

Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

**TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO EM ÁREAS IMPACTADAS COM
HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO: ESTUDO DE CASO EM
POSTO DE COMBUSTÍVEL POR EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA**

Gabriel Sampaio de Araujo

FLORIANÓPOLIS, (SC)
MARÇO/2009

Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

Gabriel Sampaio de Araujo

**TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO EM ÁREAS IMPACTADAS COM
HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO: ESTUDO DE CASO EM
POSTO DE COMBUSTÍVEL POR EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental

Orientadora
Dra. Cristina Cardoso Nunes

FLORIANÓPOLIS, (SC)
MARÇO/2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO EM AREAS IMPACTADAS COM
HIDROCARBONETOS DE PÉTROLEO: ESTUDO DE CASO EM POSTO DE
COMBUSTÍVEL POR EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA

GABRIEL SAMPAIO DE ARAUJO

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para
Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental-TCC II

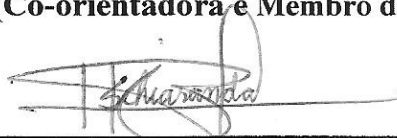
BANCA EXAMINADORA:



Dra. Cristina Cardoso Nunes
(Orientadora)



Dra. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto
(Co-orientadora e Membro da Banca)



Msc. Helen Simone Chiaranda
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
MARÇO/2009

AGRADECIMENTOS

À vida, pelas suas infinitas possibilidades de encantamento: uma gota de chuva, uma flor, as estrelas do céu, o sol, uma palavra amiga, um abraço reconfortante, respirar o ar fresco...

Aos meus pais, Rita e Flavio (*in memoriam*) por todo amor, e pela minha existência.

Às minhas avós Odette, Luli e Yvette e meu avô Flavio, por todo carinho, respeito e admiração.

A todos meus professores e amigos que contribuíram para que este momento chegasse, sempre dispostos a compartilhar seus conhecimentos e experiências.

À Universidade Federal de Santa Catarina por abrigar nessa comunidade pessoas maravilhosas, que pude conhecer durante minha estadia por aqui.

À Aline, por dividir comigo este momento especial e outros muitos que virão.

À GEOKLOCK Consultoria e Engenharia Ambiental, pela oportunidade de crescimento, pela receptividade de seus colaboradores e pelos dados fornecidos imprescindíveis para realização deste trabalho.

À minha orientadora Cristina Nunes, pelo seu incansável esforço e dedicação sempre.

RESUMO

A remediação de áreas contaminadas por derramamento de compostos tóxicos que atingem o subsolo, pode ser realizada por diversas técnicas, como o Bombeamento e Tratamento, a Extração de Vapores e a Bioventilação. Uma tecnologia mais moderna que vem sendo utilizada para recuperação de solos e águas subterrâneas com sucesso é a Extração Multifásica (MPE). Este método reúne características de diferentes tecnologias e consiste na aplicação de vácuo conjuntamente ao bombeamento em um poço de extração possibilitando uma maior taxa de recuperação dos contaminantes, em fase líquida e gasosa pela remoção de compostos orgânicos voláteis (VOC) e pelo estímulo da comunidade microbiana. Este estudo de caso verificou as condições de aplicação da tecnologia MPE na remediação do solo e da água subterrânea contaminados com compostos dos grupos BTXE e PAH devido ao vazamento de óleo diesel em um posto de combustível. O sistema utilizado MPE com configuração *bioslurping*, apresentou-se eficiente na remediação da água subterrânea e na recuperação de grande volume de combustível, porém as metas de remediação não foram atingidas pela recorrência de vazamento na área.

PALAVRAS CHAVE: remediação, áreas contaminadas, extração multifásica (MPE)

ABSTRACT

The remediation of areas contaminated by spillage of toxic compounds that reach subsoil may be accomplished by various techniques, such as Pump and Treat, Vapor Extraction and Bioventing. A more modern technology being used for recovery of soil and groundwater with success, is the Multiphase Extraction (MPE). This method consists in the mix of different technologies, by the application of a vacuum pump together with a well-extracting stimulation enabling a greater rate of recovery of contaminants in liquid and gas phases for the removal of volatile organic compounds (VOC) and the microbiological community stimulation. This case study found the application conditions of MPE technology remediating soil and groundwater contaminated with the BTXE HPA groups due to leak at a fuel. The MPE system had the bioslurping configuration and showed to be efficient in the remediation of groundwater and the recovery of large volumes of fuel, but the goals of remediation have not been affected by the recurrence of the leak in the area.

KEY WORDS: remediation system, multiphase extraction (MPE), contaminated areas

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução temporal de áreas contaminadas cadastradas	3
Figura 2 - Distribuição das áreas contaminadas por atividade	3
Figura 3 - Constatação de Grupos Contaminantes.....	4
Figura 4 - Distribuição quanto ao estágio de Remediação	5
Figura 5-Constatação de técnicas de remediação implantadas	6
Figura 6 - Curva do ciclo de vida de um projeto de remediação	10
Figura 7 - Curva Modificada do Ciclo de Vida de um projeto de remediação.....	11
Figura 8 - Fatores que causam a dispersão longitudinal em escala porosa	15
Figura 9 - Caminhos de fluxo em meio poroso que causam dispersão lateral.....	15
Figura 10 - Transporte de contaminantes em aquíferos.....	16
Figura 11 - Zona de Captura vista da seção.....	23
Figura 12 - Zona de Captura vista em planta.....	24
Figura 13 - Efeito do vácuo no bombeamento.....	25
Figura 14 - Ilustração esquemática da configuração de bombeamento simples.....	29
Figura 15 - Ilustração esquemática da configuração de bombeamento duplo	30
Figura 16 - Ilustração esquemática da configuração de bombeamento do tipo <i>bioslurping</i> ..	31
Figura 17 - Arranjo físico das instalações do posto e arredores	37
Figura 18- Mapa Potenciométrico	41
Figura 19 - Gráfico de rebaixamento por distância	43
Figura 20 - Esquema do arranjo proposto.....	45
Figura 21 - Layout conceitual do sistema de remediação.....	46
Figura 22 - Taxas de remoção de hidrocarbonetos	47
Figura 23 - Estimativa do tempo de remediação do solo - fase adsorvida	49
Figura 24 - Localização da área alvo de remediação.....	50
Figura 25 – Estimativo do decaimento do benzeno no solo	51
Figura 26 - Estimativa do tempo de remoção da fase livre.....	52
Figura 27 - Nível D'Água (PM e PB)	53
Figura 28 - Nível D'Água (PE)	53
Figura 29 - Espessura aparente da fase livre X tempo - poços de monitoramento.....	54
Figura 30 - Espessura aparente da fase livre X tempo – poços de extração	55
Figura 31 - Plumas de Isoespessura de fase livre	56
Figura 32 - Plumas de Isoespessura de fase livre out / 2003	57
Figura 33 - Histórico da recuperação de produto no posto de combustível.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de áreas com população sob risco.....	2
Tabela 2 - Concentrações de BTEX calculadas e observadas	13
Tabela 3 – Tipos de configuração de sistemas de remediação	19
Tabela 4 - Termos para tecnologia MPE	22
Tabela 5 - Aplicabilidade da tecnologia MPE	33
Tabela 6 - Sumário de vantagens e desvantagens da tecnologia	33
Tabela 7 - Métodos de amostragem dos parâmetros analisados	40
Tabela 8 - Características hidrogeológicas da área.....	44
Tabela 9 - Resultados analíticos dos compostos na entrada e saída do stripping.....	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Objetivos	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 O Ambiente de Subsuperfície	8
2.2 O Ciclo de Vida dos Sistemas de Remediação	9
2.3 Comportamento dos Contaminantes e Transporte de massa nas Águas Subterrâneas .	12
2.3.1 Lei de Raoult.....	13
2.3.2 Advecção.....	14
2.3.3 Dispersão Mecânica	14
2.3.4 Difusão	15
2.3.5 Dispersão Hidrodinâmica.....	17
2.3.6 Retardo e atenuação dos solutos	17
2.4 Tecnologias de Remediação	18
2.4.1 Bombeamento e Tratamento	19
2.4.2 Extração de Vapores (SVE).....	20
2.4.3 Bioventilação	20
2.4.4 Sistema de Extração Multifásica (MPE).....	21
2.4.4.1 Principais Configurações	28
2.4.4.2 Aplicabilidade e Limitações	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4 RESULTADOS.....	37
4.1 Histórico da Área e Descrição do Entorno	37
4.2 Atendimento Emergencial e Avaliação Preliminar.....	38
4.3 Remediação da Área	42
4.4 Teste de Bombeamento.....	43
4.5 Projeto Conceitual de Remediação Ambiental	44
4.6 Teste Piloto	46
4.7 Implantação e Partida do Sistema.....	49
4.8 Operação do Sistema.....	52
5 CONCLUSÕES	60
6 RECOMENDAÇÕES	62
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O homem já modificou quase todos os aspectos do seu *habitat*, contudo esta transformação não foi distribuída homoganeamente, ao longo da história da humanidade. Até a explosão industrial e tecnológica desencadeada no século XIX, os impactos ambientais eram produtos ou subprodutos de atividades agrícolas, de forma que a água, o solo e a vegetação eram mais afetados. Atualmente, o sistema atmosférico e o oceânico também são atacados por atividades antropogênicas, ao mesmo tempo em que se intensificaram a extensão e a profundidade das mudanças impostas ao meio hidrogeológico e ao biológico (DREW, 1983). As fontes e os tipos de poluição se diversificaram e se espalharam geograficamente, concentrando-se em áreas de alta densidade demográfica (SUTHERSAN & PAYNE, 2005).

Na década de 60, a abordagem de problemas ambientais em políticas públicas começou a ser realizada, sistematicamente, nos países industrializados e ricos, sendo que, na década de 70, ela começou a ser introduzida nas nações ditas em desenvolvimento. Na década de 80, o assunto tomou dimensões mundiais e, em 1981, pela primeira vez no Brasil, ocorreu à edição de uma Política Nacional do Meio Ambiente, cujas diretrizes inspiraram a maior parte das regulamentações legais e normativas conseqüentes (BITAR & ORTEGA, 1998).

A problemática ambiental é, hoje em dia, muito discutida, pois já se sabe que a existência de áreas contaminadas pode gerar problemas como danos à saúde humana, comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, restrições ao uso do solo e prejuízos ao patrimônio público e privado, com a desvalorização das propriedades, além de agressões ao meio ambiente.

Segundo a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), contaminação pode ser entendida como a introdução no meio ambiente de organismos patogênicos, substâncias tóxicas ou outros elementos, em concentrações que podem afetar a saúde humana. Já uma área contaminada é aquela onde há contaminação, comprovada por análises, capaz de causar danos ou riscos aos bens a proteger existentes no

local e em seus arredores. No grupo dos bens a proteger, estão englobados fauna, flora, a qualidade das águas, dos solos e do ar, a preservação de paisagens, a ordenação territorial e o planejamento urbano, assim como a manutenção da segurança e da ordem pública (CETESB, 2001).

Nacionalmente, o Ministério da Saúde, através do Programa Nacional de Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Solo Contaminado, contabilizou no ano de 2005, 703 áreas com contaminação de solo por compostos químicos, causadas ou pela disposição irregular de resíduos industriais e agrotóxicos ou devido a atividades industriais poluidoras, expondo populações potencialmente a riscos, conforme a distribuição quantitativa por estado mostrada na Tabela 1 (BRASIL, 2008)

Tabela 1 - Número de áreas com população sob risco

<i>Região UF</i>	<i>Áreas</i>	<i>Região UF</i>	<i>Áreas</i>
Norte (N)	87	Sudeste (SE)	285
Rondônia (RO)	12	Minas Gerais (MG)	42
Acre (AC)	10	Espírito Santo (ES)	16
Amazonas (AM)	15	Rio de Janeiro (RJ)	70
Roraima (RR)	11	São Paulo (SP)	157
Pará (PA)	10	Sul (S)	59
Amapá (AP)	11	Paraná (PR)	24
Tocantins (TO)	18	Santa Catarina (SC)	30
Nordeste (NE)	192	Rio Grande do Sul (RS)	70
Maranhão (MA)	11	Centro-Oeste (CO)	80
Piauí (PI)	7	Mato Grosso do Sul (MS)	20
Ceará (CE)	13	Mato Grosso (MT)	34
Rio Grande do Norte (RN)	21	Goiás (GO)	8
Paraíba (PB)	13	Distrito Federal (DF)	18
Pernambuco (PE)	84		
Alagoas (AL)	11	Brasil (BR)	703
Sergipe (SE)	9		

(Fonte: BRASIL, 2008)

Para o estado de São Paulo, os dados da a Figura 1 referentes ao controle realizado pela CETESB mostra a evolução temporal do número de áreas contaminadas cadastradas.

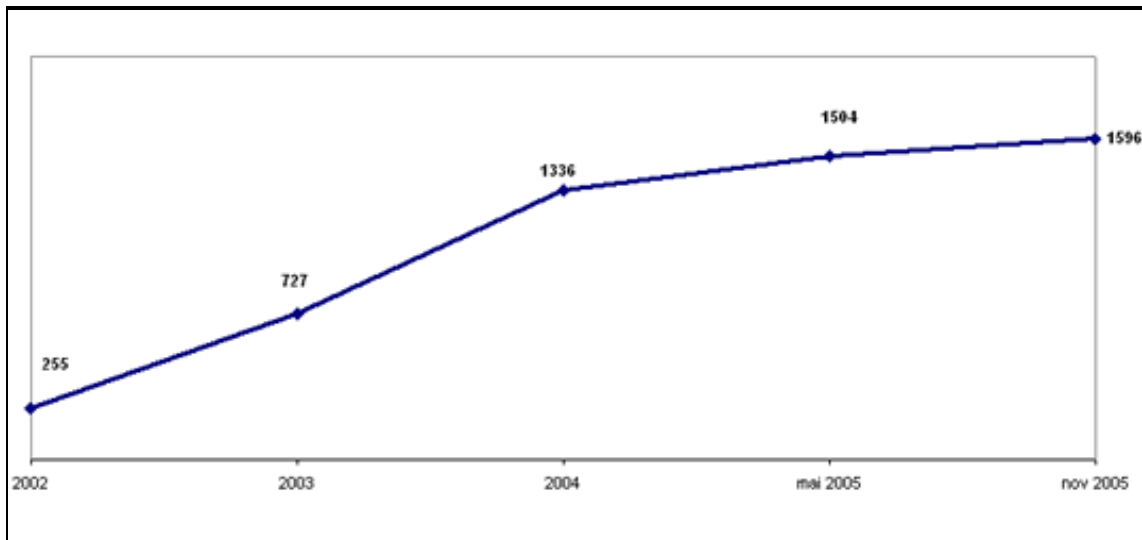


Figura 1 – Evolução temporal de áreas contaminadas cadastradas
(Fonte: CETESB, 2008)

A Figura 2 mostra o percentual de áreas contaminadas a partir da atividade desenvolvida, em novembro de 2005, no Estado de São Paulo.

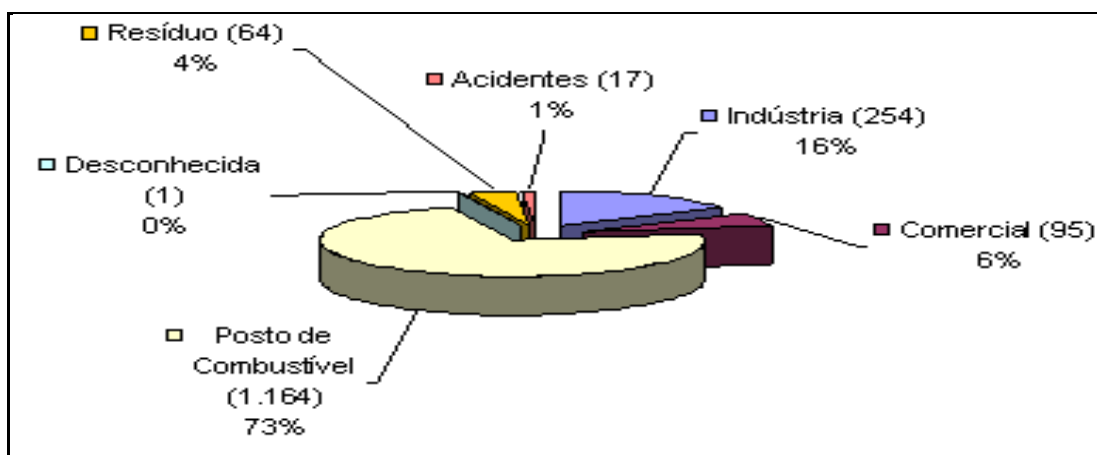


Figura 2 - Distribuição das áreas contaminadas por atividade
(Fonte: CETESB, 2008)

Pode-se perceber que os postos de combustíveis destacam-se na lista, aparecendo com 1.164 registros (73% do total), seguidos das atividades industriais com 254 ocorrências (16%), das atividades comerciais com 95 áreas contaminadas (6%), das instalações para destinação de resíduos com 64 registros (4%) e dos casos de acidentes e fontes de contaminação de origem desconhecida com 19 cadastros (1%).

Os principais grupos de contaminantes encontrados foram: combustíveis líquidos, solventes aromáticos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), metais e solventes halogenados, conforme Figura 3.

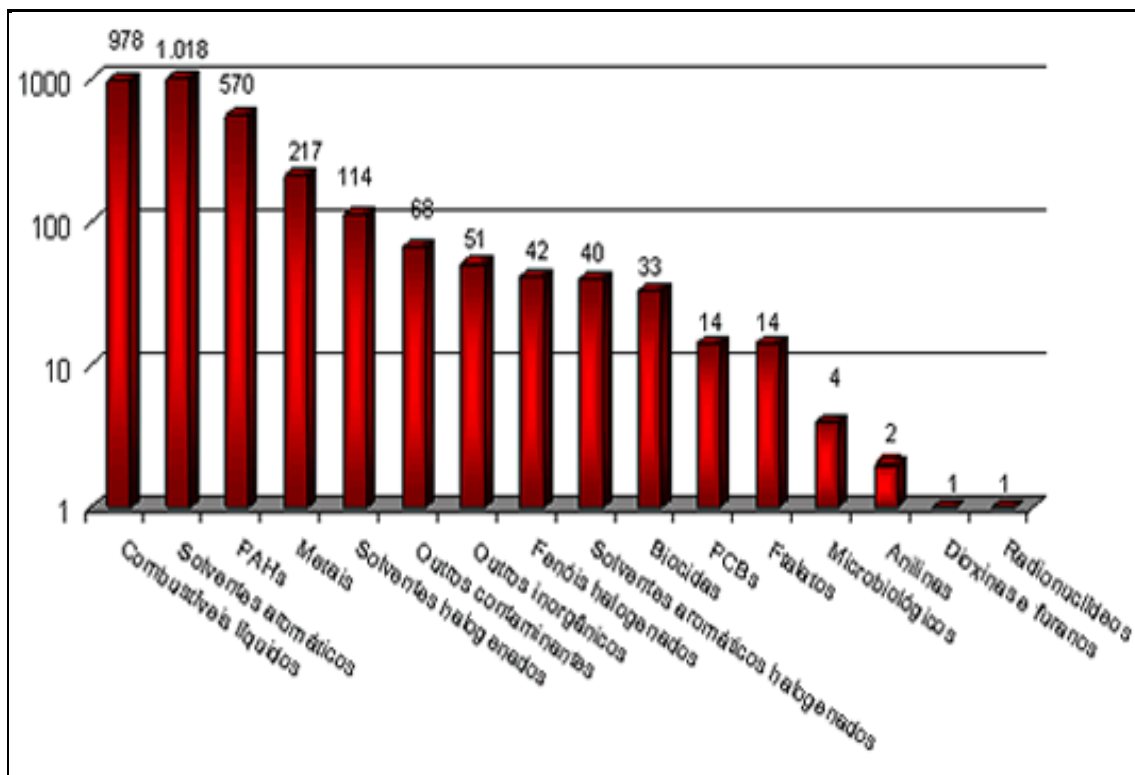


Figura 3 - Constatação de Grupos Contaminantes
(Fonte: CETESB, 2008)

A CETESB, em seu Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, define remediação como a aplicação de técnicas em uma área contaminada, visando à remoção ou a contenção dos contaminantes presentes, de modo a assegurar uma utilização para o local, com limites aceitáveis de riscos aos bens a proteger (CETESB, 2001).

A Figura 4 mostra o cenário em novembro de 2005 para o Estado de São Paulo em relação ao estágio da remediação em que se encontram as áreas contaminadas cadastradas: em andamento, concluída, sem proposta de remediação e com proposta de remediação (CETESB, 2008).

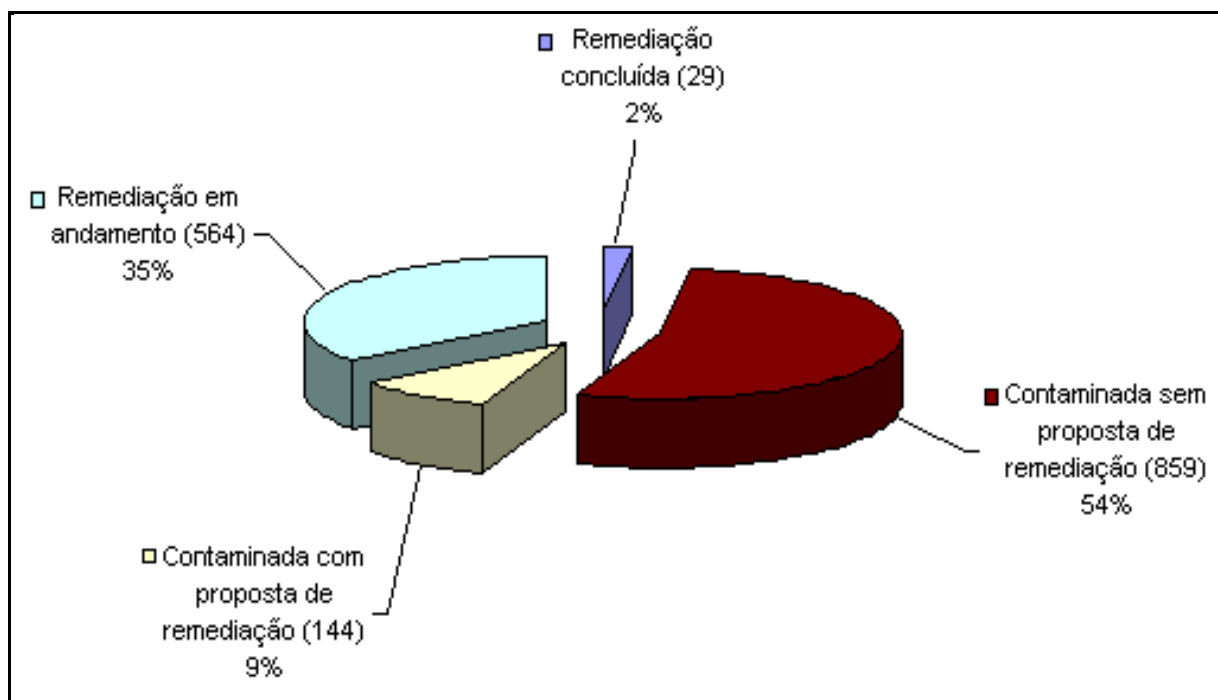


Figura 4 - Distribuição quanto ao estágio de Remediação
(Fonte: CETESB, 2008)

Nota-se que a maioria das áreas contaminadas ainda não tem uma proposta de remediação formalizada, o que demonstra a possibilidade da ocorrência de danos em potencial aos aquíferos e aos bens a proteger. A escolha da tecnologia de remediação a ser utilizada baseia-se na elaboração de cenários futuros para área o alvo e na relação entre as previsões dos resultados e dos custos (CETESB, 2001).

Para a remediação de solos e águas subterrâneas impactadas com hidrocarbonetos de petróleo são utilizadas diversas tecnologias que podem ser classificadas em tecnologias ativas e passivas. As ativas são aquelas realizadas pela intervenção do homem e as passivas não, são fruto da biodegradação natural. Dentre as tecnologias ativas podem ser citadas a biorremediação acelerada *in situ*, aspersão de ar, bioventilação, extração multifásica, etc. A atenuação natural monitorada é considerada uma estratégia de remediação passiva, isto é, sem a intervenção do homem.

Nas áreas que já estão sendo remediadas, predomina a aplicação dos métodos tradicionais de bombeamento e tratamento e de recuperação de fase livre, com a extração de vapores e as remoções de solo também sendo expressivas, conforme expressa o gráfico da Figura 5.

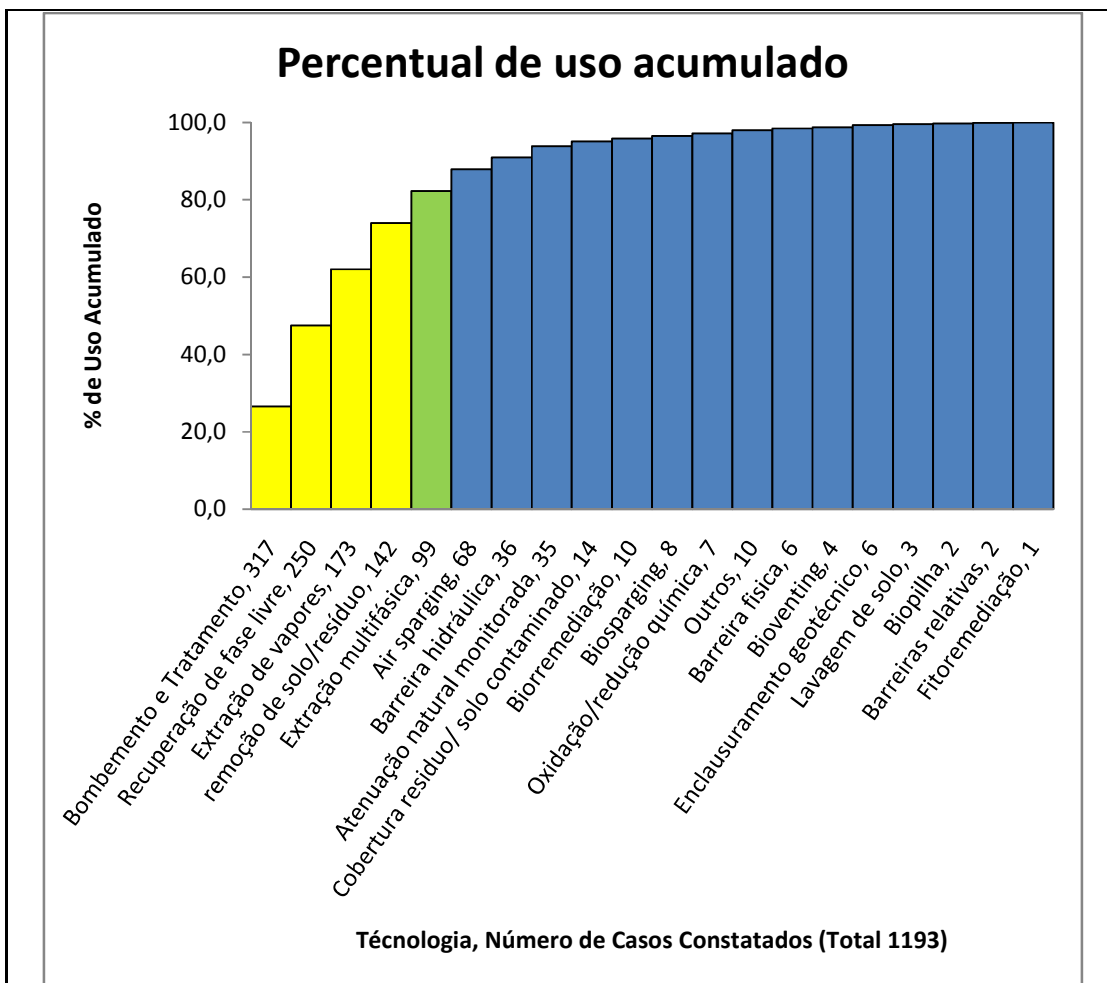


Figura 5-Constatação de técnicas de remediação implantadas
(Fonte: Adaptado de CETESB, 2008)

Ressalta-se que a tecnologia de extração multifásica (MPE), objeto de estudo deste trabalho, aparece como a quinta mais aplicada para remediação, com 99 casos sobre um total de 1193, representando aproximadamente 10% das técnicas utilizadas. Ela é uma técnica considerada eficiente, mas por apresentar um custo inicial superior as tecnologias mais utilizadas sua aplicação não é maior. O sistema de remediação por extração multifásica, MPE, foco deste trabalho é caracterizado pela utilização simultânea de duas técnicas de remediação o bombeamento e a extração de vapores, no qual, conjuntamente ao bombeamento feito em um poço de extração, é feita a aplicação de vácuo visando maior efetividade na remediação.

Desta forma o trabalho desenvolvido apresentou as diferentes técnicas de remediação que vêm sendo utilizadas e procurou através de um estudo de caso verificar a aplicabilidade de um sistema MPE para postos de combustível através de dados de um caso real de remediação realizado conforme a metodologia proposta pela CETESB, mostrando as etapas fundamentais para aplicação de um sistema de remediação que seja eficiente para as características hidrogeológicas do local. A escolha do sistema de remediação deve ser realizada criteriosamente uma vez que as diversas técnicas existentes apresentam limitações relacionadas as características dos meios geológicos.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as tecnologias de remediação para áreas impactadas com hidrocarbonetos de petróleo, com foco na extração multifásica.

Objetivos Específicos

- Apresentar as tecnologias de remediação vinculadas aos princípios do sistema de extração multifásica;
- Esclarecer as possibilidades e as limitações das técnicas de remediação do sistema de remediação por extração multifásica (MPE) e
- Por meio de um estudo de caso, avaliar a aplicação da tecnologia em relação a metas de remoção de fase livre e recuperação da qualidade da água subterrânea.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Ambiente de Subsuperfície

As principais características referentes a um aquífero que são determinantes para se realizar estudos que envolvam o fluxo de escoamento das águas subterrâneas em meios porosos são: a estratigrafia vertical da região, a condutividade hidráulica(K), transmissividade (T) e a permeabilidade intrínseca(k).

A subsuperfície do solo recebe uma classificação vertical onde a variável que delimita essas duas principais zonas é a presença de água no solo. A zona insaturada ou vadosa situa-se entre a superfície do terreno e a superfície freática incluindo a franja capilar que é a região de transição para o lençol freático, ou zona saturada.

A constante condutividade hidráulica (K) pode ser traduzida como a capacidade do meio poroso em transmitir água, ou seja, traduz a facilidade com que a água se desloca ao longo do perfil do solo, podendo seu valor ser determinado tanto em laboratório como em campo (BEDIENT et al., 1994). Entre as principais técnicas de campo utilizadas para determinar a condutividade hidráulica estão o *slug test*, o ensaio de bombeamento, o ensaio com traçador e o ensaio de tubo aberto. Entre os métodos laboratoriais destacam-se os permeâmetros e as fórmulas de condutividade hidráulica. Nos meios porosos reais, a condutividade hidráulica dos materiais possui uma distribuição complexa e irregular (FITTS, 2002). Solos mais porosos e de maior granulometria apresentam uma maior condutividade que solos mais finos, pois a água pode passar pelos espaços vazios com maior facilidade.

A permeabilidade intrínseca(k) independe do fluido e suas propriedades, depende apenas do material poroso, da sua granulometria e de sua disposição estrutural.

$$K = k(\rho g/\mu) \tag{1}$$

Onde:

K = condutividade hidráulica

k = permeabilidade intrínseca

μ = viscosidade dinâmica

ρ = densidade do fluido

g = constante gravitacional

A transmissividade (T) corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero, e é obtida multiplicando-se a condutividade hidráulica (K) pela espessura saturada do aquífero.

$$T = Kb \quad (2)$$

Onde:

T = transmissividade

K = condutividade hidráulica

b = espessura saturada do aquífero

2.2 O Ciclo de Vida dos Sistemas de Remediação

A eficiência de um sistema de remediação depende diretamente do conhecimento dos limites de aplicação da técnica utilizada. Estes limites podem ser natural ou artificialmente impostos, sendo inerentes ao método empregado ou relacionados a situações específicas de campo.

O entendimento preciso das limitações existentes permite avaliar o alcance da técnica e planejar corretamente as etapas e adequações do sistema implantado, frente à perda de eficiência relativa, devido à grande remoção da massa original de contaminantes e à persistência de uma pequena concentração, que supera as metas estabelecidas.

O conceito de Ciclo de Vida de um sistema de remediação estabeleceu a base para discussões sobre as estratégias para remediar com sucesso, uma área contaminada (NYER, 1998). Segundo Nyer,(1998) esse conceito baseia-se na simples percepção de que um projeto de remediação é único, ou seja, apresenta características particulares que o distinguem de outros e que tendem a mudar durante a vida do projeto. A aplicação do conceito de Ciclo de Vida gerou uma representação gráfica característica, chamada de Curva do Ciclo de Vida de um sistema de remediação, conforme o que está ilustrado na Figura 86.

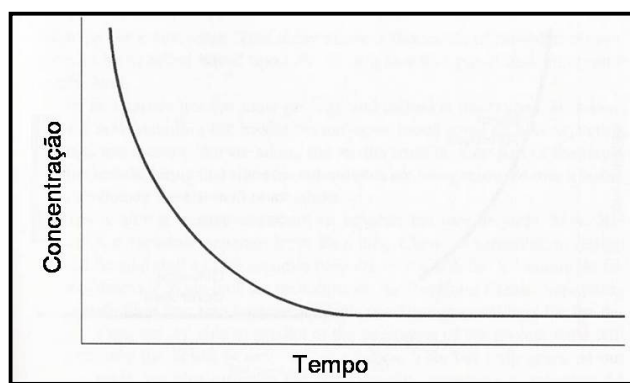


Figura 6 - Curva do ciclo de vida de um projeto de remediação
(Fonte: Adaptado de Nyer, 1998)

A Curva do Ciclo de Vida apresenta pontos definidos por uma ordenada que representa a concentração de contaminantes existente na área, e por uma abscissa dada pelo momento em que foi obtida esta concentração. Observando-se a Figura 6, nota-se que a curva descreve dois comportamentos claramente diferenciados, sendo a porção esquerda definida por uma inclinação acentuada e a porção direita definida por uma tendência de estabilização, representada pelo paralelismo ao eixo das abscissas.

Na primeira metade da década de 80, os projetos de remediação de aquíferos eram, quase totalmente, baseados na tecnologia de bombeamento e tratamento (*pump and treat*) e, por isso, a primeira aplicação da Curva do Ciclo de Vida foi a de prover um modelo capaz de apoiar o planejamento de um sistema de remediação deste tipo. Na prática, a curva exprimia um ponto de mudança no comportamento do sistema instalado, ou seja, evidenciava um momento a partir do qual a concentração de contaminantes passava a sofrer diminuições insignificantes, o que podia tornar o uso deste sistema insustentável (NYER, 1998).

Contudo, ainda não estava claro para os profissionais o que causava a estabilização dos valores de concentração verificada na porção direita da curva. Desta abordagem inicial do conceito de Ciclo de Vida derivaram três conclusões importantes: o comportamento da concentração dos contaminantes variam com o tempo, o custo de manutenção de equipamentos em relação ao tempo de utilização é muito representativo e os gastos com operadores são significativos para o montante final do projeto (NYER, 2001).

Nos EUA, no final dos anos 80, vários sistemas de bombeamento completavam dez anos ou mais de operação e os dados obtidos ratificavam o comportamento da concentração de contaminantes previsto e expresso graficamente pela Curva do Ciclo de Vida de um

projeto de remediação. Com isso, dois problemas intrínsecos foram revelados: percebeu-se que após certo tempo de funcionamento, embora o custo operacional continuasse similar ao custo inicial, o bombeamento já não conseguia remover uma massa significativa de contaminantes, conseqüentemente, notou-se também que as concentrações atingidas ainda não eram baixas o suficiente para declarar que o aquífero estava “limpo” e para determinar a desativação do sistema de bombeamento (NYER, 1998).

Avanços nos estudos sobre o comportamento dos contaminantes e o seu transporte em aquíferos impulsionaram a incorporação das reações *in situ* ao planejamento das remediações e proporcionaram os fundamentos para o refinamento da interpretação da Curva do Ciclo de Vida.

Sendo assim, a abordagem atual gerou modificações que estão representadas na Figura 9.

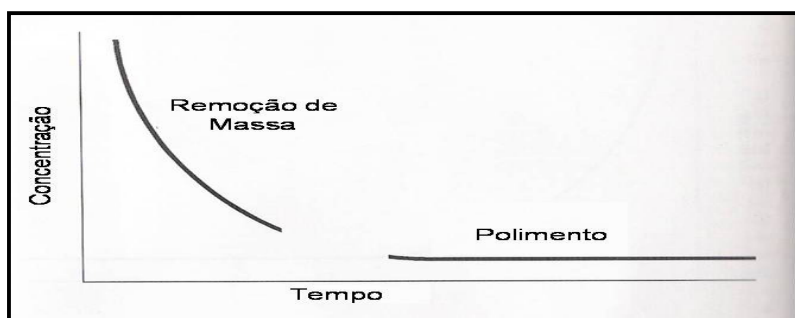


Figura 7 - Curva Modificada do Ciclo de Vida de um projeto de remediação (Fonte: Adaptado de Nyer, 1998)

Observando a Figura 9, verifica-se que as metades (esquerda e direita) foram separadas, com a primeira representando a etapa de “Remoção de Massa” (*Mass Removal*) e a segunda representando a fase de “Polimento” (*Reaching Clean*). Desta maneira, surge a idéia de que qualquer remediação é constituída por duas ou mais etapas distintas. A primeira etapa, “Remoção de Massa” visa à extração das maiores quantidades possíveis de contaminantes, buscando a eliminação de fontes primárias e secundárias de contaminação. Esta é a fase onde as técnicas de bombeamento encontram sua melhor aplicação. A partir do momento em que as limitações impossibilitam a aplicação de técnicas de bombeamento com níveis de eficiência e custo/benefício aceitáveis, se finda a primeira etapa da curva e atinge-se a porção horizontal na metade direita da Curva do Ciclo de Vida, estabelecendo-se a etapa

de “Polimento”, cujo objetivo é manter e atingir a meta estabelecida para declarar a área remediada. Nesta fase, há necessidade da aplicação de técnicas capazes de refinar e sustentar a diminuição nas concentrações de contaminantes (NYER, 1998).

Para Nyer (1998), a importância de se dividir um projeto de remediação em duas etapas fica evidente, frente à variação dinâmica do cenário em função da massa residual e do comportamento hidrogeológico dos contaminantes, que acaba gerando uma demanda por tecnologias diferentes para a obtenção dos resultados esperados em uma área.

2.3 Comportamento dos Contaminantes e Transporte de massa nas Águas Subterrâneas

O entendimento dos mecanismos de transporte de contaminantes em águas subterrâneas é indispensável para a realização de um planejamento de remediação adequado. O conhecimento da interação que ocorre entre o meio poroso, a água e o tipo de contaminante, é necessário para o desempenho satisfatório de um sistema de remediação.

Os processos hidroquímicos que afetam as diferentes substâncias contaminantes das águas subterrâneas são inúmeros e o conhecimento da capacidade de solubilização desses compostos é de grande importância nas diversas fases das etapas de remediação.

Para casos de contaminação subterrânea, os contaminantes de maior interesse aqueles associados a produtos derivados do petróleo refinado, assim como aqueles relacionados a solventes clorados e não clorados, a desengraxantes e a compostos orgânicos crus utilizados em diversos processos de manufatura (SUTHERSAN, 1997). Há contaminações não solubilizadas, constituindo o que é chamado de fase livre (NAPL). A fase livre pode ser “leve”, menos densa do que a água, sendo também conhecida como LNAPL, ou ainda, pode ser mais densa do que a água e neste caso chamada de DNAPL.

Propriedades físicas como ponto de fusão e de ebulição, densidade, pressão de vapor e densidade de vapor, exercem grande influência na mobilidade deste tipo de contaminante (SUTHERSAN, 1997).

Para o estudo de sistemas de remediação em águas subterrâneas é importante a compreensão sobre o transporte de contaminantes em aquíferos, afinal, os sistemas de bombeamento possuem limitações em processos de remediação. Muitas delas pelo fato de que o aquífero não libera toda a carga de contaminação ao mesmo tempo, há uma parcela de

contaminantes que permanece retida, inacessível ao fluxo advectivo imposto pelo bombeamento, e ainda uma parcela que foi solubilizada para água subterrânea.

2.3.1 Lei de Raoult

Pelo conhecimento da composição dos combustíveis em derramamentos que fluem para os aquíferos subterrâneos, é possível calcular a concentração em equilíbrio dos compostos BTEX na água subterrânea através da Lei de Raoult (SIENKO, et al., 1961):

$$C_w^i = S^i X_g^i \quad (3)$$

Onde: C_w^i é a concentração em equilíbrio do componente i na fase aquosa

S^i é a solubilidade do componente puro i na água

X_g^i é a fração molar do componente i na diesel

Conforme pode ser observado na Tabela 2 a massa percentual de BTEX na gasolina brasileira é de aproximadamente 11,4% (FERNANDES, 1997), cujas frações são de: 4,58; 3,28; 1,8; 1,15 e 0,59% para o *m*, *p*-xileno, tolueno, *o*-xileno, etilbenzeno e benzeno, respectivamente. Como a concentração aquosa desses compostos é proporcional à fração molar de cada composto na gasolina e da solubilidade do composto em água, as maiores concentrações aquosas na água subterrânea seriam, portanto, para o tolueno seguido do benzeno, *m*, *p*-xileno, *o*-xileno e etilbenzeno.

Tabela 2 - Concentrações de BTEX calculadas e observadas

Composto	Fração molar X_i (%)	Solubilidade em água S_i^w (mg L ⁻¹)	Concentrações calculadas a partir da Lei de Raoult ^(a) (mg L ⁻¹)
Benzeno	0,59	1780	10,50
Tolueno	3,28	537	17,61
etilbenzeno	1,147	167	1,92
<i>m,p</i> -xileno	4,576	198	9,06
<i>o</i> -xileno	1,8	152	2,74
BTEX Total	11,393	-	41,83

(Fonte: Adaptado de Fernandes, 2002)

Os mecanismos de advecção, dispersão, retardamento e difusão são os processos básicos que atuam na movimentação de um poluente em meio poroso (FETTER, 1992). Em conjunto com a solubilização conforme expresso pela Lei de Raoult.

2.3.2 Advecção

Um contaminante transportado pelo mecanismo de advecção está se deslocando à velocidade média linear igual à da água subterrânea, mas devido à heterogeneidade do solo, o transporte advectivo em camadas distintas, pode resultar em frentes de deslocamento de soluto com expansões apresentando diferentes taxas (FEETER, 1992).

Em um projeto de remediação, o processo advectivo é importante, principalmente, durante a etapa de “Remoção de Massa”, quando o contaminante dissolvido no fluido móvel é removido aceleradamente do aquífero (NYER, 2001).

2.3.3 Dispersão Mecânica

Quando o fluido contaminado se desloca dentro de um meio poroso, ele será misturado à água não contaminada e tende a ter diferentes porções se movimentando, mais ou menos rapidamente, devido a um processo conhecido como dispersão. A dispersão pode ser longitudinal, quando ocorre paralelamente ao eixo de fluxo do fluido, ou lateral, quando acontece perpendicularmente a este mesmo eixo. Em condições naturais, a dispersão longitudinal e a lateral ocorrem simultaneamente (MANOEL, 1997).

A dispersão longitudinal, em escala microscópica, tende a existir por três razões básicas: a primeira remete ao fato de que enquanto o fluido se move através dos poros, ele se moverá mais rapidamente no centro do poro do que nas proximidades de seus limites, a segunda baseia-se no fato de que algumas porções do fluido percorrem caminhos mais longos do que as outras e a terceira reside na noção de que a parcela de fluido que atravessa poros maiores, se desloca com maior velocidade do que a parcela que percorre poros menores (FETTER, 1992). A Figura 10 ilustra esses processos.

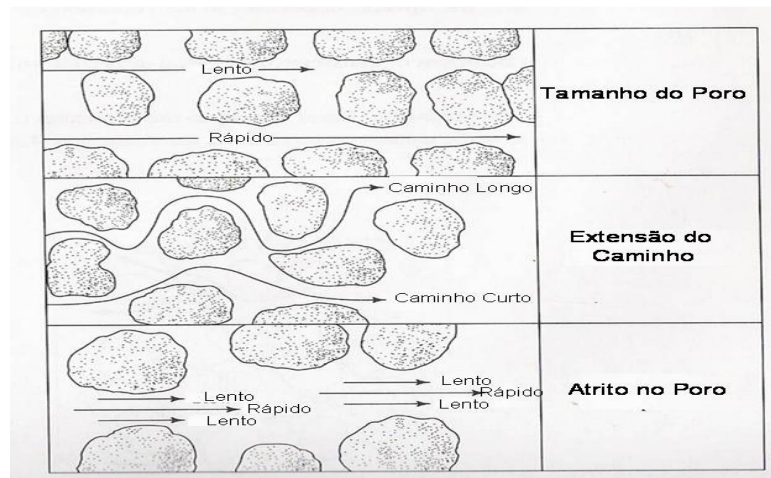


Figura 8 - Fatores que causam a dispersão longitudinal em escala porosa (Fonte: Adaptado de Fetter, 2001)

Por sua vez, a dispersão lateral é causada devido à divisão e ao espalhamento do fluxo de um fluido dentro de um meio poroso. A Figura 9 exemplifica esse fato.

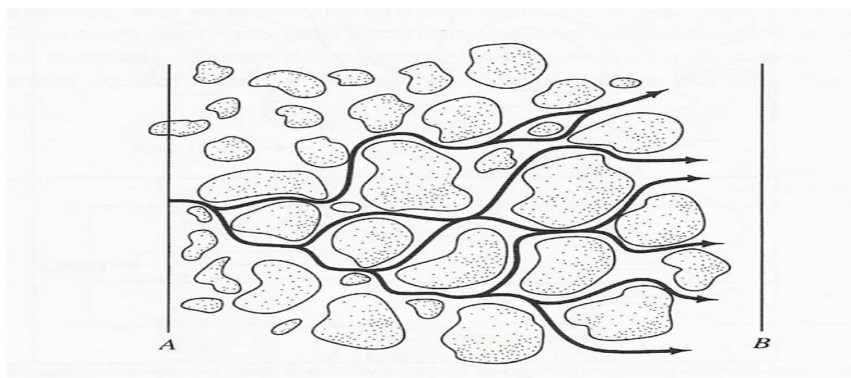


Figura 9 - Caminhos de fluxo em meio poroso que causam dispersão lateral (Fonte: Adaptado de Fetter, 2001)

2.3.4 Difusão

É um processo microscópico e binário (solvente-soluto), também conhecido como difusão molecular (MANOEL, 1997).

A difusão é o mecanismo por meio do qual constituintes iônicos ou moleculares dissolvidos na água se movem de áreas com alta concentração para áreas de baixa concentração (FETTER, 2001).

Mesmo sob condições de ausência de movimentação hidráulica, ou seja, mesmo com o gradiente hidráulico nulo, a difusão continua a proporcionar o deslocamento do soluto. Caso a água subterrânea flua vagarosamente em um meio de baixa permeabilidade, a difusão pode fazer com que o soluto seja deslocado a uma velocidade superior à da água do aquífero (FETTER, 2001). De fato, a difusão só pode ser anulada quando não houver um gradiente de concentração

O processo difusivo influi, essencialmente, na porção direita da Curva do Ciclo de Vida de um projeto de remediação, já que é por meio da difusão, que a parcela de poluentes confinada química ou fisicamente no aquífero, pode passar do fluido estagnado para o fluido móvel, tornando-se acessível ao fluxo advectivo imposto pela remediação. (NYER, 1998). A Figura 10 ilustra a situação:

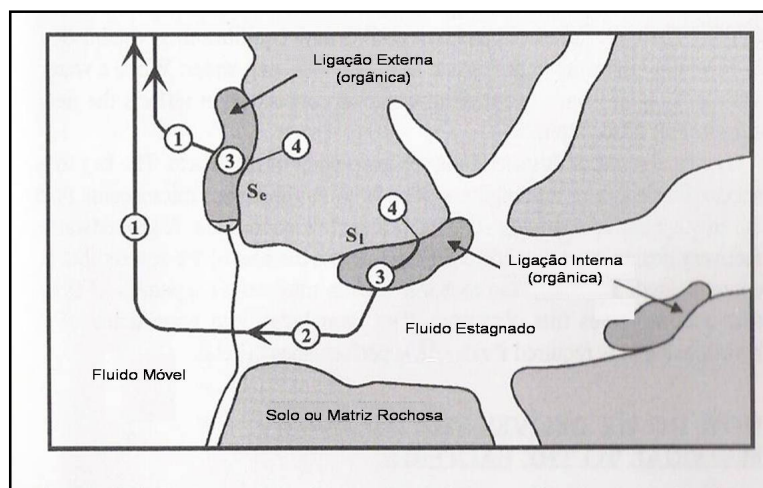


Figura 10 - Transporte de contaminantes em aquíferos
(Fonte: Adaptado de Nyer, 1998)

- (1) Transporte de soluto em fluido móvel
- (2) Difusão Intraparticular no fluido estagnado
- (3) Transporte em fase orgânica ligada
- (4) Liberação com fase orgânica e/ou na superfície de mineral

Associado aos fenômenos de transporte como a sorção e a dessorção, o mecanismo difusivo explica o fato de que a concentração de contaminantes pode voltar a subir, mesmo sem novo aporte de contaminação, após a parada do sistema de bombeamento, em um processo conhecido como “rebote”.

2.3.5 Dispersão Hidrodinâmica

A dispersão hidrodinâmica é o mecanismo de transporte de solutos que representa a superposição dos processos de dispersão mecânica e de difusão (FETTER, 1992). Na natureza, estes dois fenômenos não podem ser separados durante o fluxo da água subterrânea.

Para demonstrar o efeito prático da dispersão hidrodinâmica longitudinal, Fetter (1992) descreve um experimento simples, porém bastante ilustrativo. Para tanto, imagina-se que um tubo esteja totalmente preenchido por areia e que, através dele, esteja fluindo água destilada a uma vazão constante. Então, muda-se o fluido influente para uma solução salina de 1% e passa-se a monitorar a concentração de cloreto no efluente. Inicialmente, o efluente apresenta uma concentração nula para cloreto, uma vez que ainda é coletada a água destilada que já estava dentro do tubo, quando houve a mudança de fonte. Contudo, em determinado instante, o cloreto passa a ser detectado, mas com uma concentração significativamente mais baixa, do que a concentração de 1% da fonte do fluido influente.

Entretanto, usando a velocidade média da Lei de Darcy, o esperado era que as partículas do íon se movessem como um volume de forma fixa, alcançando uma mesma distância $L = v_x \cdot \Delta t$ após o tempo Δt . Deste modo, o efluente deveria irromper já com a concentração de 1%, similar à da fonte.

Portanto, a diferença verificada entre o valor de concentração esperado e o valor obtido foi entendida como consequência da dispersão hidrodinâmica, já que se pode argumentar que os primeiros íons a serem detectados, provavelmente, teriam percorrido caminhos mais curtos que os outros íons. Considera-se que houve também, a influência da difusão.

A dispersão hidrodinâmica é um mecanismo que permite uma visão integrada do transporte de solutos na água subterrânea, portanto, é fundamental a compreensão dos seus efeitos é para o planejamento de um sistema de remediação.

2.3.6 Retardo

Além da advecção, da dispersão mecânica e da difusão, vários outros fenômenos podem alterar a distribuição da concentração do soluto à medida que ele se move no meio

poroso, na prática, os poluentes podem ser removidos por sorção para os grãos sólidos do aquífero, sofrer precipitação química, biodegradação, ou participar de reações de oxi-redução (MANOEL, 1997a).

Os processos de sorção incluem adsorção, quimissorção e absorção.

A adsorção é o mecanismo por meio do qual uma partícula sólida atrai para sua superfície partículas de uma substância dissolvida. Um mecanismo comum de adsorção é o de trocas iônicas, que podem ser divididas em catiônicas, aquelas em que cátions são atraídos pela superfície de minerais de argila carregados negativamente, e aniônicas, nas quais ânions são atraídos por locais positivamente carregados, como óxidos de ferro e de alumínio nas arestas de minerais de argila. A quimissorção é o processo em que o soluto é incorporado à superfície de um sedimento, solo, ou rocha, por alguma reação química. Por fim, a absorção é o processo que ocorre quando as partículas do aquífero são porosas, de modo que o soluto pode se difundir dentro delas e sofrer sorção nas suas superfícies interiores.

Atuando conjuntamente, diferentes mecanismos de sorção podem fazer com que alguns solutos movam-se mais lentamente do que a própria água subterrânea que os transporta, dando origem ao efeito conhecido como retardo (FETTER, 2001).

Os processos de sorção são altamente significativos para o desempenho de um sistema de remediação, influenciando desde as estimativas de espalhamento do contaminante, até a ocorrência do “rebote”. Deste modo, a sorção é especialmente influente como limitador da etapa de “Remoção de Massa”, afinal, aquela parcela de contaminante que for sorvida, não será removida do aquífero por meio do bombeamento e, posteriormente, se sofrer dessorção, pode ocasionar o “rebote”, um novo aumento na concentração de contaminantes (NYER, 2001).

2.4 Tecnologias de Remediação

Os sistemas de remediação podem ser passivos ou ativos. Na remediação passiva a descontaminação ocorre pela capacidade de recuperação natural do solo devido principalmente à ação de bactérias que são responsáveis pela degradação dos contaminantes, transformando-os em compostos de menor toxicidade sem a intervenção do homem. Enquanto que nas remediações ativas o homem interfere diretamente no processo natural,

acelerando a recuperação da área degradada através da aplicação de tecnologias de remediação. A Tabela 3 apresenta tipos de configuração de sistemas de remediação.

Tabela 3 – Tipos de configuração de sistemas de remediação

Remediação	Metodologia
<i>In Situ</i>	Tratamento no Local sem remoção
<i>On Site</i> ou <i>Ex Situ</i>	Remoção e Tratamento no Local
<i>Off Site</i>	Remoção com Tratamento em outra área

Conforme o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, (CETESB, 2001) as tecnologias “*in situ*”, são aquelas onde o processo de remediação ocorre com a implementação de mecanismos que acelerem o processo de degradação dos contaminantes sem que eles necessitem ser removidos. São exemplos de remediação “*in situ*” a biorremediação, e a extração de vapores. Os sistemas baseados na remediação “*on site*” ou “*ex situ*”, são aqueles onde através de bombeamento ou escavação, remove-se solo, água subterrânea e os contaminantes do subsolo e depois da separação de fases eles recebem tratamento nessa mesma área sem que seja necessário o seu transporte. E por último no sistema “*off site*” após a remoção e separação de fases, toda a massa removida é transportada para um local onde receberá o tratamento adequado ou será disposta.

A seguir são apresentadas brevemente as tecnologias mais utilizadas, entre as quais se encontra a extração multifásica. Conforme apresentado na Figura 5, a CETESB constatou em 2005 que das 1193 áreas que estavam sendo remediadas, 82% estavam sendo atendidas por uma das seguintes tecnologias: bombeamento e tratamento, recuperação de fase livre, extração de vapores (SVE), remoção de solo/resíduo e extração multifásica (MPE).

2.4.1 Bombeamento e Tratamento

É um dos métodos mais antigos de remediação, também conhecido como “pump and treat”, consiste em remover águas contaminadas, por meio de poços de extração, para que elas possam ser tratadas, *on site* ou *off site*, e receber disposição adequada.

O princípio do método é remover a maior parte possível da água subterrânea contaminada, por meio da advecção, usando poços de extração e bombeando a água até a superfície para tratamento. Consiste fundamentalmente em posicionar estrategicamente um poço (ou série de poços) em uma pluma de contaminação, para extrair a água utilizando bombas e, posteriormente, tratar a água na superfície, mediante o emprego de sistemas que

tipicamente empregam filtros, extração de compostos voláteis em torre de aeração (também conhecido como “*air stripping*”) ou carvão ativado (CETESB, 2001) O método de bombeamento e tratamento de águas subterrâneas também é bastante empregado para a contenção hidráulica de plumas de contaminação.

2.4.2 Extração de Vapores (SVE)

Este método consiste na extração de vapores do solo por meio da aplicação de vácuo. Com a redução da pressão, um fluxo de ar é induzido na subsuperfície, volatilizando e eliminando os compostos orgânicos voláteis (VOCs).

O SVE é um método de remediação “*in situ*” para tratar compostos orgânicos voláteis. Originalmente a tecnologia foi usada para remover os vapores do solo, prevenindo a migração de vapores para edificações.

Adicionalmente à volatilização, o sistema de SVE também remove alguns hidrocarbonetos por biodegradação. A volatilização ocorre quando o fluxo de ar entra em contato com hidrocarbonetos residuais, ou com películas de água contendo hidrocarbonetos dissolvidos. A biodegradação ocorre porque o fluxo de ar induzido fornece oxigênio para a biodegradação aeróbica (CETESB, 2001).

2.4.3 Bioventilação

A bioventilação é uma técnica de remediação “*in situ*”, baseada na degradação de contaminantes orgânicos adsorvidos no solo pela ação de microrganismos de ocorrência natural. Na bioventilação, a atividade destes microrganismos é melhorada pela introdução de um fluxo ar (oxigênio) na zona não saturada, usando poços de injeção ou extração e caso necessário, adicionando-se macros nutrientes ao meio (CETESB, 2001).

Na bioventilação, compostos presentes no solo da franja capilar ou na zona saturada não são tratados. A principal diferença em relação à técnica de extração de vapores, quando poços de extração são utilizados, deve-se ao fato de minimizar a volatilização, diminuindo-se a necessidade de tratamento de gases. A bioventilação é eficiente no tratamento de qualquer contaminante degradável em meio aeróbico, particularmente é muito efetiva na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo, sendo mais recomendada para locais onde ocorreu a liberação de compostos com peso molecular médio (diesel)(EPA,1999).

2.4.4 Sistema de Extração Multifásica (MPE)

A tecnologia MPE abrange contaminantes em ambas as zonas, saturada e vadosa, remediando a contaminação que está dissolvida, que está em fase vapor, que é residual e também a que está em fase não aquosa (NAPL). A remoção de massa é obtida por volatilização, dissolução e por transporte advectivo. Em geral, se os sistemas SVE e os sistemas de bombeamento e tratamento convencionais (*pumping and treat*) são tecnologias potencialmente aplicáveis, então o sistema MPE pode ser considerado uma excelente alternativa de remediação (EPA, 1999).

Dentre as capacidades e os fatores primários que definem a tecnologia MPE como uma alternativa de remediação podem ser citados: o aumento nas taxas de recuperação da água subterrânea, comparativamente às práticas convencionais de bombeamento, em cenários hidrogeológicos equivalentes (EPA, 1999), o aumento no raio de influência de poços individuais de recuperação, o que reduz o número de poços necessários para que se atinjam os objetivos de remediação (SUTHERSAN, 1997); a recuperação em camadas superficiais de produtos em fase livre (EPA, 1999); a remediação da franja capilar (EPA, 1999); a remediação de contaminantes voláteis ou em fase residual, localizados acima e abaixo da superfície freática (EPA, 1999); e a remediação simultânea do solo e da água subterrânea em áreas com baixa permeabilidade, evitando possíveis escavações (SUTHERSAN, 1997).

A terminologia MPE

Extração multifásica é um termo genérico que designa tecnologias que extraem compostos voláteis orgânicos (VOC), a partir do solo e da água subterrânea, simultaneamente (EPA, 1999).

Segundo Suthersan (1997), o sistema MPE é caracterizado pela aplicação de vácuo a um poço de extração, visando ampliar a recuperação de líquidos, devido ao aumento do rebaixamento efetivo, assim como aumentar a remoção de massa de contaminantes, voláteis e semi-voláteis, facilitando a extração por volatilização, em decorrência do incremento de fluxo de ar em sedimentos que eram previamente saturados.

Embora o princípio de usar a pressão negativa para aumentar a recuperação de água subterrânea já venha sendo utilizado há algum tempo, apenas recentemente, a técnica foi diretamente aplicada aos sistemas de remediação de áreas contaminadas (PALMER &

NYER, 2001). Para Palmer & Nyer(2001), o sistema MPE apresenta características únicas quando aplicado à remediação ambiental, pois é capaz de combinar o uso da água e do ar como transportadores de massa.

A extração multifásica é identificada por muitos outros nomes na literatura (EPA, 1999). A Tabela 4 lista alguns dos termos usados como referência à tecnologia MPE. A terminologia utilizada na indústria de remediação não é única ou consistente, uma vez que algumas organizações deste meio criaram as suas próprias marcas de mercado. A maioria delas utiliza uma das três configurações a serem apresentadas neste capítulo.

Tabela 4 - Termos para tecnologia MPE

Termo	Configuração
Extração <i>Dual-Phase</i> (DPE)	Termo genérico para MPE
<i>Bioslurping</i>	Configuração de bombeamento flutuante
Extração de Tubo Mergulhado (<i>Drop-Tube Entrainment Extraction</i>)	Configuração de bombeamento simples
Extração Poço-Filtro (<i>Well-Screen Entrainment Extraction</i>)	Extração de vapores e água subterrânea de um poço selado com vácuo induzido. A água subterrânea é aspirada pela corrente de vapor no filtro do poço.
Extração <i>Dual-Phase</i> de Alto Vácuo (HVDPE)	Configuração de bombeamento duplo com aplicação de vácuo intenso.
Extração <i>Dual-Phase</i> de Baixo Vácuo	Configuração de bombeamento duplo com aplicação de vácuo pouco intenso.
Extração de Duas Fases (TPE)	Configuração de bombeamento simples com aplicação de vácuo pouco intenso.
Extração de Fundo de Poço (<i>Downhole-Pump Extraction – VE/GE</i>)	Configuração de bombeamento duplo.
Bombeamento Aumentado por Vácuo (<i>Vacuum Enhanced pumping – VEP</i>)	Termo genérico para MPE.
Recuperação Aumentada por Vácuo (<i>Vacuum Enhanced Recovery – VER</i>)	Termo genérico para MPE.

(Fonte: Adaptado de EPA, 1999)

Remoção de Massa

A tecnologia MPE é tipicamente aplicada em poços de extração que construtivamente tenham alguma porção do filtro estendendo-se acima do nível d'água, atingindo a zona vadosa (EPA, 1999). A recuperação da água subterrânea é obtida pelo bombeamento na superfície do nível d'água, ou, abaixo dela, enquanto a aplicação de vácuo extrai os vapores do solo e potencializa a recuperação de líquidos, aumentando as vazões, devido ao gradiente

de pressão aplicado no sistema. Existem três mecanismos principais de remoção de massa, que são sucintamente abordados nos itens que se seguem.

Recuperação de Água Subterrânea

O sistema de bombeamento e tratamento baseia-se no efeito da gravidade, e, com a queda do nível d'água no poço é causada uma depressão da superfície potenciométrica no entorno dele, gerando um cone de rebaixamento, que induz um fluxo de água em direção ao mesmo. A área que contém toda a água mobilizada pelo fluxo em questão é denominada zona de captura e representa a extensão que será contida, ou, remediada, pelo poço de extração referido (PALMER & NYER, 2001). As Figura 11 e Figura 12 representam esta zona.

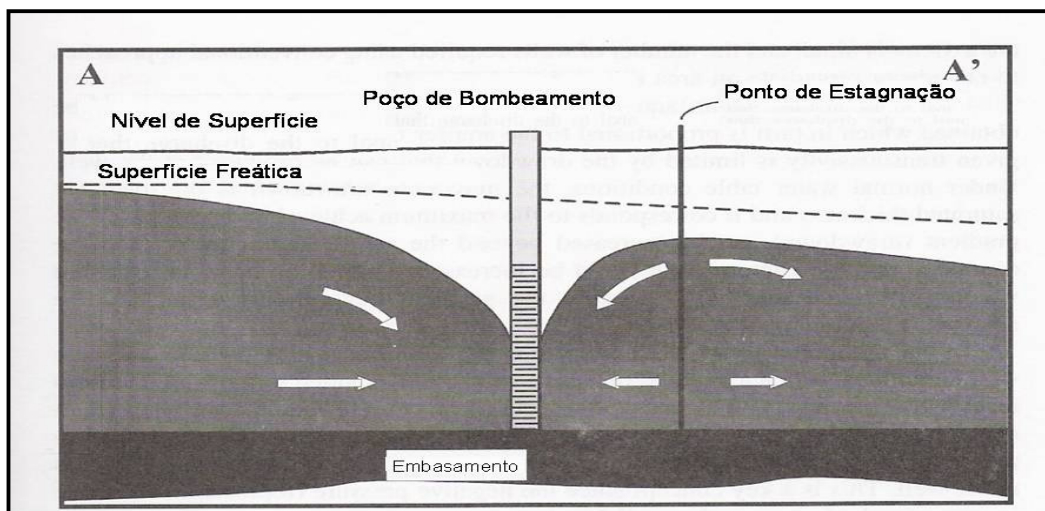


Figura 11 - Zona de Captura vista em corte
(Fonte: Adaptado de Nyer & Palmer, 2001)

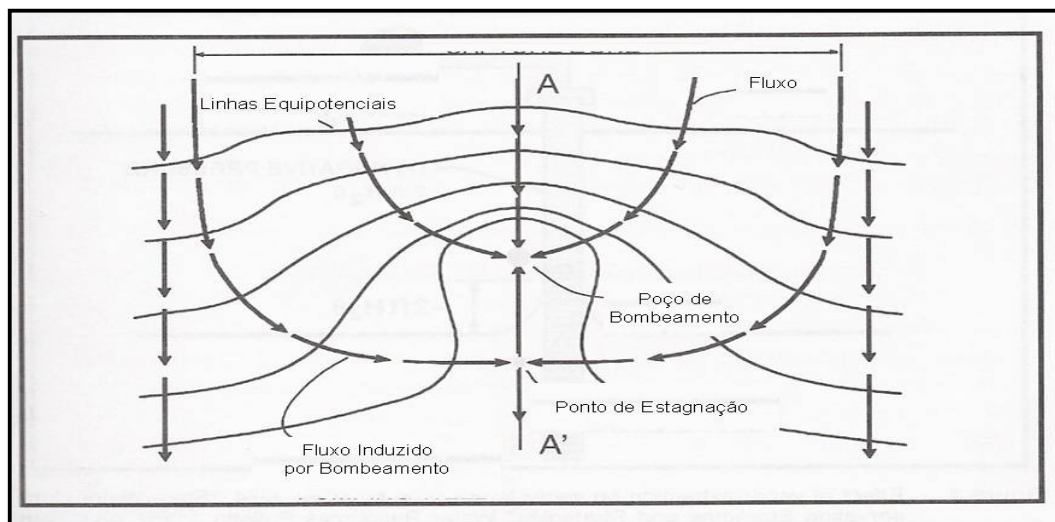


Figura 12 - Zona de Captura vista em planta
(Fonte: Adaptado de Nyer & Palmer, 2001)

Em condições hidrogeológicas normais, o maior rebaixamento que pode ser produzido em um poço, é igual à espessura saturada do aquífero, que é proporcional à descarga que pode ser obtida. Assim, se fosse possível aumentar o rebaixamento do nível d'água para além da espessura saturada, seria esperado um aumento da descarga e uma expansão da zona de captura (PALMER & NYER, 2001). É exatamente este o ponto de diferenciação entre a recuperação de água subterrânea obtida por um sistema de bombeamento tradicional e aquela atingida por meio da tecnologia MPE.

No sistema MPE, o incremento da pressão negativa em subsuperfície proporciona um maior rebaixamento efetivo, o que pode gerar o aumento significativo da taxa de extração de água subterrânea e também da taxa de remoção de contaminantes dissolvidos (SUTHERSAN, 1997). A Figura 13 ilustra, qualitativamente, o efeito da aplicação de vácuo.

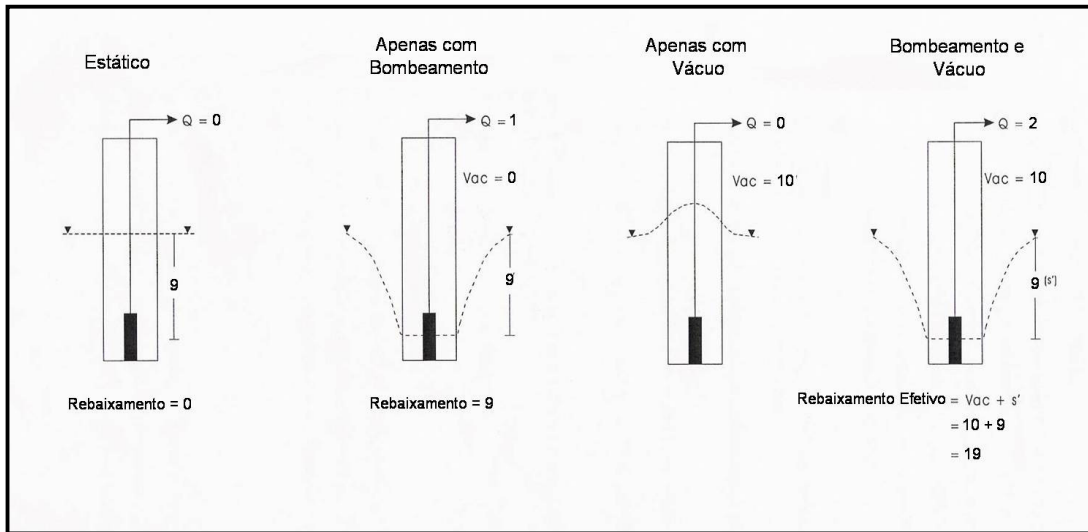


Figura 13 - Efeito do vácuo no bombeamento
(Fonte: Adaptado de EPA, 1999)

O rebaixamento em um poço de bombeamento sem influência de vácuo será igual à diferença entre o nível d'água estático e o nível d'água dinâmico no mesmo. Este rebaixamento resultará em certa vazão. Por sua vez, a influência isolada do vácuo em um poço de extração, causa uma elevação da superfície potenciométrica, proporcional à pressão negativa exercida pelo vácuo aplicado. Com a utilização da tecnologia MPE, os dois efeitos são superpostos, de forma que o rebaixamento efetivo se torna a diferença entre o nível d'água elevado pelo vácuo e o nível dinâmico rebaixado devido à depressão causada pelo bombeamento na superfície potenciométrica. O incremento no rebaixamento é verificado no aumento na produção do poço (SUTHERSAN, 1997).

Embora o efeito do aumento de vazão reflita, essencialmente, em uma remoção mais eficiente de contaminantes dissolvidos, existem outros benefícios obtidos com a aplicação da técnica. Por exemplo, com o vácuo aplicado, é possível superar as pressões capilares e drenar a água subterrânea que antes ficara retida por sedimentos finos em poros do solo, ou ainda, com o rebaixamento do nível d'água, expor sedimentos da zona saturada ao fluxo de ar imposto pelo vácuo, o que possibilita a aplicação do método de extração de vapor (mesmo princípio do sistema SVE) para remoção de contaminantes adsorvidos que estavam abaixo da superfície de nível d'água (SUTHERSAN, 1997).

Remoção de Fase Livre

Do mesmo modo que a aplicação de vácuo em sistemas de recuperação pode aumentar as vazões em formações de baixa permeabilidade, também pode gerar um crescimento na taxa de remoção de compostos em fase livre sobrenadante (LNAPL).

Usualmente, a remoção de LNAPL é o passo inicial na remediação de um aquífero, dado que a fase livre costuma representar grande parte da massa de contaminantes, além de atuar como fonte contínua de contaminação em fase dissolvida e adsorvida (SUTHERSAN, 1997).

O aumento do gradiente hidráulico e do rebaixamento efetivo permitem uma maior drenagem de fase livre para o poço, sendo esta posteriormente recuperada como um líquido. Por outro lado, se os produtos contaminantes contiverem uma fração volátil significativa, o fluxo de ar gerado pela aplicação do vácuo ao longo da interface entre a superfície da fase livre e da zona vadosa vai causar um aumento na partição da fase livre para a fase de vapor, permitindo a remoção de contaminantes na forma de vapores (SUTHERSAN, 1997).

O manejo de dados para cálculo do raio de influência pode ser feito com base no método gráfico, onde os valores de rebaixamento, em escala linear, são locados em relação às distâncias, em escala logarítmica, dos poços observados ao poço de bombeamento. O procedimento se baseia na equação geral de fluxo da água subterrânea em direção a um poço totalmente penetrante, a qual pode ser escrita da seguinte maneira, conforme apresentado por KRESIC (1997):

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (4)$$

Onde:

h = carga hidráulica medida a uma distância r a partir do poço de bombeamento

H = carga hidráulica inicial

R = raio de influência do poço

Q = vazão de bombeamento

K = condutividade hidráulica

A partir de uma série de etapas baseadas nas regras básicas de cálculos logarítmicos, esta equação pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$H^2 - h^2 = \text{const.} - \frac{0,733 \cdot Q}{K} \log r \quad (5)$$

A **Equação (5)** mostra que os dados referentes ao cone de rebaixamento se tornarão uma reta quando locados em um gráfico mono-logarítmico, obedecendo à função: $[H^2-h^2 = f(\log r)]$.

Remoção de Vapores do Solo

Como já foi dito, a aplicação de pressão negativa proporciona um incremento ao fluxo de ar na zona vadosa e, portanto, permite maior remoção de contaminantes na fase vapor ou em fase adsorvida. Além disso, o aumento do fluxo de ar em formações de baixa permeabilidade, gera uma oxigenação da subsuperfície que pode impulsionar a biodegradação de contaminantes que sejam degradáveis em condições aeróbicas.

A quantificação da fase vapor, compreendendo os compostos orgânicos voláteis (VOC) presentes na composição do combustível, é realizada através de medições realizadas com o auxílio de um medidor de gás portátil, o qual fornece leituras de VOC em ppm-v. Este medidor é calibrado com hexano, de peso molecular 86g/g mol, sendo que os cálculos de massa de VOC removida são expressos em equivalentes de hexano, por meio da seguinte equação:

$$T = Q \times C \quad (6)$$

Onde:

T = taxa máxima removida

Q = vazão dos gases na saída da bomba de vácuo

C = concentração de VOC

A concentração de VOC é obtida através da seguinte equação:

$$C = PM \times \text{ppm-v} / 24,45 \quad (7)$$

Onde:

C = concentração de VOC em mg/m³

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

ppm-v = leitura obtida através do medidor de gás portátil

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

2.4.4.1 Principais Configurações

A tecnologia MPE pode ser projetada e aplicada em várias configurações. Os três principais arranjos são nomeados pelo tipo de bombeamento sendo eles: bombeamento simples, duplo e *bioslurping*. O último é, essencialmente, uma pequena variação da configuração do bombeamento simples usada para a recuperação de produtos em fase livre. A torre de *stripping* geralmente se apresenta associada ao sistema MPE, sendo responsável pela aeração do efluente bombeado pelo poço e pela extração de compostos orgânicos voláteis. Cada uma das três formas de aplicação da tecnologia MPE é descrita nas seções seguintes.

Configuração de Bombeamento Simples

Na configuração de bombeamento simples, como mostrado na Figura 14, um único tubo mergulhado é empregado para extrair tanto a fase líquida, quanto a fase vapor de um mesmo poço de extração. A sucção do líquido e dos vapores é obtida por uma bomba de vácuo (bombas de anel líquido, *jet pumps* e sopradores são típicos) (SUTHERSAN, 1997).

A pressão negativa exercida pelo vácuo absoluto é equivalente à pressão atmosférica em módulo, ou seja, atinge cerca de 1 atm, valor que corresponde a aproximadamente 10,33 m de coluna d'água. Deste modo, teoricamente, poder-se-ia esperar que este arranjo fosse aplicável a situações com profundidades máximas em torno de 10 m. Contudo, na prática, percebe-se que a real limitação fica estabelecida na casa dos 6 m (PALMER & NYER, 2001).

Sendo assim, configurações de bombeamento simples são usadas para remediações em superfícies de nível d'água rasas (EPA, 1999; SUTHERSAN, 1997).

As principais vantagens desse tipo de arranjo são os baixos custos de instalação, operação e manutenção do sistema. As desvantagens são os alcances de profundidades limitados, a dificuldade de se balancear o vácuo em múltiplos poços e a necessidade de se manter uma alta pressão negativa para a extração dos líquidos, o que limita a flexibilidade do sistema (PALMER & NYER, 2001).

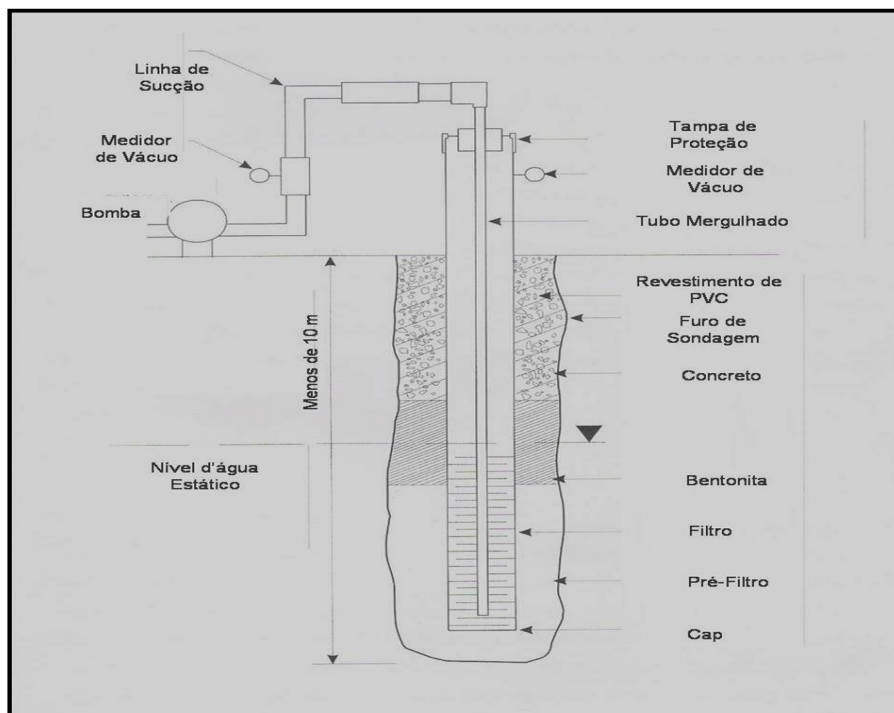


Figura 14 - Ilustração esquemática da configuração de bombeamento simples
(Fonte: Adaptado de EPA, 1999)

Configuração de Bombeamento Duplo

Limitações quanto à profundidade podem ser superadas com a segunda configuração, o sistema MPE de bombeamento duplo, mostrado na Figura 15.

Este sistema utiliza uma bomba submersa para a recuperação da água subterrânea conjugada com uma bomba a vácuo instalada na boca do poço de extração. Nesta configuração, os fluxos de vapor e líquido são separados um do outro, por meio de dois tubos mergulhados independentes.

Aplicações para a recuperação de produtos em fase livre leve (LNAPL), normalmente, empregam bombas submersas pneumáticas para a extração de líquidos (EPA, 1999; SUTHERSAN, 1997).

Comparativamente ao arranjo de bombeamento simples, este tipo de sistema é mais fácil de balancear e de operar quando estão envolvidos cinco ou mais poços, oferecendo maior flexibilidade após a seleção da pressão de vácuo ótima para o conjunto. Entretanto, os custos envolvidos na instalação, operação e manutenção do sistema são maiores. Além disso, deve-se proceder a uma escolha muito cuidadosa do modelo de bomba adotada para extração

de líquidos, pois uma seleção indevida, resultará na perda de gradiente hidráulico e, portanto, no sério comprometimento dos resultados esperados (PALMER & NYER, 2001).

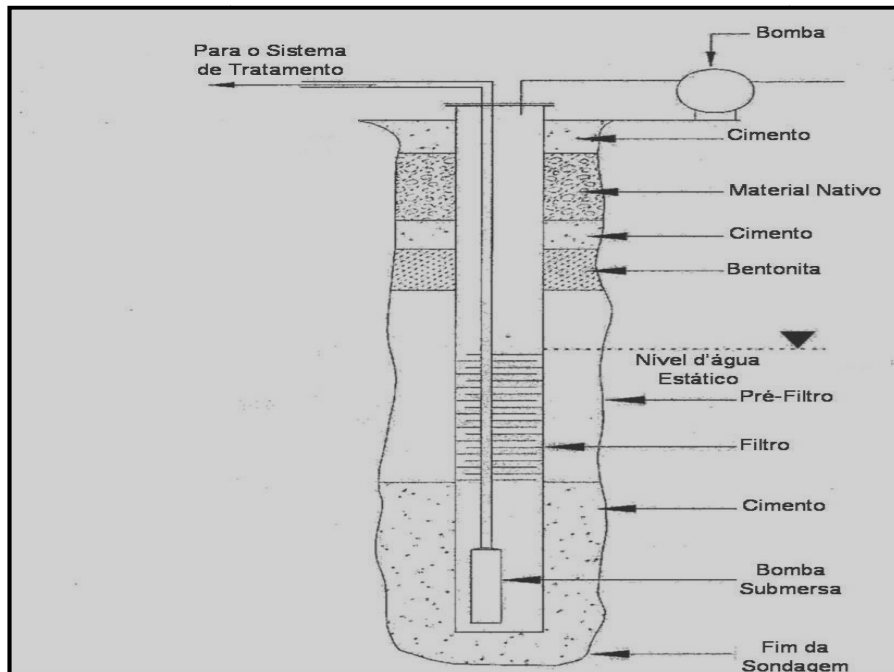


Figura 15 - Ilustração esquemática da configuração de bombeamento duplo (Fonte: Adaptado de EPA, 1999)

Bioslurping

Outra configuração de MPE é referenciada como *bioslurping* (KITTEL et al, 1994), O sistema de Bioslurping conforme a Figura 16 apresenta uma configuração onde o tubo responsável pelo bombeamento é inserido dentro do poço de extração e posicionado na interface líquido-ar, ou imediatamente abaixo dela. Sendo que o tubo não é fixo, podendo-se ajustar sua profundidade em função da flutuação sazonal ou da variação da espessura da fase livre.

Este arranjo tem se mostrado eficiente para recuperação de produtos em fase livre, sendo esta sua aplicação usual (SUTHERSAN, 1997; KITTEL et al, 1994). O sistema bioslurping extrai água, LNAPL e ar, de um único tubo mergulhado em um poço de extração. (KITTEL et al, 1994). Um objetivo secundário do bioslurping é o aumento da

biodegradação *in-situ* de hidrocarbonetos aromáticos, como um resultado do incremento do fluxo de ar.

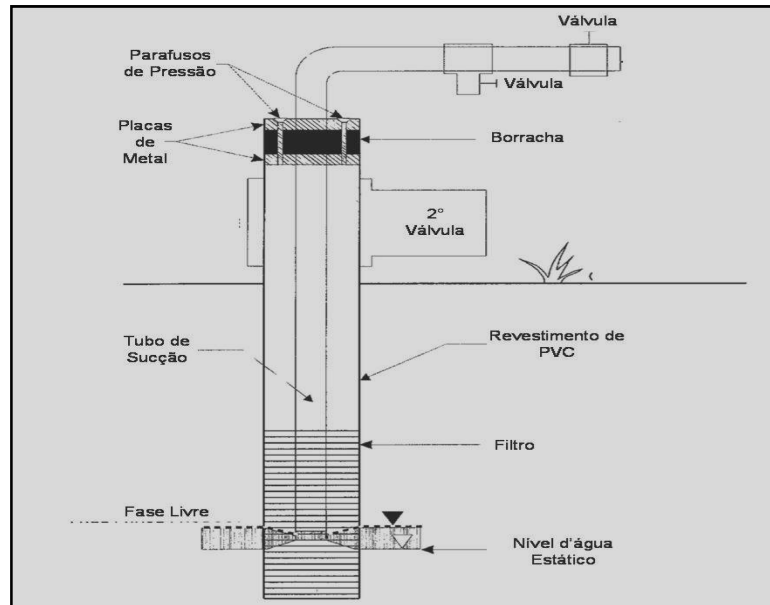


Figura 16 - Ilustração esquemática da configuração de bombeamento do tipo *bioslurping* (Fonte: Adaptado de EPA, 1999)

2.4.4.2 Aplicabilidade e Limitações

O uso da MPE pode ser altamente eficaz para a remediação, uma vez assegurada a aplicação da tecnologia dentro de um cenário ideal de hidrogeologia e de contaminação. Se aplicada fora das condições apropriadas, a MPE pode ser ineficaz na remediação do problema, ou economicamente inviável (SUTHERSAN, 1997). A aplicabilidade da MPE é definida, principalmente, pelas propriedades do meio e, em menor extensão, pelas propriedades dos contaminantes (EPA, 1999).

A condutividade hidráulica (K) é o parâmetro de maior interesse, já que caracteriza a capacidade que uma formação tem de transmitir água. A tecnologia MPE é bastante aplicável em formações de granulometria fina, apresentando bom rendimento no campo que vai de areias finas até siltes arenosos (condutividade hidráulica, $K = 10^{-3}$ até 10^{-5} cm/s) (EPA, 1999). A aplicação do sistema em formações com condutividades hidráulicas mais baixas (menores que 10^{-6} cm/s) pode ser possível, desde que existam permeabilidades secundárias (SUTHERSAN, 1997).

Formações de baixa permeabilidade intrínseca costumam apresentar espessas zonas capilares, nas quais forças de capilaridade retêm fluidos nos espaços porosos. A formação de vácuo em um sistema MPE supera essas forças capilares e remove fluidos da zona capilar. Isso leva a uma vantagem específica para a recuperação de LNAPL, que tendem a se acumular na zona capilar, na interface entre água e ar.

Além da condutividade como parâmetro de interesse, a avaliação da transmissividade é relevante para a aplicação da tecnologia MPE. As condições de transmissividades pouco expressivas, menores que $0,5\text{m}^3/\text{dia}/\text{m}$, são normalmente consideradas favoráveis para a utilização de sistemas de remediação MPE (SUTHERSAN, 1997).

A aplicabilidade da tecnologia MPE também é determinada pela volatilidade e pela pressão de vapor dos contaminantes, uma vez que um dos mecanismos de remoção do sistema consiste na volatilização de compostos, seguida pelo transporte advectivo destes para os poços de extração (PEARLIN, 1995). Portanto, a MPE é melhor aplicada à compostos derivados de hidrocarbonetos de petróleo (e.g., benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), de solventes e de agentes desengraxantes (e.g., tetracloroetileno e tricloroetileno) (EPA, 1999). Alguns estudos asseguram que a MPE é aplicável para contaminantes não-voláteis, desde que garantido o aumento do fluxo de ar e a conseqüente introdução de oxigênio em subsuperfície, o que estimularia a biodegradação (EPA, 1999; KITTEL et al, 1994).

A Tabela 5 relaciona os parâmetros que determinam a aplicabilidade da técnica, e a Tabela 6 apresenta um sumário das suas vantagens e limitações potenciais. Sendo que uma das vantagens mais relevantes é a capacidade da MPE funcionar, efetivamente, em formações de baixa a moderada permeabilidade (EPA, 1999 SUTHERSAN,1997). Além da versatilidade por ser empregada para remediação de múltiplas fases de contaminação, incluindo as fases de vapores, residuais, dissolvidas e também as não aquosas (NAPL), enquanto o bombeamento convencional trata somente as duas últimas (EPA, 1999). Deste modo, sistemas MPE podem remover contaminantes que, de outra maneira, seriam removidos somente por escavação. (SUTHERSAN, 1997).

Tabela 5 - Aplicabilidade da tecnologia MPE

Parâmetro	Intervalos e Características de Aplicação para MPE
Condutividade Hidráulica	Moderada a baixa ($K = 10^{-3}$ a 10^{-5} cm/s).
Transmissividade	Baixa.
Cenário Geológico	Areias a Argilas.
Permeabilidade do Ar na Zona Vadosa	Moderada a baixa ($k < 10^{-8}$ cm ²).
Características das Formações Abordadas	-Sistemas fraturados e de baixa permeabilidade; -Camadas de areia e argila alternadas; -Espessura saturada limitada; -Nível d'água raso; -Franja capilar espessa; -Ocorrência de NAPL.
Rebaixamento/Taxas de Recuperação	-Condições produzindo altos rebaixamentos; -Baixa recuperação de água subterrânea atingida por bombeamento tradicional.
Localização da Contaminação	Zona vadosa, zona saturada e franja capilar.
Contaminantes	-VOCs halogenados; -VOCs aromáticos e/ou hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH); -Fases livres sobrenadantes (LNAPL).
Pressão de Vapor do Contaminante	>1 mm Hg a 20°C.
Volatilidade do Contaminante	H > 0,01 a 20°C

(Fonte: Adaptado de EPA, 1999)

Tabela 6 - Sumário de vantagens e desvantagens da tecnologia

Vantagens	Desvantagens
Efetividade em solos de permeabilidade moderada a baixa.	Requer bomba a vácuo ou soprador.
Remoção efetiva de contaminantes em áreas de baixa permeabilidade, onde a única opção diferente para remediação envolveria escavação.	Requer técnicas de separação e tratamento de fases diversificadas.
Remediação efetiva de contaminação em fase dissolvida, vapor, residual e não aquosa.	Requer períodos de partida e períodos de ajustes mais longos do que os verificados em bombeamentos convencionais.
Aumento do raio de influência e da zona de captura de poços de extração.	Custos capitais mais elevados do que os de bombeamentos convencionais.
Aumento do total de fluidos recuperados, rebaixamento do nível d'água e espalhamento de LNAPL minimizados e transmissividade do aquífero maximizada.	Limitações de profundidade para algumas configurações de MPE.
Redução no número de poços de extração instalados.	
Remediação efetiva da zona da franja capilar.	
Remediação mais rápida do que a verificada em bombeamentos convencionais.	

(Fonte: Adaptado de EPA, 1999)

2.5 Normas e Legislações Pertinentes

A lei federal nº 6.938/81, de 31 de agosto de 1981, definiu a Política Nacional do Meio Ambiente e criou o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que dentre diversas resoluções regulamentou leis específicas para postos de combustíveis, sendo a principal delas a resolução no. 273, de 29 de novembro de 2000, que dispõe sobre todas as licenças ambientais previstas, sobre o controle da poluição, itens e normas necessários para adequação dos postos de combustíveis e serviços, pois se configuram como empreendimentos potencialmente ou parcialmente poluidores e geradores de acidentes ambientais.

A resolução no. 293, de 12 de dezembro de 2001, dispõe sobre o plano de emergência individual. A resolução no. 319 de 04 de dezembro de 2002 dá nova redação a dispositivos da Resolução CONAMA no. 273, que dispõe sobre prevenção e controle da poluição em postos de combustíveis e serviços.

A resolução no. 357, de 17 março de 2005, estabelece as classes dos corpos da água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

A Lei de Crimes Ambientais no. 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 também é referência, pois dispõe sobre sanções e ações penais e administrativas aplicáveis às atividades lesivas ao meio ambiente.

Já as normas NBR são específicas, sendo que a NBR 13786/97 dispõe sobre a classificação dos postos em função da análise do ambiente em seu entorno, a uma distancia de 100 metros, visando a identificação do fator de agravamento em casos de emergência. E a NBR 13895/97 é responsável por estabelecer os padrões construtivos de Poços de Monitoramento e Amostragem.

Para a comparação dos valores das análises químicas em áreas contaminadas, os valores orientadores para solos e águas subterrâneas tem como base principal os dados CETESB definidos em 2005 pelo documento sob titulo de Decisão de Diretoria No. 195-2005-E. Mas pelo fato dos valores orientadores da CETESB não englobar todos os possíveis contaminantes, a CETESB utiliza normas internacionais, como a Lista Holandesa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida neste estudo de caso envolveu a seleção das informações disponibilizadas pela Geoklock Consultoria e Engenharia Ambiental, sobre os serviços de remediação por eles prestados em um posto de combustível, através dos relatórios do período de 2000 a 2005.

A partir da leitura dos relatórios de investigação, análise de risco, instalação, operação e avaliação elaborados pela Geoklock, e de posse dessas informações, foi elaborado um relato dos serviços realizados na área com as informações pertinentes, realizando-se a verificação da aplicabilidade da tecnologia MPE em três etapas, sendo elas:

- a) a adequabilidade da área para uso das tecnologias MPE, conforme a Tabela 5, descrita no item 2.4.4.2;
- b) escolha de metas de remediação, tanto do solo como da água subterrânea. Para o solo foi utilizado o valor orientador da Lista Holandesa para TPH igual 500 mg/kg (em peso seco) e para água subterrânea, a meta foi a remoção da fase livre. A descrição destes valores pode ser visualizada abaixo. Em ambos os casos foi estabelecido um tempo em meses para que o objetivo de remediação fosse atingido e
- c) Avaliação das metas de remediação e dos resultados obtidos com o uso da tecnologia, segundo os valores orientadores da CETESB.

Para a escolha das metas de remediação, as seguintes definições são utilizadas para diferenciação dos valores orientadores (CETESB, 2001):

Valor de Referência de Qualidade - VRQ é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que define um solo como limpo ou a qualidade natural da água subterrânea, é determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos e amostras de águas subterrâneas de diversos aquíferos. Deve ser utilizado como referência nas ações de prevenção da poluição do solo e das águas subterrâneas e de controle de áreas contaminadas.

Valor de Prevenção ou Valor de Alerta- VP ou VT é a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo e da água subterrânea. Este valor indica a qualidade de um solo capaz de sustentar as suas funções primárias, protegendo-se os receptores ecológicos e a qualidade das águas subterrâneas. Foi determinado para o solo com base em ensaios com receptores ecológicos. Deve ser utilizado para disciplinar a introdução de substâncias no solo e, quando ultrapassado, a continuidade da atividade será submetida a nova avaliação, devendo os responsáveis legais pela introdução das cargas poluentes proceder o monitoramento dos impactos decorrentes.

Valor de Intervenção - VI é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerado um cenário de exposição genérico.

Na Tabela 7 abaixo estão listados os principais contaminantes abordados no estudo de caso e seus respectivos valores de intervenção.

Tabela 7 - Principais contaminantes e valores de intervenção

Qualidade do Solo	Valores de intervenção
Valores em mg/kg	
Tolueno	40 ⁽¹⁾
etilbenzeno	40 ⁽¹⁾
Xilenos	30 ⁽¹⁾
Naftaleno	60 ⁽¹⁾
TPH	500 ⁽²⁾

⁽¹⁾Valor de Intervenção da CETESB (2001)

⁽²⁾Valor de Intervenção da Lista Holandesa (CETESB, 2001)

4 RESULTADOS

4.1 Histórico da Área e Descrição do Entorno

O Posto combustível começou a funcionar na década de 60 ocupando um terreno de aproximadamente 6400 m², em uma região de ocupação heterogênea, com predominância de comércio de pequeno e médio porte, residências, sendo que nas vizinhanças do posto, também se localiza a Câmara Municipal da cidade e na área que dá para os fundos do posto, existe um córrego, há época parcialmente canalizado.

A planta do posto, com suas respectivas instalações e seus arredores, está representada na Figura 17.

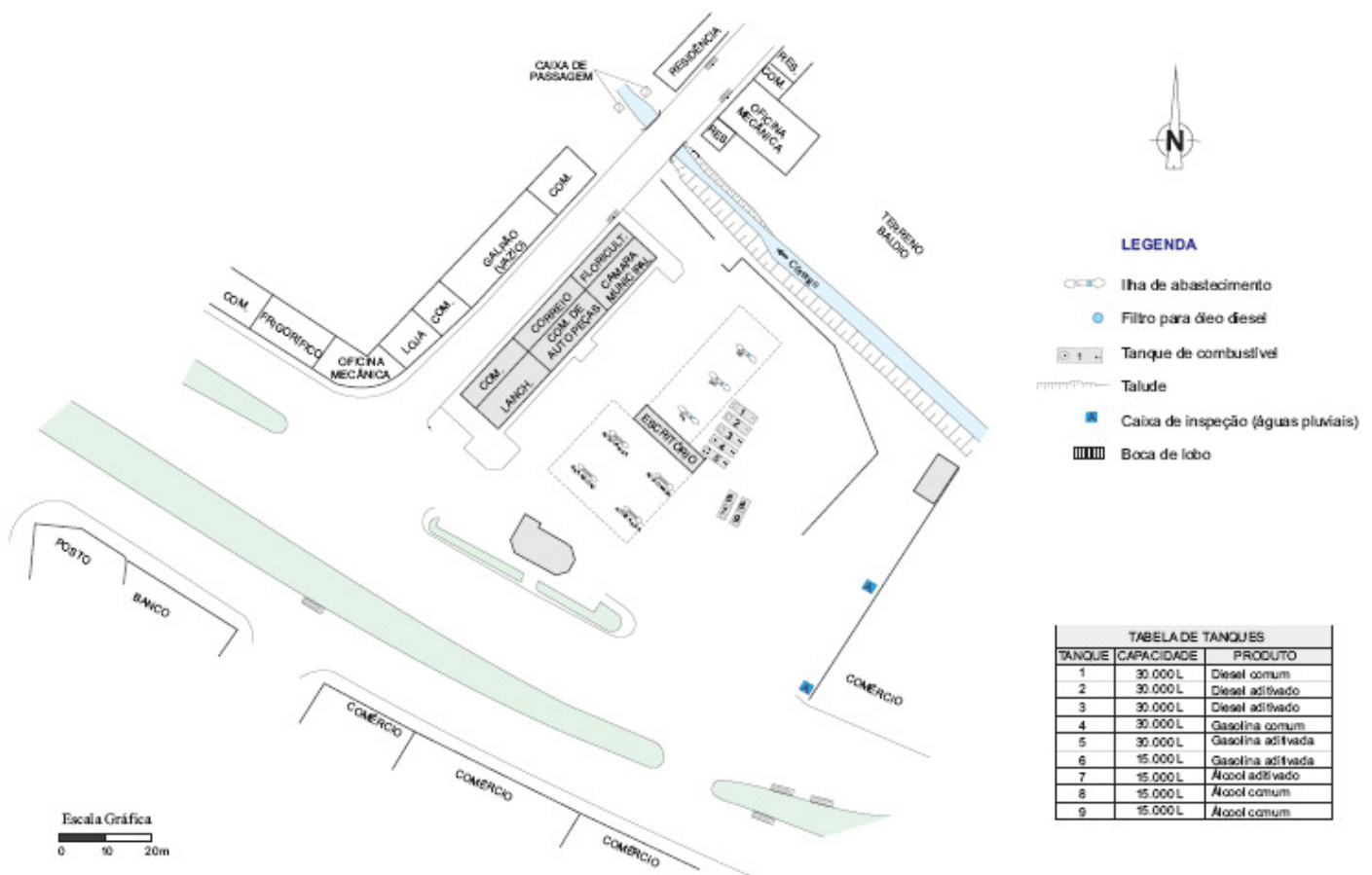


Figura 17 - Arranjo físico das instalações do posto e arredores (Fonte: adaptado de GEOKLOCK, 2000)

Segundo a ABNT/NBR 13.786 este Posto enquadra-se na Classe 1, devido à existência de residências térreas, em um raio de 100 metros do posto.

Em dezembro de 1999 em decorrência do forte odor de combustível percebido pelos funcionários posto e pela população de seu entorno, a GEOKLOCK Consultoria e Engenharia Ambiental Ltda. foi contratada para realizar um atendimento emergencial no referido estabelecimento.

Foi conduzida uma primeira vistoria e foi constatado, de fato, o forte odor de combustível assim como a existência de uma película de combustível sobrenadante às águas do córrego a jusante do posto, evidenciando risco imediato à saúde humana ou a receptores ambientais sensíveis, devido à existência de produto em fase livre em corpo d'água superficial.

4.2 Atendimento Emergencial e Avaliação Preliminar

Em caráter emergencial, visando suprimir o vazamento que atingia o córrego, foram instaladas mantas de absorção e meias de polipropileno, com o intuito de promover a remoção do combustível que migrava, por drenos, no talude à margem do córrego.

Posteriormente, foi providenciada a instalação de barreiras de absorção de óleo, em conjunto com as mantas de absorção. E foi instalado um sistema de bombeamento no córrego constituído por uma comporta instalada ao final do muro de canalização, que represava o combustível, e por uma bomba elétrica associada à uma caixa separadora (água/óleo). O produto recuperado era estocado em tambores de 200 l e posteriormente removido por uma empresa especializada.

Em fevereiro de 2001, iniciou-se a instalação de um sistema de ponteiros, com o objetivo de conter o aporte de combustível para o córrego. Este sistema proporcionou uma sensível queda no fluxo de produto para o corpo d'água citado.

A remoção emergencial transcorreu entre janeiro de 2000 e fevereiro de 2001, tendo recuperado cerca de 34.300 l de combustível.

Dentre os procedimentos que fazem parte do escopo de métodos diretos de investigação ambiental está a execução das sondagens de reconhecimento, que são necessárias para a caracterização mais aprofundada da litologia na área de interesse,

delimitação da contaminação, instalação de poços de monitoramento necessários para a coleta de amostras de água subterrânea, que também é um método direto de investigação.

Sondagens de Reconhecimento

Foram realizadas 45 sondagens a trado manual tendo como objetivos, a delimitação da extensão da pluma de fase livre, a identificação das litologias existentes, a avaliação de indícios de contaminação no solo e a coleta de amostras de solo para análises químicas.

Instalação de Poços

Com base nos dados obtidos por meio das sondagens de reconhecimento, foram instalados, 12 poços de monitoramento (PM-1 a PM-12) construídos em PVC geomecânico, 1 poço de bombeamento (PB-1) construído segundo a normalização para construção de poços de monitoramento e amostragem (NBR 13895/97) e 2 poços de observação (PO-1 e PO-2).

A instalação destes poços teve por objetivos, permitir o monitoramento da pluma de fase livre, das variações do nível d'água e da direção de fluxo, além de proporcionar a coleta de amostras de água subterrânea, para análises químicas.

Após a conclusão e o desenvolvimento de todos os poços, foi realizada a determinação do coeficiente de permeabilidade, por meio do ensaio de recuperação do tipo carga variável (FREEZE & CHERRY, 1979), nos poços que não apresentaram fase livre. Este coeficiente foi utilizado para o cálculo de condutividades hidráulicas.

Amostragem do Solo e Água Subterrânea

Foram coletadas amostras de solo em intervalos de 0,5 m, para medições de gases VOC *in situ*, no decorrer das sondagens de reconhecimento, sendo que as 4 amostras com maiores valores de VOC foram selecionados como representativas para serem enviadas para análise química laboratorial

Foram coletadas 8 amostras de água subterrânea sendo que os poços de monitoramento com presença de fase livre não foram amostrados.

Os compostos analisados (BTEX, TPH e PAH) foram definidos em função da composição média do óleo diesel e da gasolina comercializados e analisados conforme as metodologias analíticas expressas na Tabela 8.

Tabela 8 - Métodos de amostragem dos parâmetros analisados

Matriz	Parâmetros	Método de Amostragem	Método de Extração e/ou análise
SOLO	BTEX e VOC	CETESB 2001	EPA SW 846-8260B VOC/EPA
	TPH e PAH	CETESB	USEPA 8660 B
AGUA SUBTERRÂNEA	BTEX e VOC	CETESB 2001 E SMEEWW 1995	USEPA 5021/8260 B
	TPH e PAH	ASTM D 6771/02 Amostragem em baixa vazão	SMEWW 6410 B / EPA 8270 C

Geologia e Hidrogeologia

As sondagens realizadas permitiram individualizar os seguintes estratos, do topo para base, em função da composição e da granulometria:

- Aterro argilo arenoso de coloração amarela e marrom, com restos de tijolo e brita;
- Argila orgânica de coloração preta;
- Argila arenosa de coloração cinza, com porções arenosas e algumas intercalações de cascalho;
- Solo de alteração com presença de caulim, minerais máficos e mica.

O aquífero foi classificado como livre, constituído por sedimentos argilosos, com intercalações de areias e cascalho. O Mapa Potenciométrico está representado na Figura 18. Deste modo, fica evidenciado que o fluxo predominante de águas subterrâneas se dá, de sul para norte, em direção ao córrego existente nas proximidades do posto.

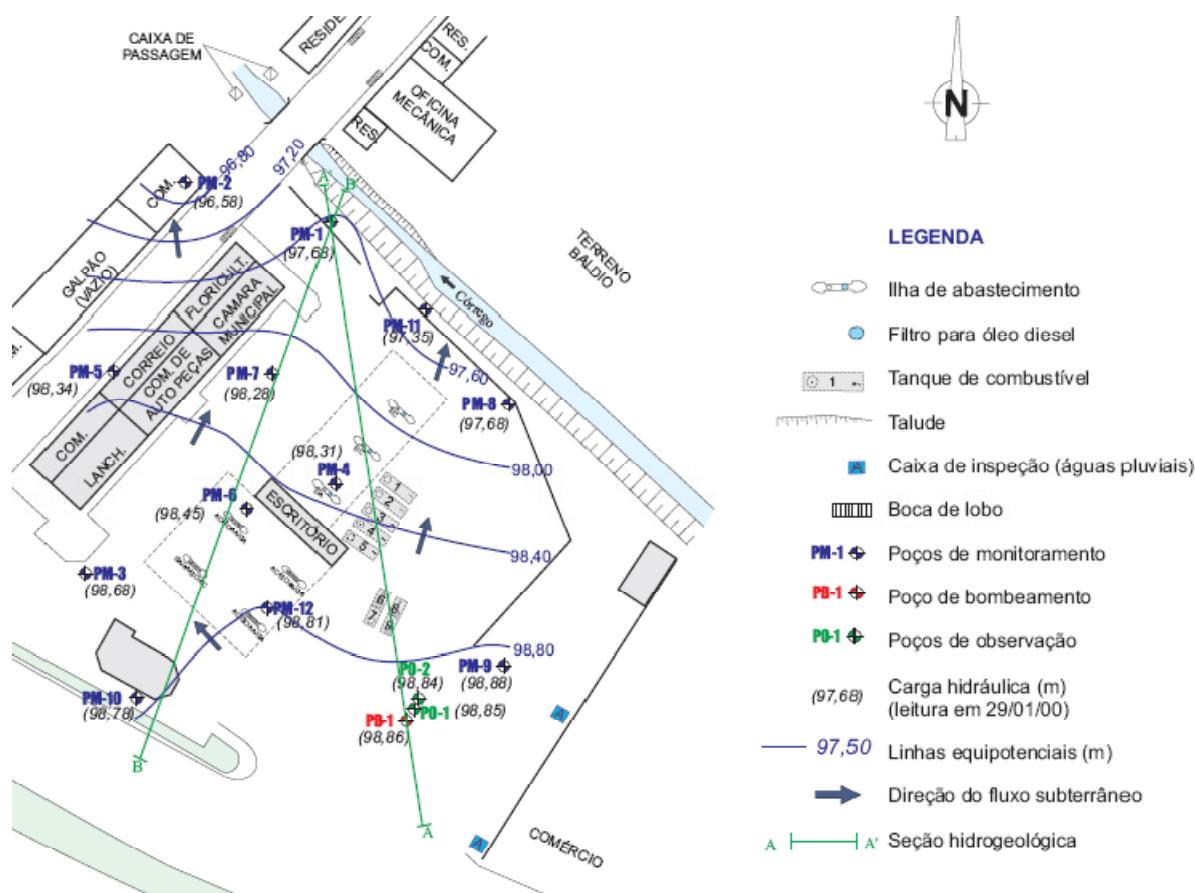


Figura 18- Mapa Potenciométrico
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2000)

Em função do padrão de fluxo e dos parâmetros hidrogeológicos observados, foi possível calcular a velocidade da água subterrânea, de acordo com a Lei de Darcy.

Para isso, foi estimado um gradiente hidráulico médio da ordem de 2,4% e a porosidade efetiva média foi estipulada em 5%, com base em dados bibliográficos para argilas (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996). Empregando-se os valores de condutividade hidráulica obtidos, que apresentam alta variabilidade, calcula-se que a velocidade de fluxo varia de 1,02 m/ano a 23,31 m/ano.

Deve-se entender que a grande variação verificada nos valores de velocidade pode ser atribuída a diferentes fatores: talvez o mais importante deles remeta aos condicionantes geológicos, uma vez que foi notada a ocorrência de intercalações arenosas e de cascalho no material argiloso predominante.

Qualidade do Solo

Os compostos BTEX foram detectados na maioria das amostras de solo analisadas, com as maiores concentrações ocorrendo nas proximidades da ponte no córrego, para os compostos tolueno (3,5 mg/kg), etilbenzeno (6,50 mg/kg) e xilenos (39,0 mg/kg). O composto benzeno foi detectado apenas na amostra próxima do córrego, com concentração de 0,11 mg/kg.

Não foram detectados valores significativos para os compostos PAH, sendo as maiores concentrações verificadas as de fluoreno (3,4 mg/kg), naftaleno (2,9 mg/kg), fenantreno (3,0 mg/kg) e pireno (1,1 mg/kg). Na sondagem, em frente à Câmara Municipal, foram detectados 1500mg/kg de TPH (C5-C10).

Qualidade da Água Subterrânea

Foi detectada a presença de combustível em fase livre nos poços PM-1, 4, 6, 7 e 11, com espessuras de 0,82 m, 2,52 m, 1,22 m, 0,12 m e 0,01 m, respectivamente.

As maiores concentrações para os compostos BTXE foram detectadas no PM-12, localizado na área de distribuição de gasolina e álcool, com valores de 1,5 mg/l para benzeno, 0,98 mg/l para etilbenzeno, 3,9 mg/l para tolueno e 6,3 mg/l para xilenos.

Para PAH, foram detectadas concentrações de 0,00035 mg/l de acenafteno, 0,00035 mg/l de criseno, 0,47 mg/l de naftaleno, 0,00022 mg/l de fluoreno e 0,00005 mg/l de pireno no PM-12, assim como, 0,0019 mg/l de fenantreno no PM-5.

Interpretando-se os dados da avaliação ambiental e da análise de risco realizadas, foi possível chegar às seguintes conclusões sobre a situação do posto de combustível:

Existia uma pluma de fase livre de diesel e gasolina, com área estimada de 3900 m², que atingia o córrego e rua próxima ao posto. Em porção não inclusa na área da pluma de fase livre, as concentrações de compostos em solo e em água subterrânea eram inferiores aos limites estabelecidos pela análise de risco e por constituir uma fonte constante de contaminação, a fase livre detectada nos poços, PM-1, 4, 6, 7 e 11, deveria ser removida.

4.3 Remediação da Área

Com base nos resultados obtidos de análise de solo e água, procedeu-se a instalação de um sistema de remediação na área do posto baseado na tecnologia MPE, com aplicação

do arranjo *bioslurping*. A seguir, são sucintamente descritas, as etapas envolvidas no planejamento, instalação, partida e operação, do sistema de remediação implantado.

4.4 Teste de Bombeamento

Com o objetivo de otimizar a recuperação do produto sobrenadante ao lençol freático, foi realizado um ensaio de bombeamento prolongado, delimitando o raio de influência efetivo gerado pelo bombeamento de um poço para que o dimensionamento do sistema de remoção de fase livre fosse o mais eficiente possível

Para este ensaio foram instalados, um poço de bombeamento e dois poços de observação alinhados a uma pequena distância do poço a ser bombeado.

Previamente ao início do ensaio, se realizou a medição do nível d'água de todos os poços existentes em um raio de até 30 m do poço de bombeamento.

O ensaio foi realizado a partir do bombeamento do PB-01, mantendo-se um rebaixamento constante no poço bombeado por um período de tempo suficientemente longo, aproximadamente 48 horas, simulando-se uma situação de bombeamento em condições de equilíbrio (*steady state*), nas quais ocorre a estabilização, no tempo e no espaço, do cone de rebaixamento (FEITOSA, 1997).

O gráfico da Figura 19 apresenta o resultado obtido para este ensaio.

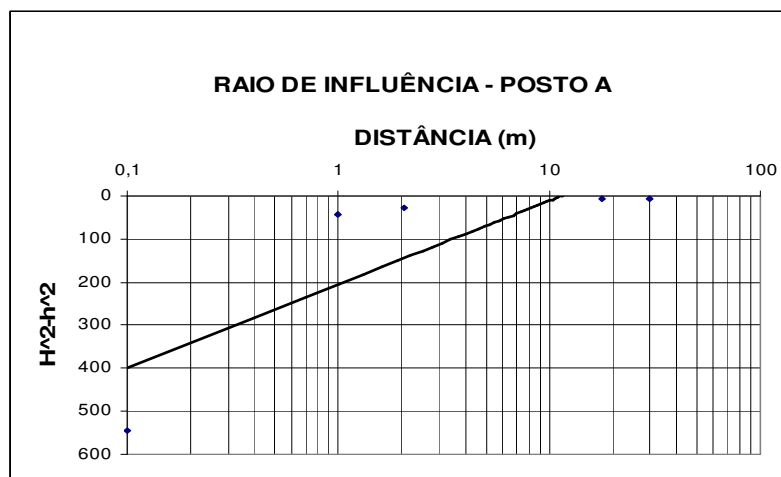


Figura 19 - Gráfico de rebaixamento por distância
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2000)

O raio de influência é determinado pela interseção da reta ajustada para distribuição de dados obtidos, com a linha do eixo das abscissas, na qual o rebaixamento é nulo ($H^2 - h^2$

= 0). No caso em questão, a reta foi obtida com um ajuste de tendência logarítmico, com adequação aproximada de 70%. Uma linha de tendência logarítmica é a curva de melhor ajuste para situações nas quais a taxa de alteração nos dados, aumenta ou diminui rapidamente, e depois se nivela. Deste modo, foi determinado o valor aproximado de 12 m para o raio de influência.

Estes dados permitiram ainda, calcular a condutividade hidráulica da área de influência do ensaio, sendo o cálculo feito a partir da seguinte relação:

$$K = \frac{0.733 \cdot Q}{\Delta(H^2 - h^2)} \quad (8)$$

Onde: $\Delta(H^2 - h^2)$ é obtido no gráfico da Figura 19.

O valor de condutividade hidráulica obtido foi $5,4 \times 10^{-5}$ cm/s.

4.5 Projeto Conceitual de Remediação Ambiental

De acordo com as etapas de avaliação ambiental e também com o teste de bombeamento realizado, foram levantadas, para a área do posto, as características hidrogeológicas resumidas na

Tabela 9.

Tabela 9 - Características hidrogeológicas da área

CARACTERÍSTICAS		SIGNIFICADO
TIPO DE SOLO PREDOMINANTE	ARGILO-SILTOSO COM NÍVEIS MAIS ARENOSOS INTERCALADOS.	PERMEABILIDADE MÉDIA A BAIXA ELEVADA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DE HIDROCARBONETOS
PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA	1,5 A 2,5 m	RELATIVAMENTE RASO
GRADIENTE HIDRÁULICO	2,4%	MODERADO
VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	$1,5 \times 10^{-4}$ A $6,7 \times 10^{-6}$ cm/s	GRANDE VARIAÇÃO – MEIO HETEROGÊNEO
VELOCIDADE DE FLUXO	VARIA DE 1,1 A 23,3 m/ano	MÉDIA A MUITO BAIXA
VAZÃO DE EXPLOTAÇÃO	0,11 m ³ /h	MODERADA, PORÉM REPRESENTA A VAZÃO DE UM ÚNICO POÇO. AS PONTEIRAS TÊM VAZÃO MÉDIA DA ORDEM DE 0,45 m ³ /h P/ TODO O CONJUNTO.
RAIO DE INFLUÊNCIA DO BOMBEAMENTO	12 m C/ LIMITE DE INVERSÃO E FLUXO A 3,7 m	BOA ABRANGÊNCIA EFETIVA
SENTIDO DE FLUXO	N-NE EM DIREÇÃO AO CÓRREGO VARGEM GRANDE	CÓRREGO É O CORPO RECEPTOR SENDO O MEIO MAIS IMPACTADO.
ESPESSURA MÉDIA DA ZONA-NÃO-SATURADA	2,0 m – PREDOMINA ATERRO ARGILO-ARENOSO	PEQUENA ESPESSURA.

(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2000)

Com base neste cenário hidrogeológico o sistema de remediação do tipo MPE, com arranjo *bioslurping* foi escolhido. O esquema da Figura 20 exemplifica o arranjo proposto.

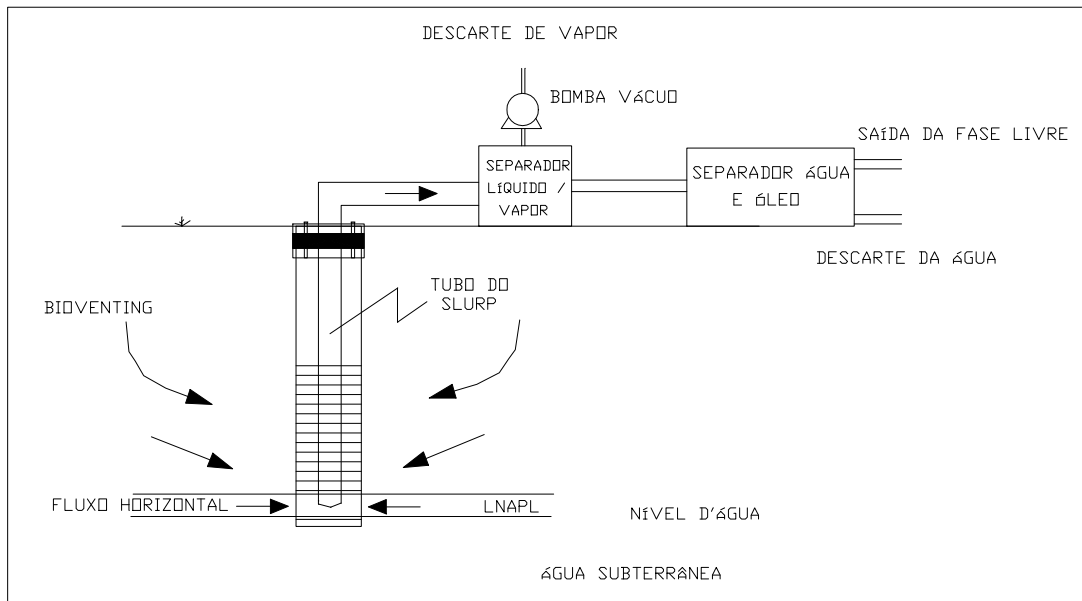


Figura 20 - Esquema do arranjo proposto
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2000)

A Figura 21 apresenta o *layout* conceitual do sistema implementado.

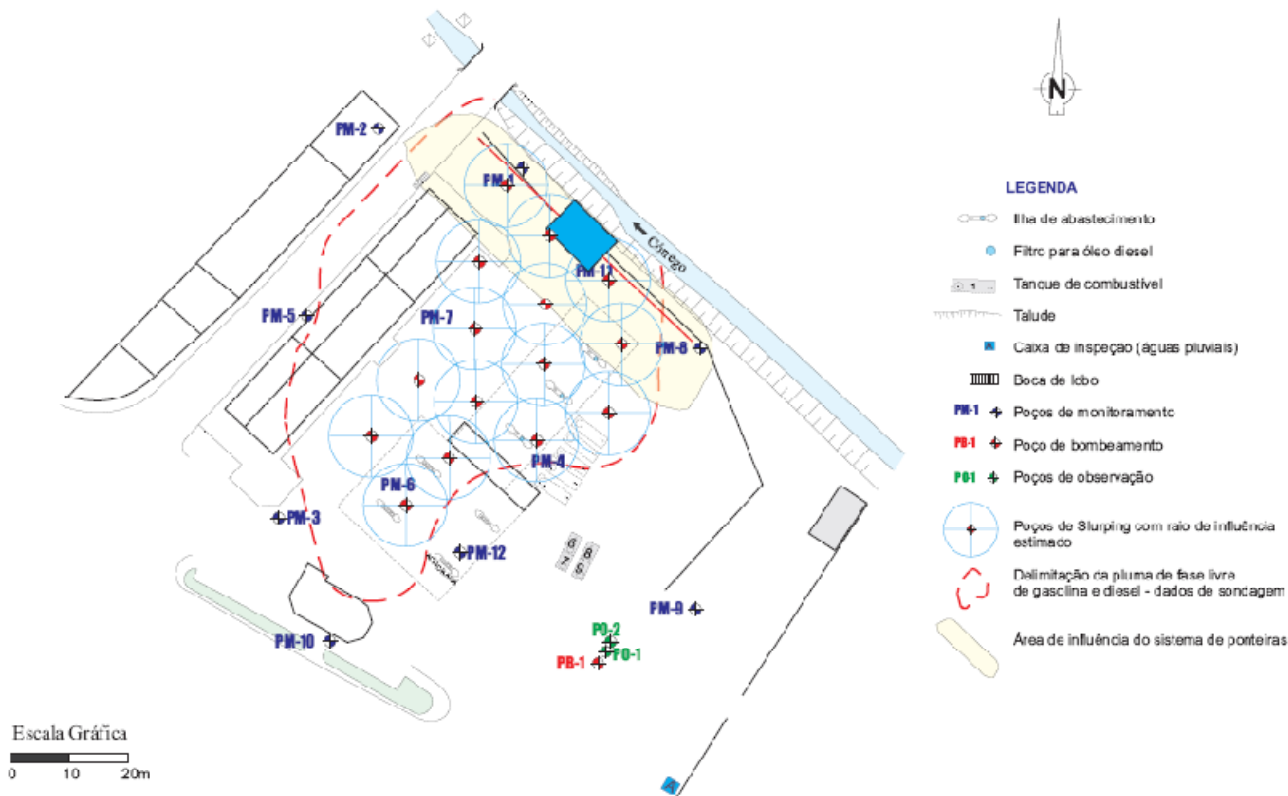


Figura 21 - Layout conceitual do sistema de remediação
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

Para o acompanhamento da redução das massas de contaminantes presentes no meio, foram realizadas amostragens, tanto de solo como de águas subterrâneas, para análises de compostos BTEX e TPH.

O cronograma estabelecido na etapa do projeto conceitual previa que as metas estabelecidas seriam atingidas em 15 meses de operação, considerando-se que não haveria reincidência de vazamentos na área.

4.6 Teste Piloto

Em setembro de 2000, com o objetivo de refinar o projeto conceitual para a definição do *layout* final do sistema a ser implantado, foi realizado um ensaio piloto com duração de 4 dias. Tendo em vista que o sistema de MPE originalmente proposto foi concebido de forma a atuar distintamente nas diferentes porções da área contaminada, foram realizados três ensaios distintos para obtenção dos dados necessários ao sistema integrado de remediação, sendo

estes: ensaio de Extração de Vapores do Solo – SVE, Teste de Respirometria para determinação das taxas de degradação e Teste de *Bioslurping* para determinação do rebaixamento e recuperação das fases líquidas.

A Figura 22 apresenta o gráfico da massa de contaminantes que foi removida durante a realização do ensaio de Extração de Vapores. As massas foram calculadas com base na vazão do sistema de extração e na concentração de Compostos Orgânicos Voláteis medida no ponto de descarte de vapores. O gráfico mostra uma curva de predição de remoção de massa em kg/dia, apresentando uma elevada remoção inicial, com rápido decréscimo e tendência de estabilização. O aumento da concentração na porção final desta curva se deveu ao aumento do fluxo de ar.

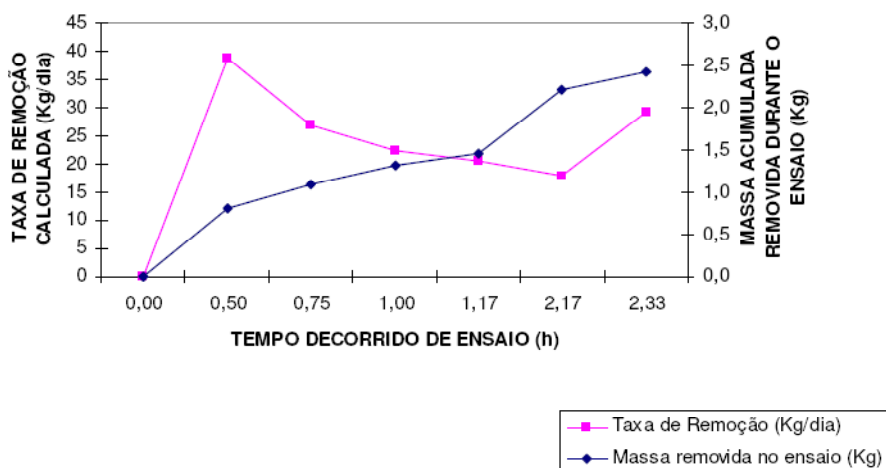


Figura 22 - Taxas de remoção de hidrocarbonetos
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

Após o ensaio de extração de vapores, foi realizado o ensaio de MPE, que procurou definir o raio de influência do sistema de extração, determinando a extensão do cone de rebaixamento e do cone de vácuo sob condições de fluxo multifásico. Outro ponto importante foi a definição das vazões e pressões que deveriam ser utilizadas durante a operação do sistema. O ensaio foi conduzido por cerca de 26 h, de modo contínuo. Durante este período, os parâmetros vácuo da bomba e profundidade do tubo extrator (mergulhado) foram alterados, para possibilitar a determinação do comportamento da distribuição das pressões e da variação do nível d'água, em função das mudanças realizadas.

Foram feitas medidas das condições estáticas dos poços de observação, sendo avaliados nível d'água, espessura de fase imiscível e VOC. No decorrer do ensaio, além

destes parâmetros, foi monitorada a pressão nos poços de observação rasos e no poço de extração.

O ensaio de respirometria, buscou avaliar o incremento das concentrações de oxigênio no solo após sua aeração. Entende-se que o consumo do O_2 associado a um aumento das concentrações de CO_2 no ar do solo, indique atividade de biodegradação dos contaminantes orgânicos, isso porque o O_2 seria utilizado pelas bactérias, como receptor de elétrons no processo de consumo de carbonos e o CO_2 seria, portanto, o material excretado por estes microorganismos. Deste modo, é possível estimar a massa de contaminantes que pode ser degradada em um determinado período de tempo, calculando-se as taxas de consumo de O_2 .

O procedimento do ensaio é bastante simples, promove-se uma aeração do solo (injeção de ar) por pelo menos 24 horas, atingindo-se a saturação de O_2 no ar do solo (20,9% O_2). Após este período, interrompe-se a injeção e inicia-se medição dos parâmetros O_2 , CO_2 e, se for possível, CH_4 . As medições são realizadas até que as concentrações de O_2 atinjam valores da ordem de 5%, ou até que a velocidade de consumo esteja muito mais lenta do que a que fora observada no decorrer do ensaio

Deste modo foi estimada a taxa de redução de massa diária de hidrocarbonetos por bio-respiração, chegando-se ao valor de 28,5 mg/ kg-solo/dia.

Assim, conforme a Figura 23, estimou-se um tempo de remediação de 15 meses para o solo da área em relação a compostos TPH adsorvidos.

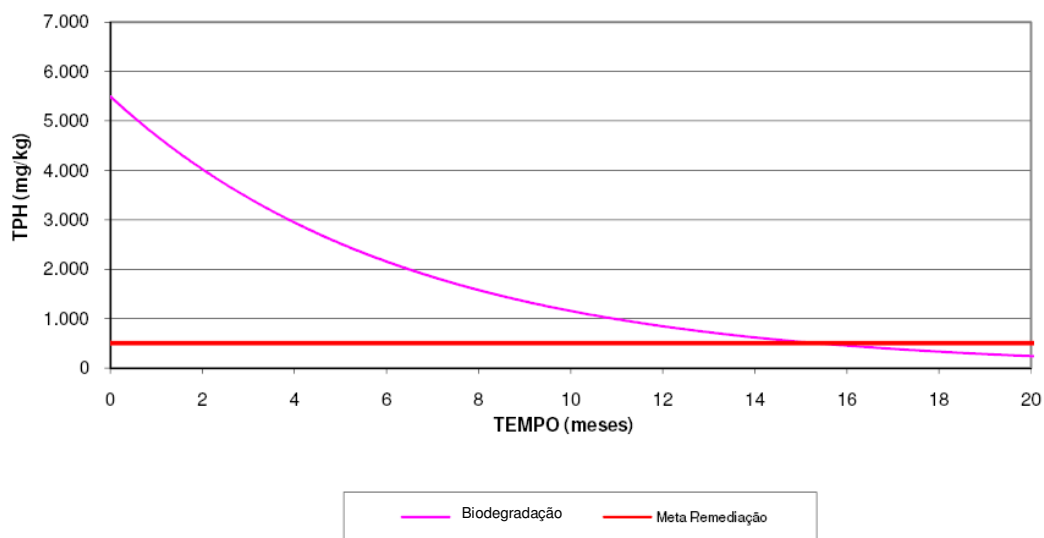


Figura 23 - Estimativa do tempo de remediação do solo - fase adsorvida
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

4.7 Implantação e Partida do Sistema

Nesta etapa, foram definidos, em relatório o dimensionamento e as premissas de operação do sistema, os limites e áreas alvo de remediação e as recomendações necessárias para o monitoramento das condições ambientais no local, ao longo do tempo de funcionamento do arranjo proposto.

Com base nos dados obtidos por meio da execução do ensaio piloto, determinou-se as características operacionais do sistema, que foi dimensionado com a seguinte configuração:

- 15 poços de extração multifásica;
- Vazão máxima de bombeamento de líquido por poço de 2,1 m³/h;
- Vazão de extração de ar de 60 m³/h;
- Vácuo operacional nos poços de 0,02 m de coluna d'água;
- Vácuo operacional do sistema de 2 m de coluna d'água;
- Raio de influência de 7 m.

As metas de contaminação, utilizadas para este dimensionamento, são as que foram obtidas pela análise de risco anteriormente citada, não tendo sido realizadas determinações mais recentes devido ao grande volume de produto que ainda estava presente na área alvo.

Também por conta desta grande ocorrência de fase livre, à época da avaliação ambiental, as amostras foram coletadas nos limites da pluma de contaminação, considerando-se, assim, para efeito de estimativa de tempo de remediação, que as concentrações de benzeno no solo e no aquífero, na região da pluma de fase livre, seriam as maiores possíveis, com base em cálculos teóricos de partição química.

Os resultados analíticos obtidos nas amostragens realizadas na ocasião dos estudos de análise de risco indicaram que a pluma de contaminação por fase dissolvida se encontrava, até então, restrita aos limites do posto e portanto a área alvo considerada para implantação do sistema de remediação correspondeu à extensão da ocorrência da fase livre de combustível. A Figura 24 ilustra a região alvo do processo.

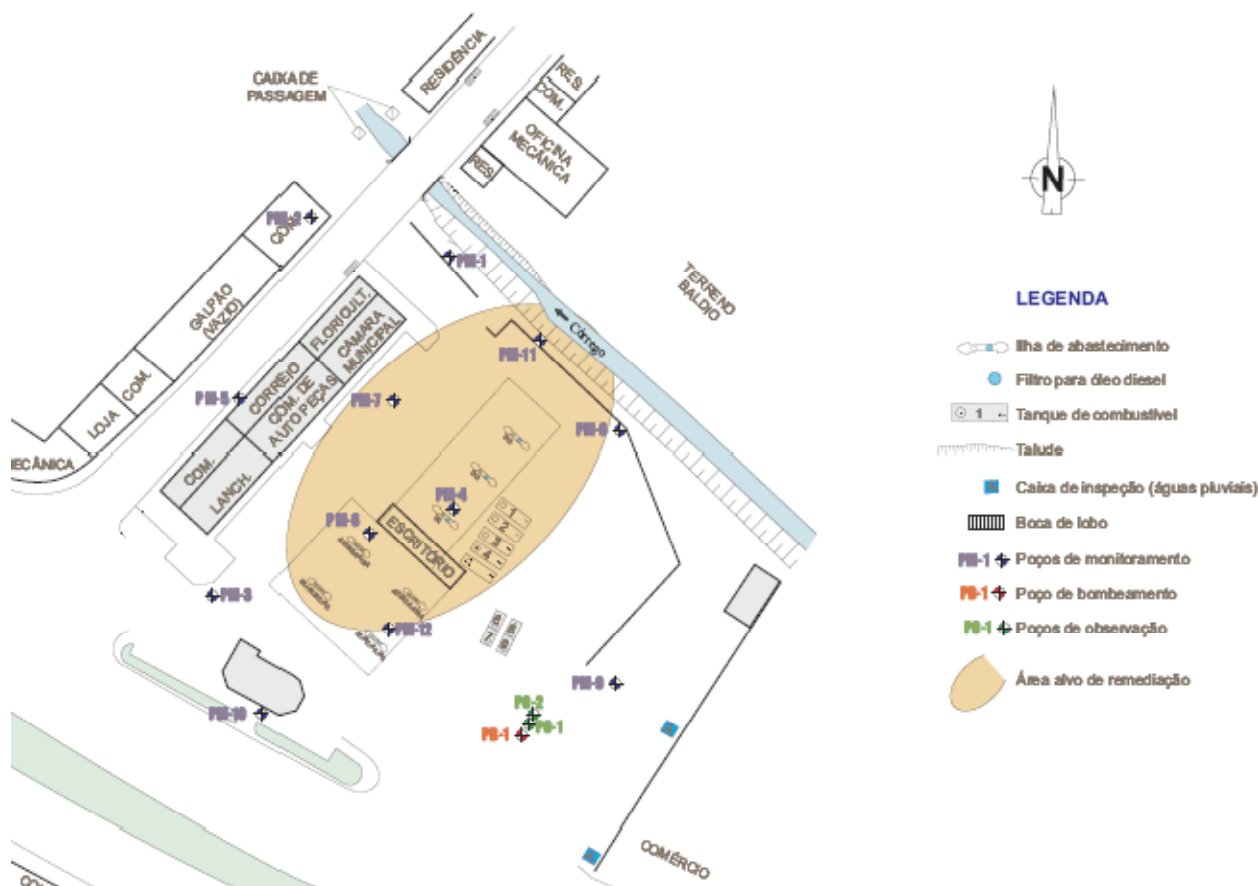


Figura 24 - Localização da área alvo de remediação
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

O sistema de MPE implantado estava composto por: uma bomba de vácuo, um tanque de vácuo de fibra de vidro (volume útil de 250 l), uma bomba de transferência, uma caixa separadora de água/óleo e por uma torre de resfriamento/*stripping*.

A bomba produz vácuo no tanque e este se distribui pela tubulação atingindo os poços de extração, promovendo, desta forma, a extração simultânea de líquido e vapor.

Os líquidos extraídos se acumulam no tanque, enquanto o vapor é encaminhado para uma chaminé para posterior descarte na atmosfera. As duas fases armazenadas no tanque de vácuo são bombeadas para uma caixa separadora capaz de operar com uma vazão máxima de 1 m³/h. O óleo separado é coletado em tambores e a água transferida para uma torre de resfriamento/*stripping*.

Uma bomba faz com que a água circule na torre de *stripping* a uma vazão de 2 m³/h. Após este tratamento, a água é descartada na caixa separadora do posto com pH 7.

As Figura 25 e Figura 26 demonstram o tempo que era esperado para a diminuição das concentrações de benzeno no solo e o período estipulado para a remoção da fase imiscível de combustível, sendo ambos em torno de 8 meses.

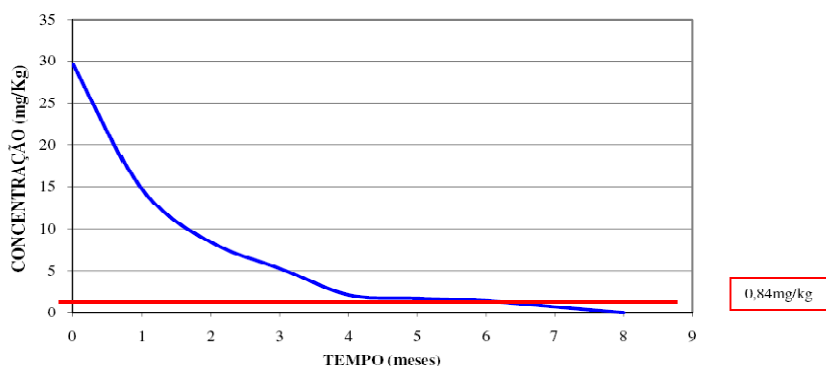


Figura 25 – Estimativo do decaimento do benzeno no solo
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

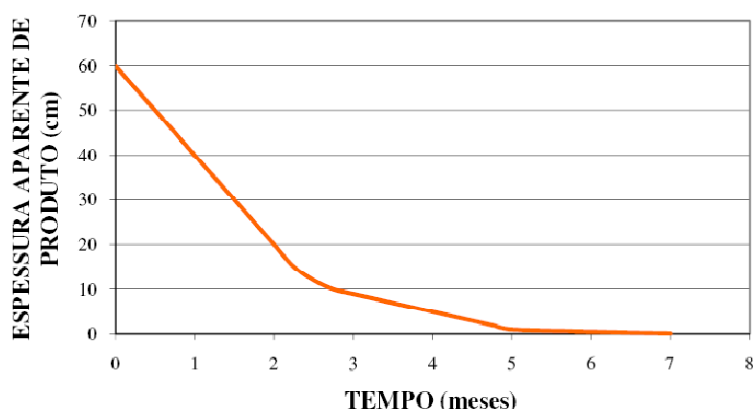


Figura 26 - Estimativa do tempo de remoção da fase livre
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

4.8 Operação do Sistema

Para acompanhamento da evolução do processo de remediação, os dados operacionais e ambientais foram monitorados periodicamente.

No dia 23/05/01 foi realizada uma amostragem de água na entrada e na saída do *stripping*, com o intuito de avaliar seu rendimento na redução da concentração dos compostos orgânicos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10.

Observou-se um rendimento de 60% do *stripping*, na redução da concentração do benzeno em água subterrânea, para os demais compostos a redução se apresentou ainda mais acentuada, mostrando a eficácia do sistema implementado.

Tabela 10 - Resultados analíticos dos compostos na entrada e saída do *stripping*

	ENTRADA DO <i>STRIPPING</i>	SAÍDA DO <i>STRIPPING</i>	RENDIMENTO %
BENZENO (mG/L)	87,8	35,6	59,5
TOLUENO (mG/L)	163	55,4	66,0
ETILBENZENO (mG/L)	153,3	44,1	71,2
M-XILENO + P-XILENO (mG/L)	691,6	215,5	68,8
O-XILENO (mG/L)	285,3	83,8	70,6
TPH GRO (MG/L)	22,7	4,3	81,1

(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

O controle dos poços de monitoramento e de extração consiste em medições periódicas do nível d'água e da eventual espessura aparente de fase livre. A partir dos

resultados obtidos, são feitos os ajustes necessários na posição do tubo mergulhado, visando otimizar a relação entre água – produto – vapor.

A

mostra o gráfico da variação do nível d'água no poço de bombeamento e nos poços de monitoramento existentes na área do posto de combustível e a **Figura 28** mostra esta mesma variação para os poços de extração, desde a partida do sistema instalado.

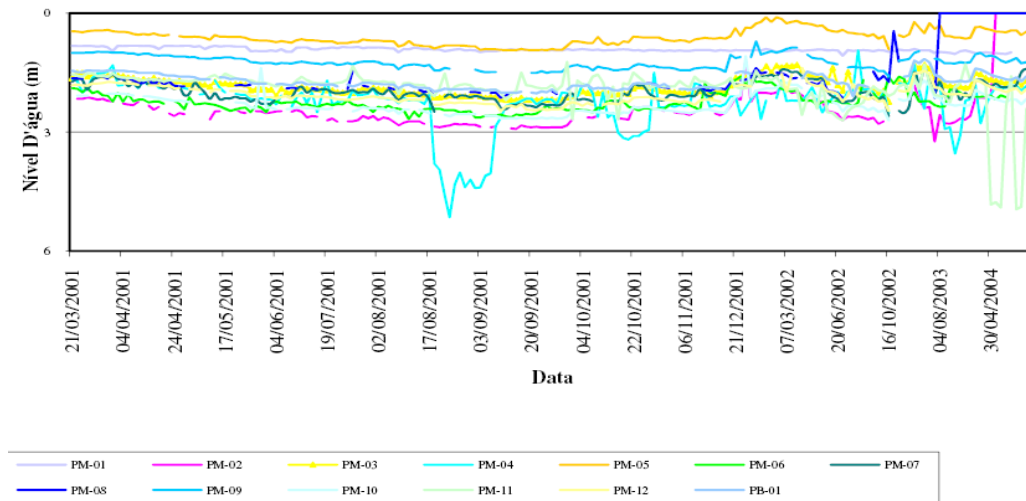


Figura 27 - Nível D'Água (PM e PB)

(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

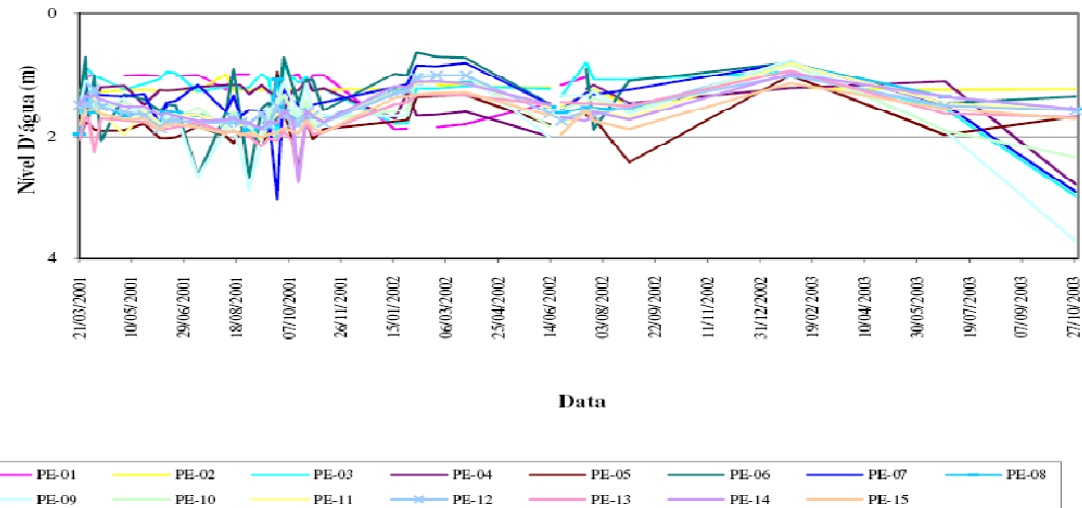


Figura 28 - Nível D'Água (PE)

(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

Com exceção de algumas ocorrências pontuais, a observação dos 2 gráficos demonstra a baixa variação nos níveis d'água medidos ao longo da operação, o que é característico de um sistema MPE, conforme discutido no capítulo anterior.

A Figura 29 apresenta o gráfico que reflete a variação da espessura aparente de fase livre medida nos poços de monitoramento, desde o início dos serviços emergenciais.

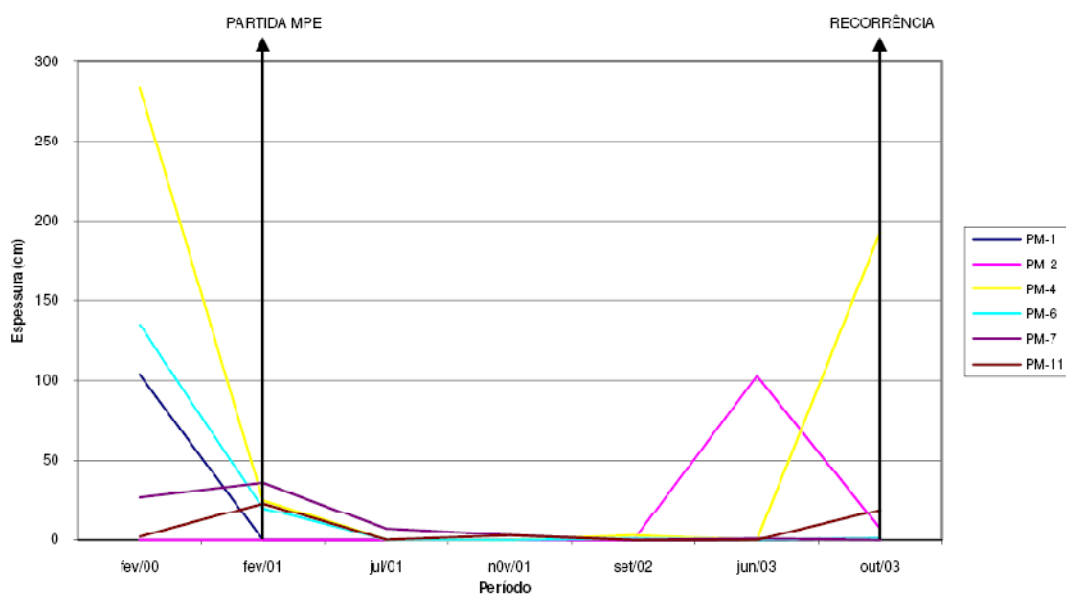


Figura 29 - Espessura aparente da fase livre X tempo - poços de monitoramento (Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2004)

Observa-se, que no período entre fevereiro de 2000 e fevereiro de 2001, quando operou o sistema de ponteiros, as curvas de espessura por tempo apresentaram um comportamento semelhante para todos os poços, evidenciando uma tendência de diminuição nas medidas obtidas.

Com a partida do sistema MPE e a desativação do sistema de remoção anterior, as espessuras aparentes de fase livre seguiram diminuindo, chegando a valores próximos de 0 em quase todos os casos, embora houvesse momentos de pequenas recorrências associadas a remobilização de fase residual. Contudo, com medidas feitas em outubro de 2003, as curvas relativas aos poços PM-4 e 11 apresentaram comportamento anômalo, demonstrando, principalmente no caso do PM-4, um rápido aumento na espessura aparente de fase livre. Como o PM-4 fica nas proximidades das ilhas de abastecimento e o PM-11 encontra-se a jusante deste, pôde-se deduzir que o aumento verificado, possivelmente teria sido causado por um novo vazamento de combustível, determinando a recorrência apontada no gráfico. O

posto foi imediatamente informado e providenciou o reparo das instalações que apresentavam problemas.

Entretanto existia, ainda, o comportamento discrepante verificado na curva do PM-2, que certamente, não poderia ser explicado da mesma maneira que o caso supracitado. Até junho de 2003, não se havia determinado uma espessura aparente de fase livre neste poço, contudo, neste mês, foi determinada a ocorrência de aproximadamente 1 m de produto. Soma-se a isto, o fato de que o PM-2 situa-se em área externa e a jusante do posto, ou seja, não parecia lógico um aumento da espessura aparente de fase livre neste poço, não precedido por um aumento das espessuras medidas a montante, nos poços instalados próximos às ilhas de abastecimento. Deste modo, interpretou-se que a fase livre detectada no PM-02 parecia não ter relação com as atividades do posto, não sendo possível definir sua origem.

A Figura 30 apresenta o gráfico que mostra a variação da espessura aparente de fase livre medida nos poços de extração, desde o início da operação do sistema MPE.

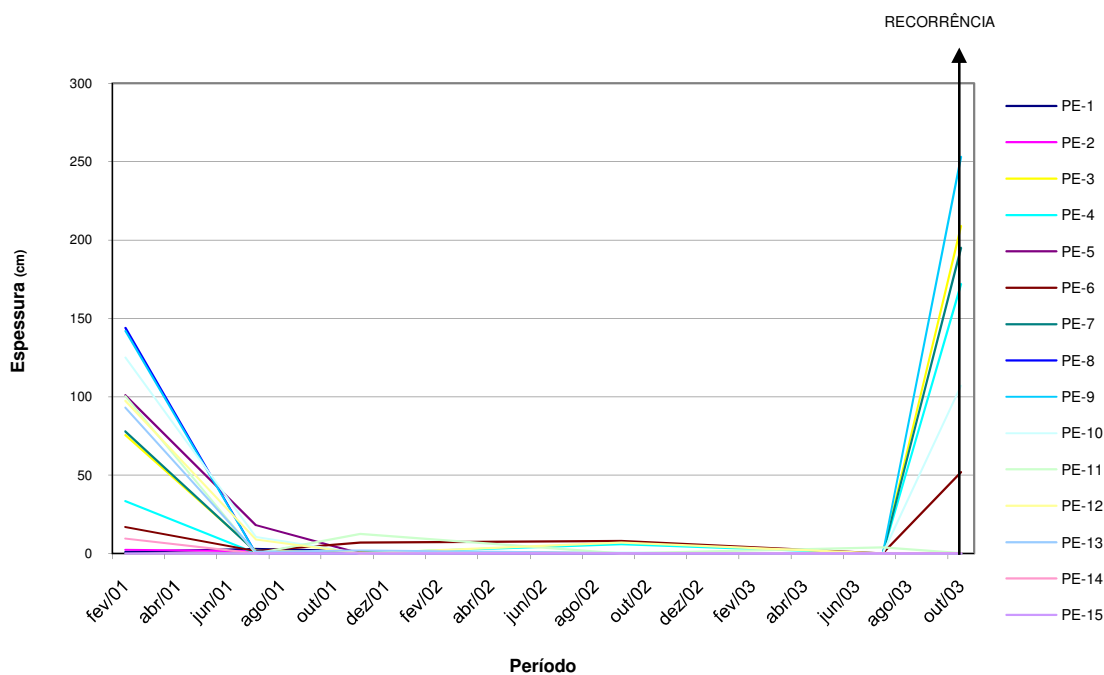


Figura 30 - Espessura aparente da fase livre X tempo – poços de extração (Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

O comportamento das curvas é análogo àquele observado no caso dos poços de monitoramento (Figura 29), ou seja, a recorrência de fase livre observada em outubro de 2003, foi, obviamente, interpretada da mesma maneira.

As Figura 31 e Figura 32 apresentam plumas de isoespessura aparente de fase livre que representam, em planta, o comportamento verificado nos gráficos citados.

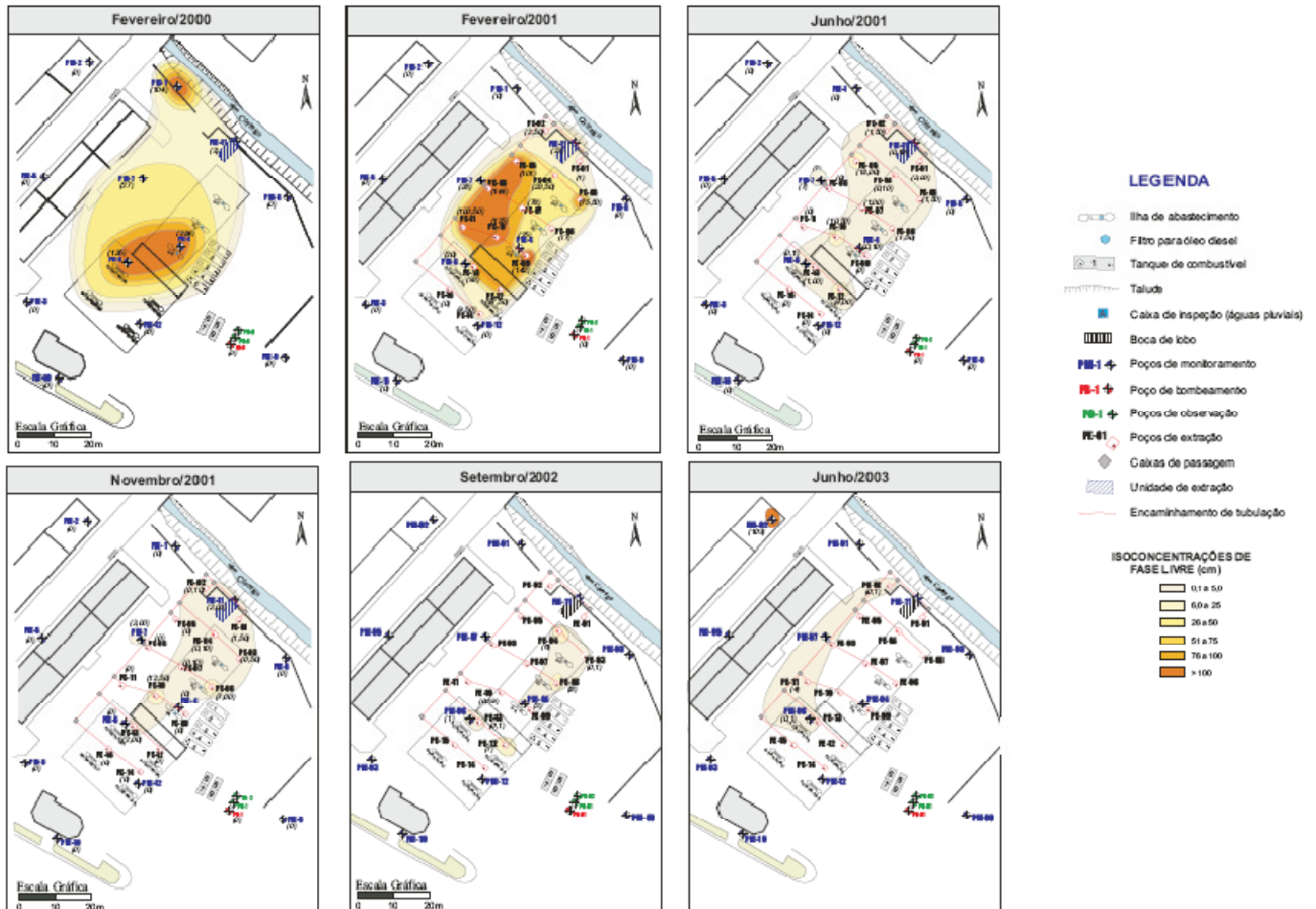


Figura 31 - Plumais de Isoespessura de fase livre (Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2004)

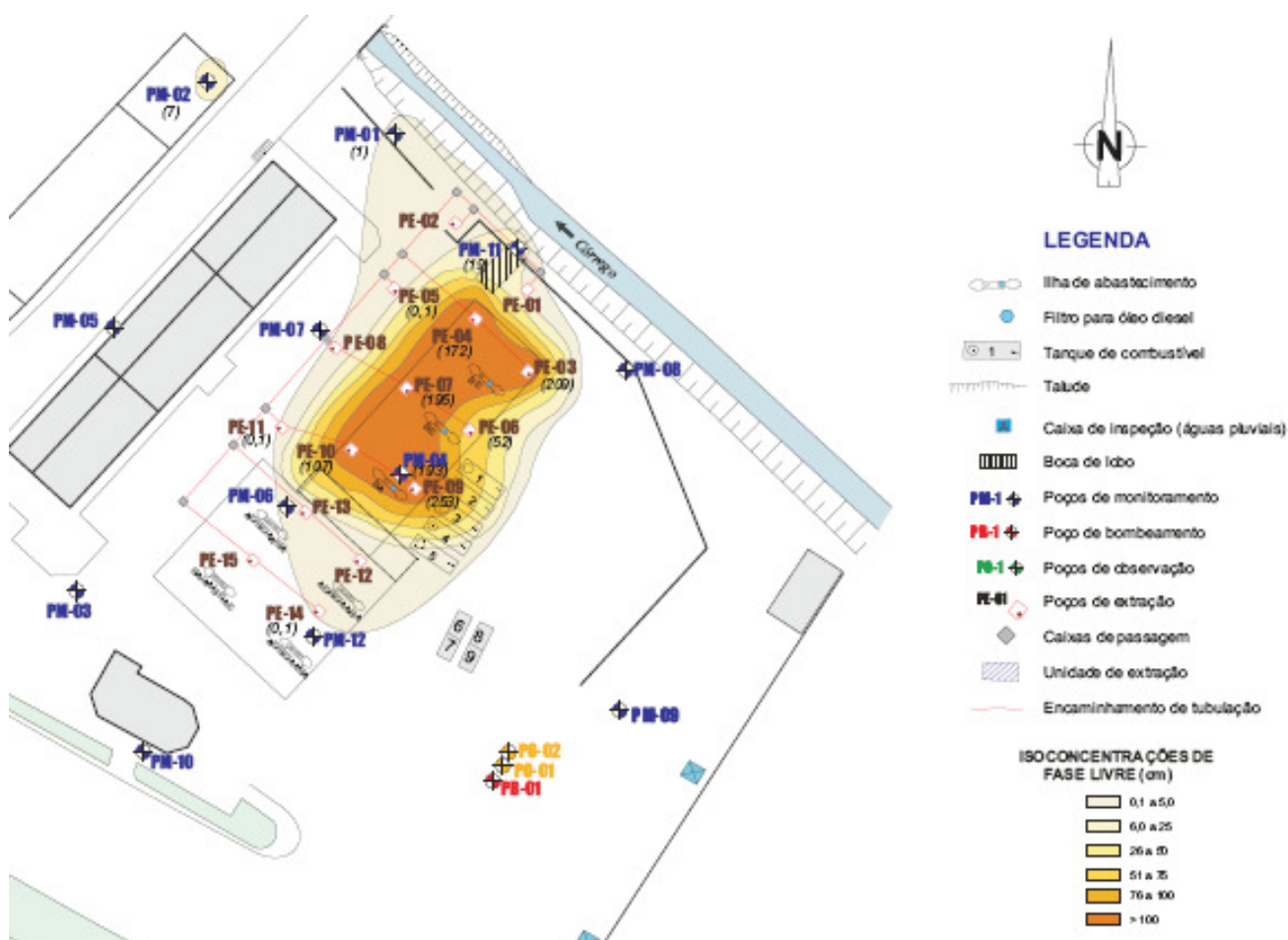


Figura 32 - Plumais de Isoespesura de fase livre out / 2003
(Fonte: Adaptado de GEOKLOCK, 2004)

A Figura 33 apresenta o gráfico de recuperação de produto desde o início do caso. Mostra que um grande volume de combustível foi retirado ainda na fase emergencial da remediação pelo sistema de ponteiros (*pump and treat*), e que após o início de operação do sistema de extração multifásica a recuperação continuou bastante alta, ainda que decrescente. Durante o período de setembro/02 a agosto/03, nota-se que não foi recuperado produto em fase imiscível, mas após a reincidência detectada em agosto de 2003, foram recuperados 2.253 l de produto, totalizando 47.388 l recuperados. Separando os resultados das etapas emergencial e de remediação, verifica-se que foram recuperados 33.899 l (71,5%) durante a primeira fase e 13.489 l (28,5%) durante a segunda, até outubro de 2003.

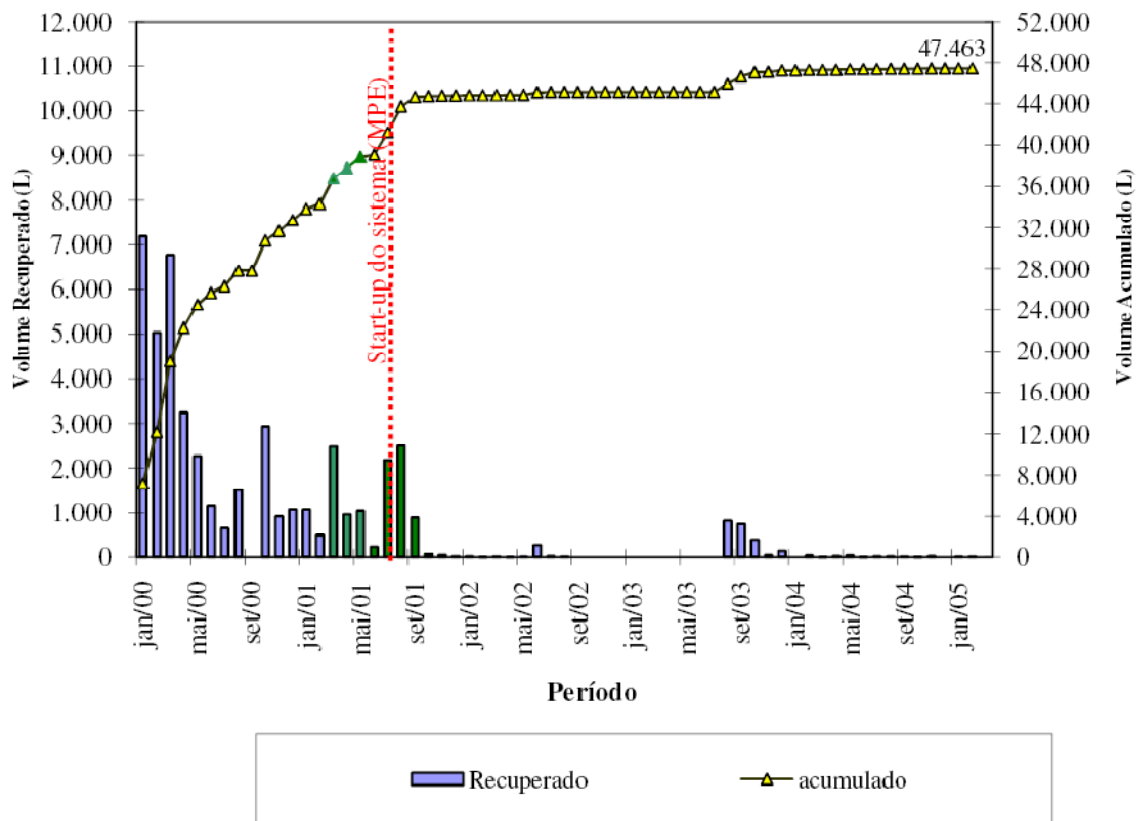


Figura 33 - Histórico da recuperação de produto no Posto de Combustível (Adaptado de GEOKLOCK, 2005)

A quantificação da fase vapor removida, compreendendo os compostos orgânicos voláteis (VOC) presentes na composição do combustível, foi realizada através de medições periódicas na saída da bomba de vácuo. Estas medições foram realizadas com o auxílio de um medidor de gás portátil. As medições periódicas de concentração de VOC – em ppm-v – juntamente com as medições das vazões, permitiram calcular a massa de compostos orgânicos em fase vapor, removida da área através dos poços de extração.

As concentrações de descarte variaram de 10 a 11000 ppm-v durante o período monitorado. A vazão média de descarte de vapores foi de 75m³/h e a massa de VOC removida desde o início da operação, até outubro de 2003, foi de aproximadamente 68500 kg.

Analisando estes dados obtidos na área do posto de combustível, verificou-se que:

- A previsão, de março de 2001, quando o sistema foi implantado de que as espessuras aparentes de fase livre, medidas nos poços de extração e monitoramento, seriam praticamente nulas com cerca de 5 meses de operação. De fato, conforme pôde ser observado nos gráficos apresentados para a etapa de acompanhamento do sistema (**Figuras 29 e 30**), em agosto de 2001, as espessuras aparentes se aproximaram de 0. Contudo, a remobilização de produto anteriormente retido e a ocorrência de novos vazamentos, prolongaram a existência de fase livre. O processo de *stripping* apresentou eficiência acima de 60% na remoção, por volatilização, de compostos orgânicos e a extração de vapores, até outubro de 2003, havia removido cerca de 68,5 ton. de VOC. Os gráficos de variação de nível d'água durante o funcionamento do sistema (**Figuras 27 e 28.**), evidenciaram pouca diferença entre os dados medidos em diferentes momentos, o que demonstra a eficiência do arranjo instalado, para evitar oscilações que poderiam causar o aprisionamento e espalhamento do produto em fase livre, ao longo da curva da superfície de nível d'água. Até outubro de 2003, a extração de líquidos já havia removido cerca de 13.489 l de fase livre.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar as tecnologias de remediação para hidrocarbonetos de petróleo e avaliar a aplicabilidade do sistema de extração multifásica num caso real.

Foi realizada a descrição das quatro principais tecnologias de remediação que vem sendo aplicadas nacionalmente. Destacando-se que por existirem diversas tecnologias disponíveis a escolha de um determinado sistema dependerá sempre das características do aquífero, assim como dos contaminantes.

A eficiência do sistema de extração múltifásica destaca-se ao promover a remoção da fase livre por meio de um sistema de vácuo, com um rebaixamento mínimo do nível da água, capaz de remover os vapores do solo, além de remobilizar a fase residual de combustível aprisionada na zona não saturada, aumentando a aeração do solo (*bioventing*) e das porções superiores da água subterrânea. Esta aeração promove um bioaumento da fauna microbiana, que pode catalisar os processos de biodegradação aeróbios, fomentando assim, a remediação do local. Além disso, a importância das etapas de planejamento para implantação dos sistemas MPE como o teste de bombeamento, o teste piloto e o teste de respirometria, são essenciais para elaboração dos projetos de engenharia onde devem ser levadas em consideração as especificidades de cada área.

A tecnologia MPE por ser um sistema que combina diferentes tecnologias tende a levar a diminuição do tempo de remediação, atingindo mais rapidamente a etapa de polimento da curva do ciclo de vida, conseguindo uma remoção da contaminação superior a outras tecnologias convencionais, e com isso chegar-se a um custo final de remediação inferior a métodos mais simples, no entanto é sabido que o seu custo inicial é superior em relação a estes outros sistemas, como o bombeamento e tratamento, o *air sparging* e a biorremediação, e que a MPE também requer períodos de partida e ajustes mais longos do que os verificados em bombeamentos convencionais.

No estudo de caso, o Posto de combustível apresentou características hidrogeológicas compatíveis com o recomendado para o sistema MPE, o solo constituído basicamente por aterros variando de argiloso a arenoso, o nível d'água consideravelmente baixo entre 1 e 2 metros, e o baixo gradiente hidráulico favoreceram a aplicação desta técnica.

Foi constatado que a área do posto estava contaminada com compostos dos grupos BTXE (benzeno, etilbenzeno, tolueno e xilenos) e PAH (acenafteno, criseno, naftaleno, fluoreno, pireno, fenantreno) em fase dissolvida, presente na amostras de água subterrânea, em fase adsorvida presente nas amostras de solo, e também na pluma de fase livre, fonte secundária de contaminação. O sistema MPE pelos resultados obtidos no monitoramento periódico que estava sendo efetivo uma vez que a espessura aparente da pluma de fase livre se mostrou decrescente em todos os poços da área, atingindo valores muito próximos a zero durante 2002 até junho de 2003, assim como a água subterrânea na saída da torre de *Stripping* que estava em maio de 2001 apresentando um rendimento na remoção de contaminantes BTXE superior a 60%.

No entanto ocorreu a recorrência de vazamentos na área, detectado a partir de junho de 2003, fazendo com que a contaminação retornasse à área, impossibilitando o atingimento das metas de remediação no prazo inicialmente previsto.

Contudo, apesar das metas de remediação não terem sido atingidas, a remoção foi bastante eficaz tendo recuperado no total 47.388 l de combustível, sendo que desse total o sistema MPE foi responsável por 13.489 l (28,5%) . Com isso conclui-se que a aplicação da tecnologia MPE, é uma opção eficiente e aplicável apresentando resultados satisfatórios, principalmente em se tratando de áreas com contaminação de hidrocarbonetos de petróleo.

6 RECOMENDAÇÕES

- Antes de começar a remediação da área deveria ser realizado uma rigorosa avaliação dos equipamentos do posto de combustível evitando-se recorrência de vazamentos.
- Os órgãos ambientais deveriam aumentar o controle sobre os aquíferos visando à preservação dos recursos hídricos, pois a água é um bem de domínio público, e essencial á vida.
- A grande finalidade dos sistemas de remediação dos aquíferos, solo e água subterrânea, é a descontaminação ambiental para a manutenção de ambientes saudáveis que possam proporcionar a vida em sua plenitude, livre de riscos para os homens e para outros seres vivos. E pela remediação de uma área ser muito cara deve- se investir mais na prevenção que é mais barata e eficiente.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 13786/97 - **Seleção de Equipamentos e Sistemas para Instalações Subterrâneas de Combustíveis em Postos de Serviço**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR 13895/97 - **Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem**. Rio de Janeiro, 1997.

BAUGARTNER, A. & LIEBSCHER, H. J. Allgemeine **Hydrologie-Quantitative Hydrologie**; In **Lehrbuch der Hydrlogie**, bd. 1, Berlin-Stuttgart, 1996.

BEDIENT, P.B.; RIFAI, H.S.; NEWELL, C.J. **Ground water contamination: transport and remediation**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994.

BITAR, O. Y. & ORTEGA, R. E. **Gestão Ambiental**; In OLIVEIRA, A. M. S. (ed.) & BRITO, S. N. A. (ed.) - **Geologia de Engenharia**, ABGE, São Paulo 1998.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAUDE. **Áreas contaminadas expõem população à riscos**, Disponível em <http://www.saude.gov.br/>, acessado em 12/10/2008.

_____. **Lei Federal n. 6938, de 31 de agosto de 1981**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=313>> Acessado em 18.01.2009.

_____. **Lei Federal n. 9605, de 12 de fevereiro de 1998**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=320>> Acessado 18/01/2009.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 2ed. São Paulo: CETESB, 2001.

_____. Dados sobre áreas contaminadas e processos de remediação no estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>> , acessado em 11/10/2008.

_____. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. **DECISÃO DE DIRETORIA Nº 195-2005- E**, de 23 de novembro de 2005, CETESB, 2005. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>> , acessado em 09/03/2009.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, CONAMA. **Resolução n. 273 de 29 novembro de 2000**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=271>> Acessado em 20/11/2009.

_____. **Resolução n. 293 de 12 dezembro de 2001**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=290>> Acessado em 20/11/2009.

_____. **Resolução n. 357 de 12 dezembro de 2001.** Disponível em:
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>> Acessado em 22/11/2009.

DREW, D.– **Man-Environment Processes**, George Allen & Unwin, Londres,1983.

FEITOSA, F. A. C.– **Hidráulica de Poços**; in FEITOSA, F A.C. (coord.) & MANOEL, J.F. (coord.) – **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**; CPRM; Fortaleza, 1997.

FERNANDES, M. - **Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos monoaromáticos em aquíferos contaminados com gasolina.** (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC. Florianópolis, 1997.

FETTER, C.W. **Contaminant Hydrogeology**; Prentice – Hall; Nova Jersey, 1992.

_____. **Applied Hydrogeology** 4th ed.; Prentice – Hall; Nova Jersey, 2001.

FITTS C. R. **Groundwater science**. London: Academic Press, 2002.

FREEZE, R. A. & CHERRY. **Groundwater**; Prentice Hall, Nova Jersey, 1979.

GEOKLOCK CONSULTORIA E ENGENHARIA AMBIENTAL, **Relatório Preliminar**, São Paulo, 2000.

_____. Projeto Conceitual de Remediação Ambiental; São Paulo, 2000.

_____. Medição e Operação da Remoção de Fase Livre; São Paulo, 2000.

_____. Avaliação da Remediação Ambiental, Relatório de Andamento; São Paulo, 2000.

_____. Operação do Sistema de Remediação; São Paulo, 2001.

_____. Avaliação da Remediação Ambiental, Relatório de Andamento; São Paulo, 2001.

_____. Avaliação da Remediação Ambiental, Relatório de Andamento; São Paulo, 2002.

_____. Avaliação da Remediação Ambiental, Relatório de Andamento; São Paulo, 2005.

KITTEL, J.A., HINCHEE, R. H. & MILLER, R. **Bioslurping-Vacuum Enhanced Free Product Recovery Coupled with Bioventing**: A case study Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater, 1994 NGWA/API Conference Proceedings, Houston; In U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Multi-Phase Extraction: State-of-the-Practice; EPA 542-R-99-004, 1999.

KRESIC, N. **Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling**, LEWIS PUBLISHERS, Boca Raton, 1997.

MANOEL, J.F. **Contaminação das Águas Subterrâneas**; In FEITOSA, F A.C. (coord.) & MANOEL, J.F. (coord.) **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**; CPRM; Fortaleza, 1997.

NYER, E. K. **Groundwater and Soil Remediation: Pratical Methods and Strategies**; Ann Arbor Press; Chelsea, 1998.

NYER, E.K. *et al.* **Lifecycle Design**; in NYER, E.K. et al **In Situ Treatment Technology 2** nd ed.; LEWIS PUBLISHERS; Boca Raton, 2001.

PEARGIN, T. R. **Vacuum-Enhanced Recovery: Underground Tank technology Update**; in U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – 1999 – **Multi-Phase Extraction: State-of-the-Practice**; EPA 542-R-99-004, 1995.

SIENKO, M.; PLANE, R. **Chemistry**. Second Edition, International Student Edition. 1961.

SUTHERSAN, S. S. **Remediation engineering: Design Concepts**; CRC Press, Inc.; Boca Raton, 1994, 362p.

SUTHERSAN, S. S. & PAYNE, F. C. **In Situ Remediation Engineering**; CRC Press; Boca Raton, 2005, 511p.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Multi-Phase Extraction: State-of-the-Practice**. Washington, 1999.