentrações entre 500 e 1760 ppm.

Não foi observada a presença de hidrocarbonetos em fase livre no fundo das cavas dos tanques. Durante a remoção dos tanques (Figura V.10), foram verificadas as boas condições de conservação dos tanques de armazenamento subterrâneo de combustíveis, que não apresentavam furos ou sinais de oxidação em sua superfície externa, não sendo observado vazamento de produto. Neste processo foram inutilizados os poços PM-07 e PM-10.



**Figura V.10 – Retirada dos Tanques de Armazenamento do empreendimento**

### **V.3.2. Gerenciamento do Solo Contaminado**

O solo segregado sofreu medidas de mitigação da contaminação através de aeração manual, visando à volatilização dos contaminantes adsorvidos. O gerenciamento do solo foi realizado tomando-se alguns cuidados para evitar contaminação de outras áreas do empreendimento e das cercanias, e com monitoramento do ar ambiente. Desta forma, a área escolhida para a disposição do solo contaminado e realização da aeração manual foi ao lado da área de abastecimento do empreendimento, devido a pavimentação de concreto estar em boas condi-

ções, o que evita a lixiviação do solo sobreposto ao pavimento que poderia alcançar o subsolo local. O ar ambiente foi monitorado utilizando-se como parâmetro a análise dos VOCs, que foram avaliados em diversos pontos do empreendimento, durante a realização do serviço. Em nenhum momento as medições de VOCs do ar ambiente na área do empreendimento foram superiores a 10 ppm. Caso a análise de VOC indicasse níveis de explosividade iguais ou superiores a 1%, a aeração do solo seria temporariamente suspensa. Foram realizadas medições de VOC no solo contaminado antes e após o período de aeração. O solo que atingia concentrações de VOC superiores a 500 ppm era segregado dentro da área do empreendimento.

### V.3.3. Coleta das Amostras de Solo

Foram coletadas amostras de solo no fundo das cavas e as áreas de interesse para amostragem de solo foram selecionadas com base nos resultados das informações levantadas em campo, durante a retirada de tanques, através das análises de VOC. Foram coletadas quatro amostras com a utilização de trado manual de 4" de diâmetro nos pontos denominados S-01, S-02, S-03 e S-04, com profundidade de 3,5m a partir do nível do pavimento com o objetivo de se avaliar a contaminação do subsolo local próximo à franja capilar.

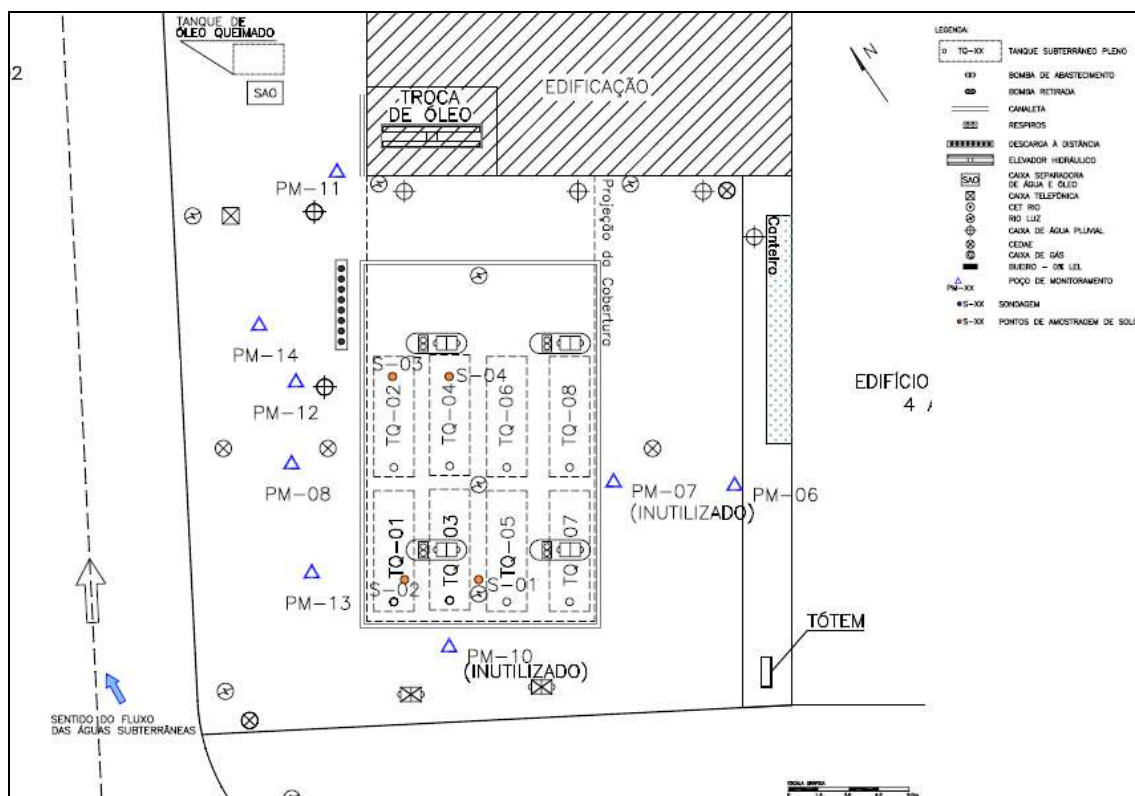


Figura V.11 - Localização dos Pontos de Amostragem do Solo

O objetivo da coleta de solo foi investigar o horizonte do subsolo teoricamente mais contaminado (franja capilar), que estava localizado no fundo das cavas dos tanques TQ-02 e nas proximidades (TQ-04), além do fundo da cava do tanque TQ-01 e entre os tanques TQ-03 e TQ-05, na profundidade de 3,5m, cujos resultados das análises de VOC, apresentaram as maiores concentrações em comparação com os resultados obtidos no fundo das cavas dos demais tanques. A localização das sondagens executadas e os pontos de coleta das amostras de solo encontram-se na figura V.11.

Os resultados laboratoriais das amostras de solo verificaram que todas as amostras apresentaram concentrações dos compostos BTX e PAH abaixo do nível de intervenção da lista orientadora da FEEMA (Tabela V.2) e abaixo dos SSTL's indicados (Tabela V.6).

**Tabela V.12 - Resultados Analíticos das Amostras de Solo**

Compostos	S-01	S-02	S-03	S-04	Limite de Detecção	SSTL	Valores Orientadores
	ASAP-01	ASAP-02	ASAP-03	ASAP-04			Intervenção
<b>BTEX (µg/kg)</b>							
<b>Benzeno</b>	nd	nd	nd	nd	1,0	140	1000,0
<b>Tolueno</b>	nd	nd	8	6	1,0	25000	130000
<b>Etilbenzeno</b>	nd	nd	2	nd	1,0	77000	50000,0
<b>Xilenos</b>	nd	nd	163,0	1281,0	1,0	18000000	25000
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>							
<b>Naftaleno</b>	nd	nd	3,02	4,27	0,01	26000,00	-
<b>Fenantraceno</b>	nd	nd	0,01	0,70	0,01	>201,00	-
<b>Antraceno</b>	nd	nd	nd	0,45	0,01	NC	-
<b>Fluoranteno</b>	0,02	nd	nd	nd	0,01	>70,00	-
<b>Criseno</b>	0,01	nd	nd	nd	0,01	2,50	-
<b>Benzo(a)antraceno</b>	nd	nd	nd	nd	0,01	3,90	-
<b>Ben-</b>	0,02	nd	nd	nd	0,01	39,00	-
<b>Benzo(a)pireno</b>	0,01	nd	nd	nd	0,01	0,39	-
<b>Indeno(1,2,3-</b>	0,01	nd	nd	nd	0,01	3,90	-
<b>Benzo(g,h,i)perileno</b>	0,,01	nd	nd	nd	0,01	>10,00	-

### V.3.4. Instalação do Sistema de Remediação

Para remediar a água subterrânea contaminada foi instalado um sistema de saneamento do lençol freático do tipo *Pump & Treat* de alta vazão, com a finalidade de efetuar o rebaixamento do lençol freático e a remoção de contaminantes em fase dissolvida existente, através do bombeamento nos poços PP-01 a PP-30. O método de rebaixamento do lençol freático foi

realizado utilizando-se poços-ponteira que é um tipo de sistema de rebaixamento do lençol freático mais simples, empregado para qualquer tipo de solo e rebaixamento do lençol de até 4 metros. São instalados no subsolo, ao redor da área a ser rebaixada, ponteiras drenantes ligadas a tubos de subida que são conectados aos tubos coletores que circundam a área. Estes coletores chegam até uma bomba a vácuo que recalca a água recolhida do subsolo para fora da área a rebaixar.

Os poços-ponteira foram abertos objetivando a instalação de um sistema de saneamento do lençol freático local. Na área da cava, foram instalados vinte e oito poços-ponteira (PP-01 a PP-28), utilizando-se o jateamento de água para abrir espaço suficiente no subsolo a fim de introduzir os poços. Fora da área da cava foram instalados dois poços-ponteira, aproveitando os PM-13 (PP-29) e PM-14 (PP-30). A boca destes PM's foram seladas, com a finalidade de realizar o vácuo necessário, e foram instalados os tubos de subida conectados aos tubos coletores. A profundidade final dos poços-ponteira (PP-01 a PP-30) instalados no interior da cava ou fora dela foi de aproximadamente 5,5 m. Durante os serviços realizados não foi observada a presença de hidrocarbonetos em fase livre nos poços instalados. A localização dos poços de monitoramento pré-existent e dos poços ponteira instalados encontram-se na figura V.12.

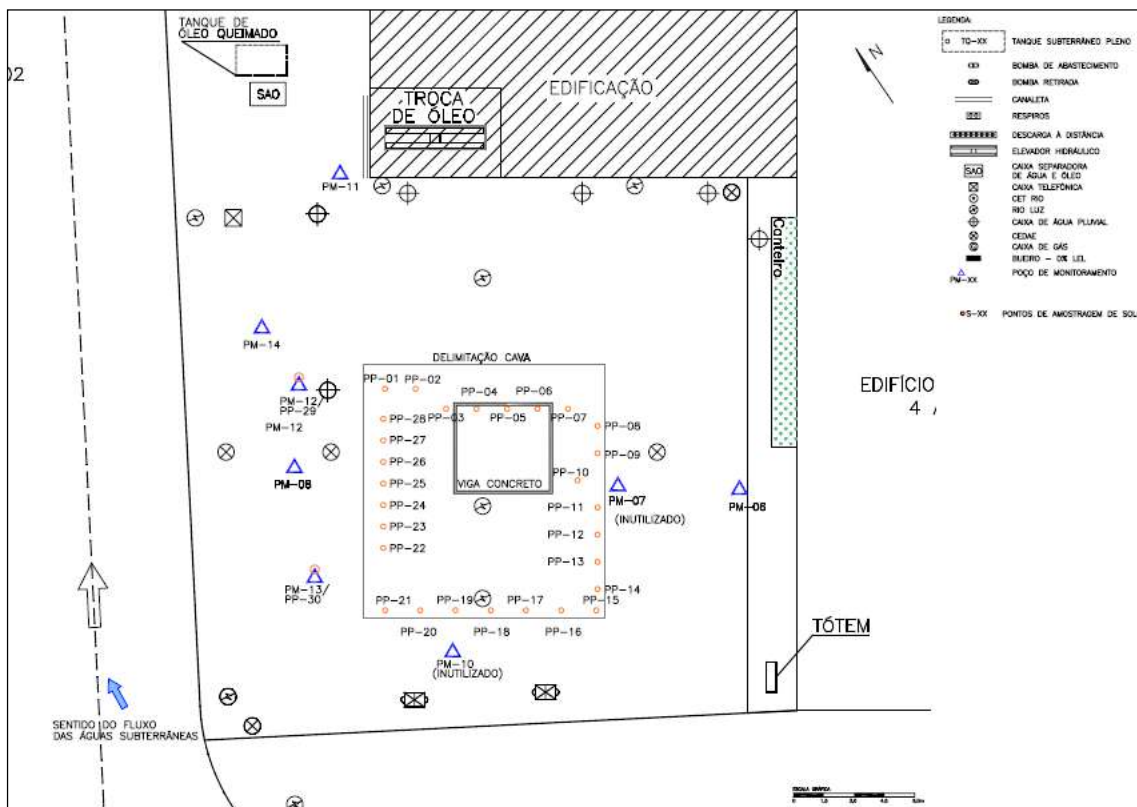
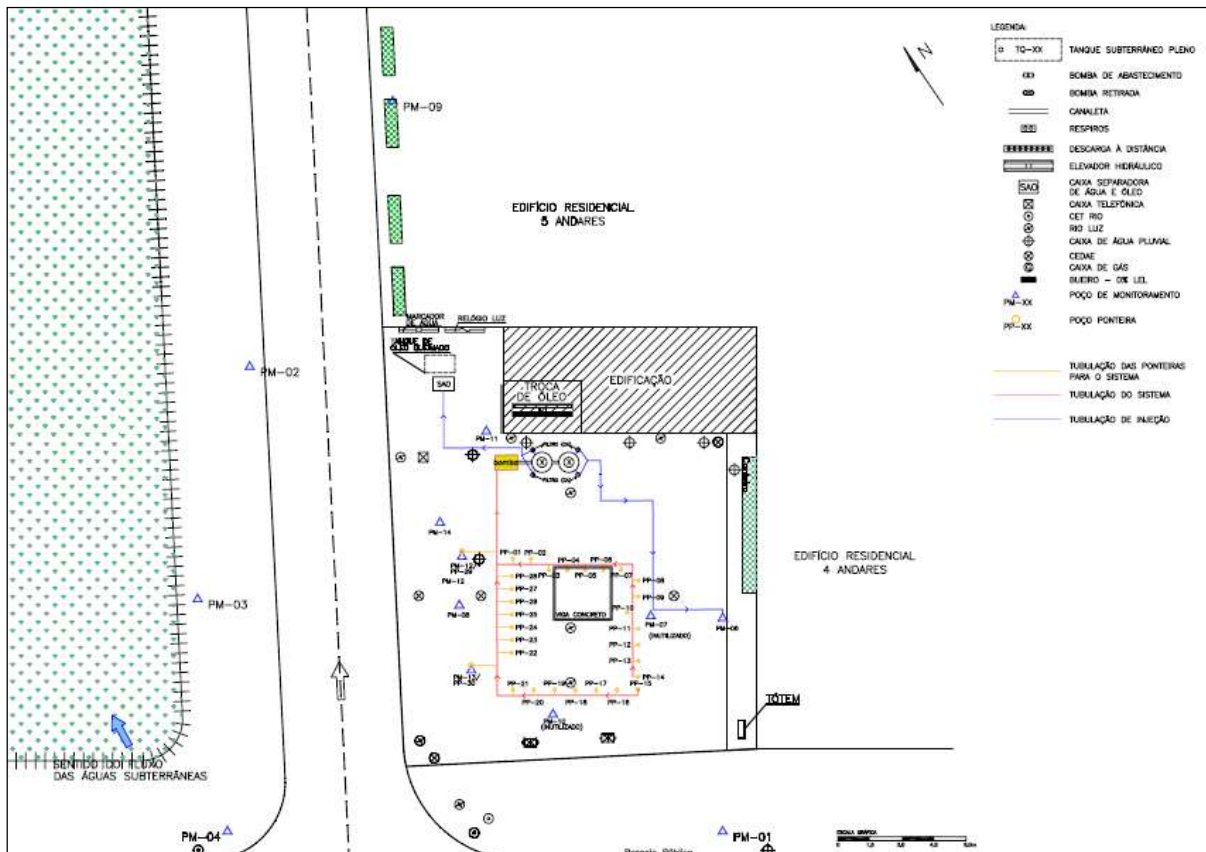


Figura V.12 - Localização dos Poços Ponteiras instalados

Os efluentes bombeados são direcionados, inicialmente, para um sistema de caixas d'água cujo objetivo é o armazenamento da água subterrânea bombeada para a superfície. Posteriormente a água com hidrocarbonetos em fase dissolvida é destinada para um sistema de filtros de carvão ativado, favorecendo a adsorção dos contaminantes e redução das concentrações presentes. Após passar por este sistema, a água é direcionada para reinjeção no lençol freático no poço PI-01 e na caixa SAO do empreendimento. A planta baixa do sistema de saneamento do lençol freático é apresentada na figura V.13.



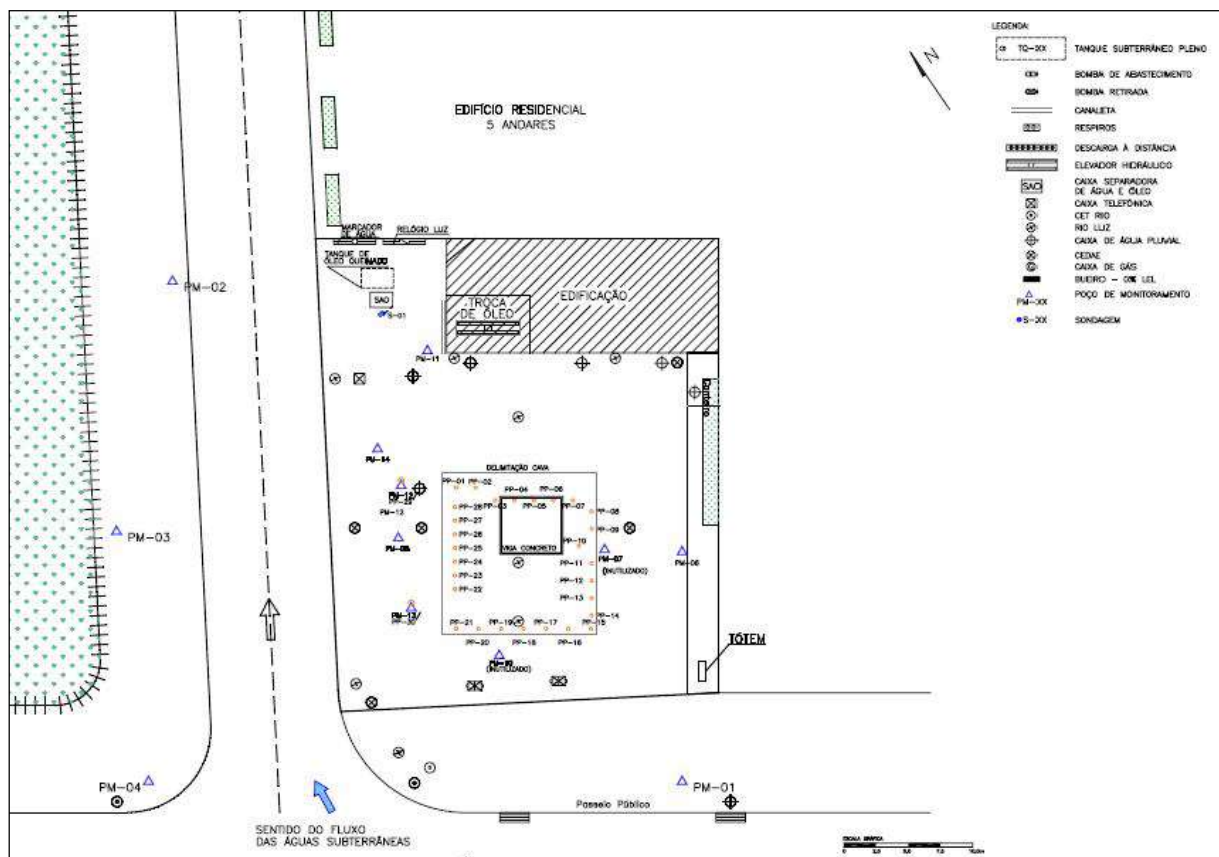
**Figura V.13 - Planta baixa do Sistema de Saneamento do Lençol Freático**

Durante a operação do sistema são coletadas, com frequência quinzenal, amostras de água na saída do filtro compartimentado para análises dos parâmetros de BTX e PAH, visando à constatação da eficiência do sistema e o acompanhamento da evolução do processo de redução das concentrações e adicionalmente amostras de água para análises laboratoriais dos parâmetros de BTX e PAH em determinados poços do empreendimento, inicialmente com frequência mensal, para acompanhamento da evolução do processo de redução das concentrações destes compostos no lençol freático local.

### V.3.5. Operação do Sistema de Remediação

Após o primeiro mês de operação do sistema, em fevereiro de 2007, foram realizadas coletas de solo e água subterrânea para verificar a contaminação ainda existente no local. Inicialmente foi realizada uma sondagem S-01 nas proximidades do antigo tanque de óleo queimado do empreendimento, visando investigar a possibilidade de ocorrência de vazamentos deste produto no solo e aquífero freático local. Foram coletados amostras de solo e de água subterrânea no ponto da sondagem, para análises dos parâmetros BTX, PAH e Metais.

O resultado da campanha de VOC revelou um perfil nulo ao longo da sondagem até a profundidade de 3,0 m. e no horizonte de 3,5 m a análise de VOC apontou para uma concentração de 100 ppm. A localização da sondagem executada encontra-se na figura V.14



**Figura V.14 - Localização da Sondagem executada (fevereiro/2008)**

O resultado da amostra de solo coletada na sondagem indicou concentrações de BTX, PAH, TPH e Metais abaixo dos níveis de intervenção das listas orientadoras utilizadas ou abaixo dos limites de detecção do método/aparelho utilizado pelo laboratório. A amostra de água subterrânea indicou apenas concentrações de etilbenzeno, naftaleno e TPH classificadas acima dos níveis de intervenção da lista orientadora da FEEMA. Os demais compostos de BTX, PAH e Metais apresentaram concentrações classificadas abaixo dos níveis de interven-



ção. As amostras de solo e água subterrânea coletadas apresentaram concentrações de BTX e PAH inferiores aos *SSTL*'s calculados na Análise de Risco RBCA TIER 2.

Nesta mesma campanha, foram coletadas sete amostras de solo segregado, após a aeração manual e constatação de concentrações de VOC abaixo de 500 ppm, visando sua reutilização para recomposição da cava aberta no empreendimento na antiga área de tancagem. Os resultados para os parâmetros de BTX e PAH destas amostras indicaram concentrações abaixo dos limites de intervenção da lista da FEEMA ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho utilizado.

Foram coletadas amostras de água nas duas saídas do sistema de filtragem e também de água subterrânea proveniente dos poços PM-02, PM-03, PM-06, PM-11, PM-13, PM-14 e PP-19, com o objetivo de avaliar e monitorar a eficiência do sistema de tratamento de hidrocarbonetos em fase dissolvida no lençol freático. As amostras das duas saídas do sistema de filtragem apresentaram concentrações dos parâmetros BTX e PAH abaixo dos níveis de intervenção da lista da FEEMA ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho, com exceção do composto benzeno, que apresentou concentrações acima do nível de intervenção. Por isso foi realizada a manutenção do sistema de filtragem, através de troca do carvão ativado dos filtros e aumento da quantidade de carvão ativado utilizado no seu interior. No mês seguinte houve uma nova coleta dessas amostras e a saída do filtro 1 apresentou concentrações de BTX e PAH classificadas abaixo dos níveis de intervenção da lista utilizada e a amostra coletada na saída de filtro 2 apresentou apenas a concentração de benzeno acima do nível de intervenção. Todas as amostras apresentaram concentrações inferiores aos *SSTL*'s calculados pela Análise de Risco RBCA TIER 2.

Para as amostras coletadas nos poços existentes, as que apresentaram concentrações acima do nível de intervenção da lista da FEEMA foram às coletadas nos poços PM-02, para os compostos benzeno, etilbenzeno, xilenos e naftaleno; PM-03, PM-06 e PM-13 para o composto benzeno; PM-11 para o composto etilbenzeno; PM-14 para os compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos. As amostras coletadas nos poços PM-03 e PM-13 apresentaram concentrações de benzeno classificadas acima dos níveis-alvo *SSTL*'s calculados para este composto (140 µg/L). Os demais resultados apresentaram concentrações de BTX e PAH abaixo do nível de intervenção e/ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho.

Os resultados obtidos para Metais no solo e nas águas subterrâneas foram comparados com a lista de valores orientadores da CETESB (2005) (Tabela V.13).

**Tabela V.13 – Valores orientadores para Solo e para Água no Estado de São Paulo**

METAIS	Valores Orientadores					
	Solos (mg/kg)					Água (µg/L)
	Referência	Prevenção	Intervenção			Intervenção
			Agrícola	Residencial	Industrial	
<b>Arsênio - As</b>	35	15,00	35,00	55,00	150,00	10,00
<b>Bário - Ba</b>	75	150,00	300,00	500,00	750,00	700,00
<b>Cádmio - Cd</b>	<0,5	1,30	3,00	8,00	20,00	5,00
<b>Chumbo - Pb</b>	17	72,00	180,00	300,00	900,00	10,00
<b>Cromo - Cr</b>	40	75,00	150,00	300,00	400	50,00
<b>Mercúrio - Hg</b>	0,05	0,5	12	36	70	1,00
<b>Prata - Ag</b>	0,25	2	25	50	100	50,00
<b>Selênio - Se</b>	0,25	5,00	-	-	-	10,00

Fonte: Cetesb 2005

No mês de março de 2007 foram coletadas amostras de água nas duas saídas do sistema de filtragem, além dos poços PM-02, PM-03, PM-04, PM-11, PM-12, PM-13, PM-14, PP-04, PP-11, PP-18 e PP-23, objetivando ainda a avaliação e monitoramento da eficiência do sistema de tratamento de hidrocarbonetos em fase dissolvida no lençol freático. Os parâmetros analisados foram BTX e PAH nos poços PM-11, PM-12, PM-13 e PP-11 e comparados com a lista de valores da FEEMA (Tabela V.2). As amostras da saída do sistema de filtragem desta vez apresentaram concentrações dos parâmetros BTX e PAH abaixo dos níveis de intervenção da lista da FEEMA ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho e os resultados para os poços apontaram concentrações de Benzeno (PM-02, PM-03, PM-12, PM-13, PM-14 e PP-23), Tolueno (PM-14), Etilbenzeno (PM-02, PM-03, PM-11, PM-12 e PM-14), Xilenos (PM-12 e PM-14), Naftaleno (PM-02, PM-11 e PM-12), acima dos níveis de intervenção da lista. Os demais resultados apresentaram concentrações de BTX, PAH abaixo do nível de intervenção da lista e/ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho. Em comparação com os níveis-alvo, nenhuma das amostras apresentaram concentrações de BTX e PAH superiores aos *SSTL*'s calculados na análise de risco RBCA TIER 2.

Diante dos resultados analíticos apresentados nas tabelas V.14 (1ª e 2ª parte), podemos concluir que o sistema de saneamento instalado foi eficiente na remoção dos hidrocarbonetos

de petróleo, dissolvidos nas águas subterrâneas da área do empreendimento e o sistema *Pump and Treat* foi retirado.

Em abril de 2007 foi retirado o tanque de óleo queimado que ainda existia no empreendimento, sendo feita apenas a coleta de amostra de solo já que não existia água do lençol freático na cava. As análises da amostra de solo revelaram concentrações abaixo do nível de referência para os compostos de BTX e PAH ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho. Nas análises para metais, apenas o composto chumbo apresentou concentração acima do valor de prevenção adotado (concentração de 81,17 mg/kg, sendo o valor orientador de prevenção da CETESB de 72,00 mg/kg), estando os demais compostos abaixo do valor de referência ou abaixo do limite de detecção do método empregado.

Em abril e julho de 2007 foram realizados monitoramentos da qualidade das águas subterrâneas que contemplaram a coleta de amostras de água em poços existentes para análises laboratoriais dos parâmetros BTX e PAH, conforme mostra a tabela V.15.

Foram observadas concentrações dos compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos e naftaleno acima dos níveis de intervenção da FEEMA, mas, todas as amostras coletadas apresentaram concentrações dos compostos de interesse inferiores aos *SSTL's* calculados para a área na análise de risco RBCA TIER 2. Desta forma, concluiu-se que não havia indícios de existência de risco para a saúde humana para os receptores considerados na análise de risco (comerciais e residenciais). Ao se comparar os resultados com o do final da remediação pode-se notar uma tendência a diminuição das concentrações dos contaminantes.

Em virtude da contaminação ainda existente na área do posto (acima do nível de intervenção da FEEMA), foi necessária a aplicação de Reagente de Fenton, técnica esta mais conhecida como Oxidação Química, já descrita no capítulo IV. Foram realizadas três campanhas de injeção do reagente. A primeira em novembro de 2007, a segunda em janeiro de 2008 e a terceira em abril de 2008. Após cada etapa de injeção de reagente de Fenton, foram realizadas coletas de amostras de água subterrânea dos poços existentes. Na primeira campanha foram coletadas amostras no PM-02, PM-03, PM-04, PM-13 e PM-14, para análise dos parâmetros BTX e PAH. Os resultados indicaram concentrações de benzeno (PM-02 e PM-13) e etilbenzeno (PM-13) classificadas acima do nível de intervenção da lista da FEEMA. Na segunda campanha foram realizadas coletas de amostras de água subterrânea nos mesmos pontos anteriormente citados para análise dos mesmos parâmetros.

**Tabela V.14 - Resultados Analíticos de Água subterrânea (Comparativo antes e ao final da Remediação pelo Sistema *Pump and Treat*) – 1ª parte**

POÇOS	COMPOSTOS																	
	Benzeno		Tolueno		Etilbenzeno		Xileno		Naftaleno		Fenantreno		Antreceno					
	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07				
PM-01	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-				
PM-02	48,40	72,50	1,30	8,50	83,90	921,70	44,60	221,40	10,58	99,06	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03				
PM-03	322,60	23,00	10,00	10,60	109,70	560,50	12,30	22,90	30,80	54,69	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03				
PM-04	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,30	2,56	30,25	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03				
PM-05	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-				
PM-06	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	-	0,03	-	<0,03	-	<0,03	-				
PM-07	-	-	<0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
PM-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
PM-09	<0,1	-	-	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,03	-	-	-	-	-				
PM-10	324,50	-	13,70	-	429,30	-	228,70	-	84,40	-	<0,03	-	<0,03	-				
PM-11	<0,1	<0,1	0,90	2,10	324,30	987,90	45,40	80,10	77,15	142,84	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03				
PM-12	1088,60	121,70	16,40	60,20	366,40	1582,50	228,70	1205,90	125,05	137,16	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03				
PM-13	555,2	110,50	5745,00	4,00	1874,00	80,60	5765,00	74,70	293,50	59,85	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03				
PM-14	1751,00	78,90	164,30	419,00	2142,00	248,50	6114,00	438,20	86,08	37,25	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03				
PP-04	-	<0,1	-	2,10	-	0,80	-	5,10	-	4,89	-	11,63	-	<0,03				
PP-11	-	<0,1	-	<0,1	-	29,30	-	9,30	-	14,20	-	<0,03	-	<0,03				
PP-18	-	3,90	-	1,10	-	16,20	-	8,80	-	13,23	-	<0,03	-	<0,03				
PP-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
PP-23	-	70,30	-	16,60	-	102,70	-	42,90	-	7,64	-	<0,03	-	<0,03				
FEEMA	5,00	-	170,00	-	200,00	-	300,00	-	70,00	-	5,00	-	5,00	-				
SSTL	140	-	24000	-	58000	-	>198000	-	>31000	-	>2000	-	>2000	NC				

**Tabela V.14 - Resultados Analíticos de Água subterrânea (Comparativo antes e ao final da Remediação pelo Sistema *Pump and Treat*) – 2ª parte**

POÇOS	COMPOSTOS													
	Fluoranteno		Criseno		Benzo(a)antraceno		Benzo(k)fluoranteno		Benzo(a)pireno		Indeno(1,2,3-cd)pireno		Benzo(ghi)perileno	
	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07	nov/06	mar/07
PM-01	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-
PM-02	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
PM-03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
PM-04	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
PM-05	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-
PM-06	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-
PM-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PM-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PM-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PM-10	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-
PM-11	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
PM-12	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
PM-13	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
PM-14	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
PP-04	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03
PP-11	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03
PP-18	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03
PP-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-23	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03	-	<0,03
FEEMA	1,00	-	0,05	-	0,50	-	0,05	-	0,70	-	0,05	-	0,05	-
SSTL	>0,206	-	1,7	-	>5,7	-	>4,3	-	>1,6	-	0,84	-	>0,7	-

**Tabela V.15 – Resultados Analíticos Comparativos entre as Campanhas de Monitoramento de Abril e Julho de 2007**

Compostos	PM-02		PM-03		PM-04		PM-06		PM-12		PM-13		PM-14		Limite de Detecção	SSTL Água	Valores Orientadores Intervenção
	abr/07	jul/07	abr/07	jul/07	abr/07	jul/07	abr/07	jul/07	abr/07	jul/07	abr/07	jul/07	abr/07	jul/07			
<b>BTEX (µg/l)</b>																	
Benzeno	13,4	75,0	35,60	120,50	-	nd	3,30	-	15,40	-	28,10	120,90	54,70	116,20	0,1	140,0	5,00
Tolueno	15,10	6,70	15,00	3,20	-	nd	1,80	-	45,60	-	19,60	2,60	525,30	787,70	0,1	24000,0	170,00
Etilbenzeno	527,90	267,40	523,60	66,10	-	nd	0,90	-	707,80	-	644,90	75,30	423,10	500,60	0,1	58000,0	200,00
Xilenos	357,50	124,10	23,90	8,30	-	nd	2,50	-	721,20	-	388,60	108,70	1000,60	1025,10	0,1	>198000	300,00
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>																	
Naftaleno	91,07	50,76	60,18	40,28	-	2,46	71,95	-	22,50	-	56,75	8,31	1,14	75,93	0,03	>31000	70,00
Fenantraceno	nd	nd	nd	0,03	-	nd	0,05	-	0,04	-	0,03	0,19	nd	0,12	0,03	>2000	5,00
Antraceno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	0,04	nd	nd	0,03	NC	5,00
Fluoranteno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	nd	nd	nd	0,03	>0,206	1,00
Criseno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	nd	nd	nd	0,03	1,7	0,05
Benzo(a)antraceno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	nd	nd	nd	0,03	>5,7	0,50
Benzo(k)fluorantraceno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	nd	nd	nd	0,03	>4,30	0,05
Benzo(a)pireno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	nd	nd	nd	0,03	>1,6	0,70
Indeno(1,2,3-cd)pireno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	nd	nd	nd	0,03	0,84	0,05
Benzo(g,h,i)perileno	nd	nd	nd	nd	-	nd	nd	-	nd	-	nd	nd	nd	nd	0,03	>0,7	0,05

Os resultados indicaram concentrações de benzeno (PM-02 e PM-14) e xilenos (PM-14) classificadas acima do nível de intervenção da lista da FEEMA. Todas as amostras coletadas apresentaram concentrações de BTX e PAH inferiores aos SSTL's calculados na análise de risco RBCA TIER 2. Na terceira campanha não foram coletadas amostras de água com a finalidade de se realizar um monitoramento futuro para averiguação.

Em junho de 2008 foi feito um novo monitoramento da qualidade das águas subterrâneas em que foram coletadas amostras de água nos poços PM-01, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06, PM-08, PM-11, PM-12, PM-13, PM-14, PM-14a, PM-15, PM-16 e PM-18 para análises laboratoriais dos parâmetros BTX e PAH. As amostras de água subterrânea quando comparadas aos SSTL's calculados pela Análise de Risco RBCA TIER 2, apresentaram concentrações de BTX e PAH inferiores aos níveis-alvo e também abaixo do nível de intervenção da lista da FEEMA, ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho, conforme apresentado nas tabela V.16 (1ª e 2ª parte), onde podemos comparar as concentrações encontradas ao final da remediação utilizando o *Pump and Treat* e ao final da Oxidação Química em junho.

Por exigência da FEEMA foram feitas mais duas campanhas de monitoramento (dezembro/2008 e março/2009) para confirmar que os níveis das concentrações dos contaminantes estavam abaixo do nível exigido. Todas as amostras de água subterrânea coletadas apresentaram concentrações dos compostos BTX e PAH abaixo do nível de intervenção da lista da FEEMA, ou abaixo do limite de detecção do método/aparelho utilizado nestas duas campanhas. Assim foi encerrado o processo de descontaminação e o terreno está em processo de liberação para a construção de um edifício residencial, sem maiores riscos para a saúde dos futuros moradores.

**Tabela V.16 - Resultados Analíticos de Água subterrânea (Comparação após o Sistema de Remediação com após a Injeção de Fenton) – 1ª parte**

Compostos	PM-01		PM-02		PM-03		PM-04		PM-05		PM-06		PM-08		PM-11		Limite de Detecção	SSSTL Água	Valores Orientadores Intervenção
	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08			
<b>BTEX (µg/L)</b>																			
Benzeno	nd	nd	3,90	4,10	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3,30	nd	nd	nd	0,1	140,0	5,00
Tolueno	nd	nd	1,80	14,10	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	16,50	0,40	nd	nd	0,1	24000,0	170,00
Etilbenzeno	nd	nd	34,10	15,10	nd	nd	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	30,40	4,30	nd	nd	0,1	58000,0	200,00
Xilenos	nd	nd	76,90	122,00	1,20	<1,0	<1,0	<1,0	0,50	<1,0	<1,0	27,60	5,60	<1,0	<1,0	<1,0	0,1	>198000	300,00
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>																			
Naftaleno	0,15	nd	nd	24,86	13,14	0,71	7,48	1,43	nd	2,37	7,19	nd	0,28	0,03	>31000	70,00	0,03	>2000	5,00
Benzo(a)pireno	nd	nd	nd	0,06	0,56	0,25	0,05	0,04	nd	nd	0,23	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	NC	5,00
Ántraceno	nd	nd	nd	n	nd	0,04	<0,03	<0,03	nd	nd	<0,03	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	NC	5,00
Fluoranteno	nd	nd	nd	0,17	nd	nd	0,06	0,08	nd	nd	0,06	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	>0,206	1,00
Criseno	nd	nd	nd	n	nd	nd	0,03	0,03	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	1,7	0,05
Benzo(a)antraceno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,05	0,08	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	>5,7	0,50
Benzo(k)fluorantreno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	<0,03	0,03	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	>4,30	0,05
Benzo(a)pireno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,03	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	>1,6	0,70
Indeno(1,2,3-cd)pireno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	<0,03	0,03	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,84	0,05
Benzo(g,h,i)perileno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,03	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	>0,7	0,05



**Tabela V.16 - Resultados Analíticos de Água subterrânea (Comparação após o Sistema de Remediação com após a Injeção de Fenton) – 2ª parte**

Compostos	PM-12		PM-13		PM-14		PM-14a		PM-15		PM-16		PM-18		SSIL Água	Valores Orientadores Intervenção
	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08	mar/08	jul/08		
<b>BTEX (µg/L)</b>																
Benzeno	3,5	2,50	1,80	1,20	4,6	1,6	3,8	3,9	2,5	3,3	4,2	3,60	0,0	0,1	140,0	6,00
Tolueno	62,40	36,20	13,50	1,90	49,50	25,20	75,80	75,80	6,20	2,50	6,00	6,60	0,0	0,1	24000,0	170,00
Etilbenzeno	71,60	29,40	20,30	6,30	23,60	94,40	54,40	51,20	96,20	107,40	32,90	29,50	<1,0	0,1	58000,0	200,00
Xilenos	74,10	68,60	48,40	32,80	90,20	169,90	120,40	256,80	93,30	12,30	116,60	65,80	<1,0	0,1	>198000	300,00
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>																
Naftaleno	13,56	8,04	27,71	3,32	1,37	34,74	30,99	61,81	23,99	26,94	21,06	27,44	0,93	0,03	>31000	70,00
Fluorantreno	0,12	0,11	0,14	0,15	0,0	0,1	0,0	0,14	0,07	0,16	0,0	0,14	0,0	0,03	>2000	5,00
Acenafteeno	0,0	0,0	0,0	<0,03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<0,03	0,0	0,0	0,0	0,03	NC	5,00
Fluoranteno	0,0	<0,03	0,0	<0,03	0,0	<0,03	0,0	<0,03	0,0	<0,03	0,0	0,04	0,07	0,03	>0,206	1,00
Criseno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03	1,7	0,05
Benzo(a)antraceno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03	>5,7	0,50
Benzo(k)fluorantreno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03	>4,30	0,05
Benzo(a)pireno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03	>1,6	0,70
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03	0,84	0,05
Benzo(g,h,i)perileno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03	>0,7	0,05

## Capítulo VI – Considerações Finais

No capítulo III do presente projeto foram apresentadas as Leis e Normas Ambientais que regem os procedimentos para licenciamento e operação de postos de abastecimento na área do Estado do Rio de Janeiro. Os diversos órgãos envolvidos neste processo são: O Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que foi instituído pela Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente é o responsável pela política de meio ambiente do governo brasileiro; O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão consultivo e deliberativo, com a finalidade de assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais e deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida; Os órgãos estaduais são responsáveis pela política de proteção e licenciamento ambiental e fiscalizam o cumprimento das leis e normas ambientais nos respectivos estados. No Rio de Janeiro a responsabilidade é da FEEMA<sup>5</sup> e em São Paulo é da CETESB. As normas baixadas pela CETESB acabam sendo adotadas como padrão por vários órgãos estaduais; A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão responsável pela normalização técnica no país, fornecendo a base necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro.

Quando se trata do uso da área com finalidades residenciais a legislação ambiental apresenta padrões mais restritivos que seguem os padrões definidos pela modelagem da ASTM, que apresenta limites de concentrações específicas (SSTL - *site-specific target levels*) calculados através da análise de risco (RBCA TIER 2) para cada sítio.

Os procedimentos previstos pela legislação ambiental prevêm testes periódicos de estanqueidade e avaliações ambientais para controle de eventuais contaminações do solo e/ou das águas subterrâneas. Nesta caso não dispomos de informações sobre o cumprimento dessas normas anteriores a 2004, quando foi realizada uma avaliação ambiental preliminar que concluiu que na área do posto de abastecimento não existia contaminação. Em setembro de 2005 houve uma suspeita de vazamento que foi confirmada através do teste de estanqueidade, sendo então realizadas avaliações ambientais para identificação dos contaminantes e localização da pluma para posterior remediação do solo e da água subterrânea. Com a mudança da atividade do local (passando de comercial para residencial), houve a necessidade de novas avaliações ambientais obedecendo a limites mais restritivos. Nas avaliações ambientais o objetivo é

---

<sup>5</sup> No dia 12 de janeiro de 2009, a Feema, a Serla e o IEF foram extintas com a implantação do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), que unificou os três órgãos ambientais do Estado.

identificar a presença de contaminantes como os compostos orgânicos voláteis (VOC) e semi-voláteis (SVOC), hidrocarbonetos aromáticos (BTX e PAH) e a eventual presença de metais. Os efeitos para o ser humano e as características destes contaminantes estão descritas no capítulo IV. Para a remoção destes contaminantes existe uma variedade de técnicas que foram descritas resumidamente neste mesmo capítulo e cujas aplicações variam de acordo com o tipo de contaminação (fase livre, fase dissolvida e fase adsorvida) existente.

No capítulo V foi descrito detalhadamente uma aplicação real dos procedimentos de detecção e remediação de solo e água subterrânea realizados em um posto de abastecimento localizado no Rio de Janeiro durante o período de 2005 a 2009. Em setembro de 2005 foi feita uma investigação ambiental que constatou a contaminação da água subterrânea em virtude do vazamento num dos tanques de combustível, tendo sido feita a análise de risco RBCA TIER 2 que indicou que os níveis de contaminantes se encontravam abaixo dos limites determinados pela legislação ambiental para uso comercial da área. Como houve a mudança de destinação do terreno para residencial, em outubro de 2006 foi feito um monitoramento para verificar a concentração de contaminantes, que resultou na necessidade do processo de remediação em virtude dos níveis terem excedido o SSTL. Seguiu-se a execução de novas sondagens no terreno para delimitação da pluma de contaminação.

Em dezembro de 2006 foram retirados os tanques de combustível existentes e coletadas amostras de solo, onde se constatou a existência de contaminação que foi tratada através do processo de aeração manual. Para tratamento da água subterrânea, que estava concentrada numa pequena área, foi instalado um sistema de *Pump and Treat*, adequado para remoção de contaminantes em fase dissolvida e com baixo custo de operação. Este sistema foi operado durante três meses com monitoramento das amostras de água.

Monitoramentos feitos em abril e julho de 2007 mostraram a necessidade de maior redução dos níveis de contaminantes, o que foi conseguido através de 3 aplicações do processo de Oxidação Química, adequado para pequenas reduções de bolsões de contaminação com baixo custo.

De acordo com solicitações da FEEMA foram feitos mais três monitoramentos (junho e dezembro de 2008, março de 2009), que não constataram a presença de contaminantes, liberando assim o empreendimento para a construção de um prédio residencial.

O projeto procurou mostrar o passo-a-passo dos procedimentos necessários quando constatada contaminação do solo e/ou de água subterrânea e a legislação ambiental que deve ser obedecida pelos postos de abastecimento de combustível.

## Referências Bibliográficas

ABGE, 1998. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, Editores: Antônio Manuel dos Santos e Sérgio Nertan Alves de Brito. São Paulo-SP. Disponível em <http://www.abge.com.br/html/>.

ABNT, 1980. *Terminologia, NBR 6502*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p.5, 1980.

ABNT, 1997. *Construção de poços de Monitoramento e Amostragem, NBR 13895*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 21 p., 1997.

ALMEIDA, F. V.; CENTENO, A. J.; BISINOTI, M. C.; JARDIM, W. F.; 2007. **Substâncias tóxicas persistentes (STP) no Brasil**, Química Nova, V. 30, n°. 8. Acessada em Março de 2009 e disponível em [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000800033&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000800033&script=sci_arttext)

AMBIENTE BRASIL, 2008. *Dia Nacional da Conservação de Solo*. Disponível em [http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuaria/artigo\\_agropecuaria/dia\\_nacional\\_da\\_conservacao\\_do\\_solo.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuaria/artigo_agropecuaria/dia_nacional_da_conservacao_do_solo.html), acessado em dezembro de 2008.

ANP, 2008a. *Anuário Estatístico 2008, Seção 3 – Comercialização*, Agência Nacional do Petróleo. Disponível em [http://www.anp.gov.br/conheca/anuario\\_2008.asp](http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2008.asp). Consultado em 02 de Março de 2009.

ANP, 2008b. *Dados Estatísticos, Venda de Combustíveis*, Agência Nacional do Petróleo. Disponível em [http://www.anp.gov.br/petro/dados\\_estatisticos.asp](http://www.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp). Consultado em 02 de Março de 2009.

BRITO, S. N. A.; OLIVEIRA, A. M. S., 1998. *Geologia de Engenharia*, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE, São Paulo, 1998.

CETESB, 2005. *Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo*, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2005.

CETESB; GTZ, 2001. *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas*, 2ª edição, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental e GTZ, 2001. Disponível em [http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/manual.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp), acessado em março de 2009.

CHIH-JU, G. J.; TAI, H. S.; 1998. *Chemosphere*, 37, 685, 1998.

CONAMA, 2000. *Resolução 273/2000*, Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res00/res27300.html>, acessada em janeiro 2009.

CORSEUIL, H. X.; ALVAREZ, J. J. P.; 1996. *Natural bioremediation perspective for BTX-contaminated groundwater in Brazil: effect of ethanol*, *Water Sci. & Tech.*, 34, 311, 1996.

CORSEUIL, H.X.; MARINS, M.M., 1997. *Contaminação de águas subterrâneas por derramamento de gasolina: o problema é grave?*, Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.2, n.2, p.50-54, 1997.

CORSEUIL, H. X.; HUNT, S. C.; SANTOS, F. C. R.; ALVAREZ, J. J. P.; 1998. *The influence of the gasoline oxygenate ethanol on aerobic and anaerobic BTX biodegradation*, Water Res., 32, 2065, 1998.

CORSON, W. H., 1993. *Manual Global de Ecologia*, Editora Augustus, 1993. Disponível em [http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuário/artigo\\_agropecuário/dia\\_nacional\\_da\\_conservação\\_do\\_solo.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuário/artigo_agropecuário/dia_nacional_da_conservação_do_solo.html), acessado em dezembro de 2008.

DNPM, 1984. *Geologia do Brasil - Texto explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente Incluindo Depósitos Minerais, Escala 1:2.500.000*, Departamento Nacional da Produção Mineral, Coordenação de Carlos Schobbenhaus, 1984.

EWG, 2009. *Chemical Families: Volatile and semivolatile organic compounds (VOCs and SVOCs)*, Environmental Working Group. Texto acessado em maio de 2009 e disponível em <http://www.ewg.org/chemindex/term/488>.

FEEMA, 2004. *DZ-1841.R-2 – Diretriz para o Licenciamento Ambiental e para a Autorização do Encerramento de Postos de Serviços, que disponham de Sistemas de Acondicionamento ou Armazenamento de Combustíveis, Graxas, Lubrificantes e seus respectivos resíduos*, Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, 2004.

FEITOSA, F. A.; CARNEIRO, J. M. F. (Ed.), 1997. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*, CPRM, Fortaleza, 1997.

FERNANDES, M.; BRICKUS, L. S. R.; MOREIRA, J. C.; CARDOSO, J. N.; 2002. *Atmospheric BTX and polyaromatic hydrocarbons in Rio de Janeiro, Brazil*, Chemosphere, 47, 417, 2002.

FMV (Faculdade de Medicina Veterinária da Universidade Técnica de Lisboa), 2002. Disponível em <http://www.fmv.utl.pt/democ/sft/sem9900/g004.pdf>. Acessada em Janeiro de 2002.

FUNASA, 2009. Disponível em <http://www.funasa.gov.br>, consultada em Março 2009.

GEOSFERA AMBIENTAL, 2009. **Produtos.** Disponível em [http://www.geoesfera.com.br/p\\_r\\_4.html](http://www.geoesfera.com.br/p_r_4.html)

GERLACH, R. W.; WHITE, R. J.; DEIRDRE O'LEARY, N. F.; VAN EMON, J. M.; 1997. *Field evaluation of an immunoassay for benzene, toluene and xylene (BTX)*, Water Res., 31, 941, 1997.

GOIAS, 2000. *Lei 13583/00*, Governo do Estado de Goiás. Disponível em [http://www.gabcivil.go.gov.br/leis\\_ordinarias/2000/lei\\_13583.htm](http://www.gabcivil.go.gov.br/leis_ordinarias/2000/lei_13583.htm), acessada em janeiro de 2009.

IAQ, 2009. *What are Volatile Organic Compounds (VOCs)?*, Indoor Air Quality, U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Texto disponível em <http://iaq.custhelp.com/>, seção de Frequent Questions, acessado em maio de 2009.

IBAMA, 1998. **Lei 9605/98**, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em [http://www.ibama.gov.br/fauna/legislacao/lei\\_9605\\_98.pdf](http://www.ibama.gov.br/fauna/legislacao/lei_9605_98.pdf), acessada em janeiro de 2009.

IBAMA, 1999. **Decreto 3179/99**, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Acessada em janeiro de 2009 e disponível em [http://www.ibama.gov.br/fauna/legislacao/dec\\_3179\\_99.pdf](http://www.ibama.gov.br/fauna/legislacao/dec_3179_99.pdf).

KNOWLEDGERUSH, 2009. **Encyclopedia**. Acessada em maio de 2009 e disponível em [http://www.knowledgerush.com/kr/encyclopedia/Geologic\\_Time\\_Scale/](http://www.knowledgerush.com/kr/encyclopedia/Geologic_Time_Scale/).

MANZOCHI, C.; 2001. **Ciência Hoje**, 29, 40, 2001.

MILITÃO, A. G.; RAFAELE, E. A., 2000. **Neuropatias por Intoxicação Ocupacional**, Ensaios de Ergonomia, Junho de 2000, UFSC, Florianópolis. Disponível em <http://www.eps.ufsc.br/ergon/revista/artigos/Angeliete.pdf>, acessada em março 2002.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2004. **Portaria 518/2004**, Ministério da Saúde. Disponível em [http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria\\_518\\_2004.pdf](http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518_2004.pdf), acessada em março de 2009.

MTE, 2002. Disponível em <http://www.mte.gov.br>, acessada em Março 2002.

NOBRE, M.M.; NOBRE, R. C. M., 2003. **Remediação de Solos: Técnicas Alternativas melhoram desempenho**, Revista Química e Derivados, Ed. 417, julho de 2003. Disponível em <http://www.quimica.com.br/revista/qd417/solo1.htm>, acessado em janeiro de 2009.

O'NEILL, K., 2009. **Why do you need accurate SVOC testing of soil?**, Chemex, The Business of Science. Texto acessado em maio de 2009 e disponível em <http://www.chemex.co.uk/environmental/contam/soil/svoc>.

RIEDEL, K.; RUPPERT, T.; CONZE, C.; SCHERE, G.; ADEKAFER, F.; 1996. **Determination of benzene and alkylated benzenes in ambient and exhaled air by microwave desorption coupled with gas chromatography-mass spectrometry**, J. Chromatogr., 719, 383, 1996.

RELATÓRIOS TÉCNICOS CONFIDENCIAIS, 2005-2009

RÖMMELT, H.; PFALLER, A.; FRUHMANN, G.; NOWAK, D.; 1999. **Benzene exposures caused by traffic in Munich public transportation systems between 1993 and 1997**, *Sci. Total Environ.*, 241, 197, 1999.

SHIH, T. C.; WANGPAICHTER, M. S., 2003. *Water Res.*, 37, 375, 2003.

TECNOHIDRO, 2008. **Tecnologias**. Disponível em <http://www.tecnohidro.com.br>, acessada em dezembro de 2008.

TIBURTIUS, E. R. L.; PERALTA-ZAMORA, P.; LEAL, E. S., 2004. **Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados**, Química Nova, v. 27, n.º. 3, Maio/Junho de 2004. Acessada em março de 2009 e disponível em [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422004000300014](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422004000300014).

VROM, 1994. *Intervention values and target values: soil quality standards*, Ministry of Housing, Special Planning and Environment, The Hague: VROM, 19p. (DBO/07494013), 1994.

WATTS, R. J.; HALLER, D. R.; JONES, A. P.; TELL, A. L.; 2000. *A foundation for the risk-based treatment of gasoline-contaminated soils using modified Fenton's reactions*, *J. Hazard. Mater.*, 76, 73, 2000.

WIKIPÉDIA, 2008. *Remediação de Áreas*. Acessado em dezembro de 2008 e disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Remedia%C3%A7%C3%A3o\\_de\\_%C3%A1reas](http://pt.wikipedia.org/wiki/Remedia%C3%A7%C3%A3o_de_%C3%A1reas).

WIKIPEDIA, 2009. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*. Acessado em março de 2008 e disponível em [http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic\\_aromatic\\_hydrocarbon](http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic_aromatic_hydrocarbon).

# APÊNDICES



## APÊNDICE A1

CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DE POSTOS DE SERVIÇO - NBR 13.786 / 2001	
<b>SEÇÃO I - DADOS DA CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>SEÇÃO II - DADOS CADASTRAIS DO POSTO DE SERVIÇO</b>
Data: 08/09/2005	Tipo de Cliente: <input checked="" type="checkbox"/> Próprio <input type="checkbox"/> Terceiro
Empreendimento:	
SEÇÃO III - CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DO POSTO DE SERVIÇO (raio de 100 metros)	
CLASSE 0	
1 - Não possui nenhum dos fatores de agravamento das classes seguintes	S . . . N . X
CLASSE 1	
1 - Rede de drenagem de águas pluviais	S X N
2 - Rede subterrânea de serviços (água, esgoto, telefone, energia elétrica, etc.)	S X N
3 - Fossa em áreas urbanas	S . . N X
4 - Edifício multifamiliar com até quatro andares	S X N
CLASSE 2	
1 - Asilo	S . . N X
2 - Creche	S . . N X
3 - Edifício multifamiliar com mais de quatro andares	S X N
4 - Favela em cota igual ou superior a do posto	S . . N X
5 - Edifício de escritórios comerciais com quatro ou mais pavimentos	S X N
6 - Poço de água, artesiano ou não para consumo doméstico	S . . N X
7 - Casa de espetáculos ou templo	S . . N X
8 - Escola	S . . N X
9 - Hospital	S . . N X
CLASSE 3	
1 - Favela em cota inferior a do posto	S . . N X
2 - Metrô em cota inferior a do solo	S . . N X
3 - Garagem residencial ou comercial construída em cota inferior a do solo	S X N
4 - Túnel construído em cota inferior a do solo	S . . N X
5 - Edificação residencial, comercial ou industrial construída em cota inferior a do solo	S . . N X
6 - Atividades industriais e operações de risco (*)	S . . N X
7 - Água do subsolo utilizada para abastecimento público da cidade (independente do perímetro de 100 metros)	S . . N X
8 - Corpos naturais superficiais de água destinados à :	
- Abastecimento doméstico	S . . N X
- Proteção de comunidade aquáticas	S X N
- Recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho)	S X N
- Irrigação	S . . N X
- Criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana. (CONAMA nº 20)	S X N
(*) - Entende-se como atividade e operações de risco o armazenamento e manuseio de explosivos, bem como locais de carga e descarga de inflamáveis líquidos (base e terminal)	
<b>Classificação ambiental do PS:</b>	0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/>

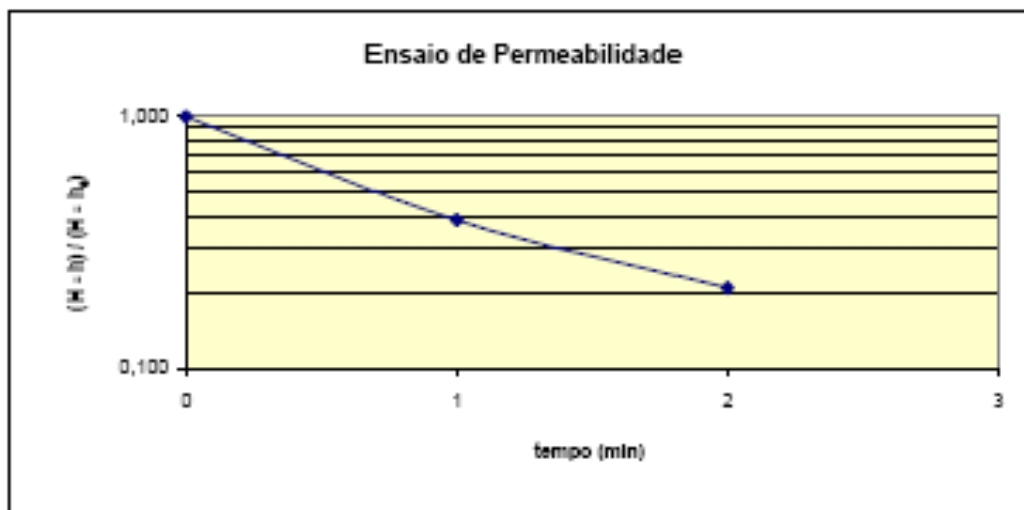
## APÊNDICE A2

### CÁLCULOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Ensaio de Permeabilidade n. 01		PM-14	Nível Estático (H): Nível Dinâmico (H <sub>0</sub> ):	Ensaio realizado em: 23/10/06
H (m) = 3,27		H <sub>0</sub> (m) = 3,94		
DURAÇÃO DO TESTE		NÍVEL D'ÁGUA (h)	Diferença do Nível Estático e o Nível Dinâmico (H - h)	Relação entre o Nível Dinâmico e o Nível Estático (H - h) / (H - H <sub>0</sub> )
minutos	segundos	metros	metros	metros
0	0	3,94	-0,67	1,000
1	60	3,53	-0,26	0,388
2	120	3,41	-0,14	0,209
3	180	3,27	0,00	0,000

#### Dados do Poço de Monitoramento

Raio Poço	r	2,640	cm
Raio da Sond	R	5,080	cm
Compr. filtro	L	300,000	cm



#### Cálculo do Coeficiente de Condutividade Hidráulica

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2 L T_0}$$

Resultados :

$$K = 6,64E-04 \text{ cm/s}$$

$$K = 5,74E-01 \text{ m/dia}$$

$$T_0 = 1,101 \text{ minutos}$$

Onde:

K - condutividade hidráulica

r - raio do revestimento do poço

R - raio da sondagem

L - comprimento do filtro

T<sub>0</sub> - tempo decorrido até que o nível d'água atinja 37% da profundidade inicial (H)

**APÊNDICE A3  
VALORES ORIENTADORES DA CETESB**

Compostos	Solo (mg/kg) peso seco			Água Subterrânea (µg/L)
	Prevenção	Intervenção		Intervenção
		Residencial	Industrial	
<b>BTEX (µg/kg)</b>				
<b>Benzeno</b>	0,03	0,08	0,15	5,0
<b>Tolueno</b>	0,14	30	75	700,0
<b>Etilbenzeno</b>	6,2	40	95	300,0
<b>Xilenos</b>	0,13	30,0	70,0	500,0
<b>PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Cíclicos) (mg/kg)</b>				
<b>Naftaleno</b>	0,12	-	-	140
<b>Fenantraceno</b>	3,3	-	-	140
<b>Antraceno</b>	0,039	-	-	-
<b>Fluoranteno</b>	nd	-	-	-
<b>Criseno</b>	8,1	-	-	-
<b>Benzo(a)antraceno</b>	0,025	-	-	1,75
<b>Benzo(k)fluorantraceno</b>	0,38	-	-	-
<b>Benzo(a)pireno</b>	0,052	-	-	0,7
<b>Indeno(1,2,3-cd)pireno</b>	0,031	-	-	0,17
<b>Benzo(g,h,i)perileno</b>	0,57	-	-	-

**APÊNDICE A4  
FLUXOGRAMA DAS VIAS DE EXPOSIÇÃO**

