

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

EQUIPAMENTO COMPACTO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS POR BTEX E TPH.

TESE DE DOUTORADO

MARCELO OLIVEIRA CAETANO

Porto Alegre  
2014

MARCELO OLIVEIRA CAETANO

**EQUIPAMENTO COMPACTO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS POR BTEX E TPH.**

**Tese de doutorado submetida ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia de  
Minas, Metalúrgica e de Materiais da  
UFRGS como requisito parcial para  
obtenção do grau de Doutor.**

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich  
Schneider.

Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana Paulo  
Gomes.

Porto Alegre

2014

Este tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada e sua forma final pelos Orientadores e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider.  
PPGEM-UFRGS

Co-Orientadora:

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana Paulo Gomes.  
PPGEC-UNISINOS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues  
PPGEM-UFRGS

Prof. Dr. Luis Alcides Schiavo Miranda  
PPGEC-UNISINOS

Prof, Dr. Fernando Fernandes  
PPG-EES-UEL

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGEM

## INSTITUIÇÕES E FONTES FINANCIADORAS



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO  
GRANDE DO SUL - UFRGS



PROJECONSULT ENGENHARIA LTDA



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS  
SINOS – UNISINOS  
LABORATÓRIO DE SANEAMENTO  
AMBIENTAL



SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E  
PEQUENAS EMPRESAS NO RIO GRANDE  
DO SUL



FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS  
– FINEP

## DEDICATÓRIA

*Ao meu filho Luigi e a minha esposa  
Luciana.*

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a todos que participaram deste momento comigo.

Minha família em especial; minhas referências, minha força e meus exemplos: Luigi, Luciana, João, Joana, Ricardo, Thais, Alan, Carla, Hiago, Helena, Sr. Elias, Dona Bea, Rodrigo, Andréia, Vitor Hugo, Claudia, Betânia, João Vitor ...

Aos amigos da Projeconsult, inventores do projeto. Em especial: Engº Júlio, César, Karina, Eduardo. Aos amigos da Unisinos: Amanda Kieling, Prof. Carlos Moraes, Jalir.

Ao Prof. Luis Miranda pela contribuição técnica e parceria.

Ao meu orientador Prof. Ivo, por ter aceitado este grande desafio, pelo apoio e pela extraordinária contribuição no desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, minha referência profissional. Pessoa de extrema capacidade técnica / acadêmica, ética, acolhedora, motivadora, amiga, colega, ... Profª Luciana Paulo Gomes, esse trabalho fecham 14 anos que tenho a honra de ser seu aluno e orientando. Muito obrigado por todo apoio e dedicação.

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A1	Aerador 1
A2	Aerador 2
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xileno
CA	Carvão Ativado
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DRO	C10 – C18 – Faixa do diesel
EPA	United States Environmental Protection Agency
FA	Filtro de Adsorção
GRO	C6 – C10 – Faixa da gasolina
MPE	Extração Multifásica (MPE)
ND	Não detectável
PVC	Policloreto de vinila
PS	Poço de Sucção
S	Sucção
SVE	Extração de vapores do solo
TPH	Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
VOC	Vapores Orgânicos Voláteis

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tecnologias de remediação de solos contaminados e água subterrânea .....	38
Tabela 2: Vantagens e desvantagens das tecnologias TPE, HVDPE, LVDPE .....	56
Tabela 3: Limites de saturação de oxigênio dissolvido em função da temperatura. ....	64
Tabela 4: Limites de saturação de oxigênio dissolvido (em mg/L) para água limpa. ....	64
Tabela 5: Valores típicos de eficiência de oxigenação.....	66
Tabela 6: Tipos de sistemas de aeração aplicáveis no tratamento de efluentes .....	67
Tabela 7: Constantes da Lei de Henry para BTEX .....	69
Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.....	76
Tabela 9: Datas de amostragens para caracterização da água subterrânea.....	95
Tabela 10: Características dos materiais adsorventes utilizados.....	96
Tabela 11: Características físico-químicas do solo sintético.....	102
Tabela 12: Características da água de chuva .....	104
Tabela 13: Quantidade de BTEX e TPH em função das contaminações por gasolina. ....	105
Tabela 14: Características dos ensaios realizados em escala piloto .....	113
Tabela 15: Características dos ensaios realizados em escala real (Posto B) .....	116
Tabela 16: Resumo das análises estatísticas realizadas.....	117
Tabela 17: Concentrações de BTEX e TPH da água subterrânea próximo a 3 postos de combustíveis no município de Porto Alegre. ....	119
Tabela 18: Características físico-químicas da água subterrânea do Posto A. ....	121
Tabela 19: Teste ANOVA para os resultados de água subterrânea contaminada (Poço de Sucção), considerando todos os ensaios.....	124
Tabela 20: Teste de Tuckey comparando os resultados de BTEX do poço de sucção com o equipamento (sucção, aeradores e filtro de adsorção).....	127
Tabela 21: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para BTEX. ....	127
Tabela 22: Teste de Tuckey comparando os resultados de TPH do poço de sucção com o equipamento (sucção, aeradores e filtro de adsorção).....	129
Tabela 23: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para TPH .....	130
Tabela 24: Teste de Tuckey comparando os resultados de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos do poço de sucção com o equipamento (sucção, aeradores e filtro de adsorção).....	131
Tabela 25: Teste ANOVA comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para cor aparente, turbidez e sólidos suspensos.....	132
Tabela 26: Decréscimo médio dos parâmetros BTEX e TPH para o sistema de remediação estudado. ....	133
Tabela 27: Decréscimo médio dos parâmetros BTEX em função das faixas de temperatura.....	143
Tabela 28: Decréscimo médio dos parâmetros TPH em função das faixas de temperatura.....	143
Tabela 29: Teste ANOVA para verificação da influência da temperatura no decréscimo do BTEX e TPH. ....	144



Tabela 30: Teste ANOVA para os resultados de água subterrânea contaminada (Poço de Sucção), considerando todos os ensaios. ....	147
Tabela 31: Teste de Tuckey comparando os resultados de BTEX do poço de sucção com o equipamento (sucção e aeradores). ....	150
Tabela 32: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para BTEX. ....	150
Tabela 33: Teste de Tuckey comparando os resultados de TPH do poço de sucção com o equipamento (sucção e aeradores). ....	152
Tabela 34: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para TPH. ....	152
Tabela 35: Decréscimo médio dos parâmetros BTEX e TPH para o sistema de remediação estudado. ....	153
Tabela 36: Resultados do monitoramento para o poço de sucção em escala piloto. ....	171
Tabela 37: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando a sucção em escala piloto. ....	173
Tabela 38: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando o aerador 1 em escala piloto. ....	176
Tabela 39: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando o aerador 2 em escala piloto. ....	179
Tabela 40: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando o filtro de adsorção em escala piloto. ....	182
Tabela 41: Decréscimo dos parâmetros BTEX em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no poço de sucção. ....	185
Tabela 42: Decréscimo dos parâmetros TPH em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no poço de sucção. ....	187
Tabela 43: Monitoramento do pH, Temperatura e Alcalinidade em ensaios em escala piloto. ....	189
Tabela 44: Resultados do monitoramento para o poço de sucção em escala real. ....	190
Tabela 45: Resultados do monitoramento para o tratamento por sucção em escala real. ....	191
Tabela 46: Resultados do monitoramento para o tratamento por aeração em escala real. ....	193
Tabela 47: Decréscimo dos parâmetros BTEX e TPH em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no poço de sucção. ....	195
Tabela 48: Monitoramento do pH e Temperatura em ensaios em escala real. ....	197

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Molécula do Benzeno .....	29
Figura 2: Molécula do Tolueno .....	30
Figura 3: Molécula do Xileno.....	31
Figura 4: Molécula do Etilbenzeno .....	32
Figura 5: Molécula do Benzo(a)pireno.....	32
Figura 6: Exemplo de pluma de contaminação em um Posto de Combustível .....	34
Figura 7: Aeração por ar difuso.....	68
Figura 8: Típica Isoterma de Adsorção de Freundlich .....	72
Figura 9: Típica Isoterma de Adsorção de Langmuir(a) e BET(b) .....	73
Figura 10: Curva típica de ruptura para adsorção por carvão ativado.....	75
Figura 11: Sistema de sucção à vácuo .....	90
Figura 12: Fluxograma sistema típico de bombeamento por vácuo em postos de combustíveis .....	90
Figura 13: Sistema de “air stripper” .....	91
Figura 14: Filtro de adsorção.....	91
Figura 15: Etapas da metodologia da pesquisa.....	94
Figura 16: Distribuição granulométrica do carvão ativado e da cinza de casca de arroz. ....	97
Figura 17: Caracterização por Fluorescência de Raio X.....	97
Figura 18: corte esquemático do perfil de solo e poço de sucção .....	100
Figura 19: Tubulações de PVC de 20mm utilizados para simular o fluxo do lençol freático.....	101
Figura 20: Perfil de solo e poço de sucção utilizado nos ensaios e mangueiras de alimentação da água contaminada. ....	101
Figura 21: Imagem da área da Unisinos (Fonte: Google, 2011) .....	102
Figura 22: Corte esquemático do sistema de remediação piloto instalado na Unisinos	107
Figura 23: Corte do aerador (dimensões em milímetros).....	111
Figura 24: Corte esquemático do sistema de remediação instalado no Posto B (medidas em metros).....	114
Figura 25: Variabilidade das concentrações de BTEX e TPH na água subterrânea dos 3 postos de combustíveis avaliados .....	120
Figura 26: Gráfico demonstrando a variabilidade dos parâmetros BTEX e TPH para água subterrânea contaminada sintética. ....	123
Figura 27: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Benzeno ao longo do experimento. ....	125
Figura 28: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Tolueno ao longo do experimento. ....	125
Figura 29: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Etilbenzeno ao longo do experimento. ....	126
Figura 30: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Xileno ao longo do experimento. ....	126
Figura 31: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH DRO ao longo do experimento. ....	128

Figura 32: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH GRO ao longo do experimento. ....	128
Figura 33: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH Total ao longo do experimento. ....	128
Figura 34: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Cor Aparente ao longo do experimento. ....	130
Figura 35: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Turbidez ao longo do experimento. ....	130
Figura 36: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Sólidos Suspensos ao longo do experimento. ....	131
Figura 37: Resultados de decréscimo de Tolueno para o Tempo 240 minutos .....	135
Figura 38: Resultados de decréscimo de Etilbenzeno para o Tempo 240 minutos .....	136
Figura 39: Resultados de decréscimo de Xileno para o Tempo 240 minutos .....	136
Figura 40: Resultados de decréscimo do TPH DRO para o Tempo 240 minutos .....	137
Figura 41: Resultados de decréscimo do TPH GRO para o Tempo 240 minutos .....	138
Figura 42: Resultados de decréscimo do TPH Total para o Tempo 240 minutos .....	138
Figura 43: Resultados de decréscimo da Cor Aparente para o Tempo 240 minutos....	139
Figura 44: Resultados de decréscimo da Turbidez para o Tempo 240 minutos.....	140
Figura 45: Resultados de decréscimo dos Sólidos Suspensos para o Tempo 240 minutos .....	140
Figura 46:- Comportamento do parâmetro temperatura nos ensaios realizados .....	141
Figura 47: Comportamento do parâmetro pH nos ensaios realizados .....	142
Figura 48: Comportamento do parâmetro alcalinidade nos ensaios realizados.....	142
Figura 49: Gráfico demonstrando a variabilidade dos parâmetros BTEX e TPH para água subterrânea contaminada do Posto B.....	146
Figura 50: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Benzeno ao longo do experimento. ....	148
Figura 51: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Tolueno ao longo do experimento. ....	148
Figura 52: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Etilbenzeno ao longo do experimento. ....	149
Figura 53: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Xileno ao longo do experimento. ....	149
Figura 54: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH C8-C40 ao longo do experimento. ....	151
Figura 55: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH C6-C10 ao longo do experimento. ....	151
Figura 56: Resultados de decréscimo de Benzeno para o Tempo 240 minutos .....	154
Figura 57: Resultados de decréscimo de Tolueno para o Tempo 240 minutos .....	155
Figura 58: Resultados de decréscimo de Etilbenzeno para o Tempo 240 minutos .....	155
Figura 59: Resultados de decréscimo de Xileno para o Tempo 240 minutos .....	156
Figura 60: Resultados de decréscimo de TPH C8-C40 para o Tempo 240 minutos ....	156
Figura 61: Resultados de decréscimo de TPH GRO para o Tempo 240 minutos .....	157
Figura 62: Comportamento do parâmetro temperatura nos ensaios realizados.....	158
Figura 63: Comportamento do parâmetro pH nos ensaios realizados .....	158
Figura 64: Projeto do equipamento (evolução) .....	161
Figura 65: Equipamento a ser comercializado, instalado em uma área contaminada. .	161

## RESUMO

O objetivo desta tese foi o desenvolvimento de um equipamento compacto para o tratamento de águas subterrâneas contaminadas por BTEX e TPH em postos de combustíveis. Esta questão ambiental é uma preocupação mundial devido ao nível de contaminação e a quantidade de vazamentos existentes, toxicidade dos poluentes e a necessidade de uso de aquíferos para consumo humano. O equipamento é composto por unidades que contemplam as seguintes etapas: (a) sucção e volatilização de compostos orgânicos voláteis; (b) injeção de ar (“air sparging”) para remoção de substâncias orgânicas voláteis; e (c) filtro de adsorção com recheio composto por mistura de 50% de carvão ativado e 50% de cinza de casca de arroz para a remoção de TPH. A parte experimental envolveu a caracterização de águas subterrâneas contaminadas e estudos em escala piloto e real. Os resultados obtidos demonstraram que o equipamento de remediação desenvolvido é altamente eficiente para o tratamento de águas subterrâneas contaminadas. Com um tempo de detenção de 8 horas, obtiveram-se decréscimos superiores a 96% de BTEX e TPH. Nesta situação, a água contaminada tratada alcança valores que atendem aos critérios de lançamento estabelecidos pela legislação nacional vigente.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas, BTEX, TPH, Contaminação por Hidrocarbonetos, Remediação.

## **ABSTRACT**

This study describes the development of a compact device to treat groundwater contaminated with BTEX and TPH in gas stations. This environmental issue raises concerns worldwide, due to the level of contamination, the high occurrence of leaks, the toxicity of contaminants, and the importance of aquifers for human consumption. The equipment was formed by: a) a suction and treatment stage using vacuum and aeration with injectors (to replace the suction system based on a conventional vacuum pump and the air stripping and/or air sparging system); b) small-scale surface aerators (to replace the air stripping and/or air sparging system); c) an adsorption filter using a mixture of activated carbon (50%) and rice husk ash (50%) (to replace the activated carbon system). The experiment was conducted in four stages: a) characterization of groundwaters; b) presentation of the adsorbents used in the filter; c) pilot test (under controlled conditions to measure the efficiency to remove BTEX and TPH); and d) the full-scale tests (observation and confirmation of equipment efficiency). The results show that the remediation equipment developed is highly efficient to treat contaminated groundwater. An 8-h retention time afforded to reduce BTEX and TPH levels by over 96%. In this scenario, the treated water parameters meet the current legal requirements for discharge.

**Keywords:** Groundwater, BTEX, TPH, Contamination with Hydrocarbons, Remediation.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	23
2.1	OBJETIVO GERAL.....	23
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	24
3.1	ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS.....	24
3.2	CARACTERÍSTICAS E TOXICIDADE DOS HIDROCARBONETOS .....	27
3.2.1	<b>Benzeno</b> .....	29
3.2.2	<b>Tolueno</b> .....	30
3.2.3	<b>Xileno</b> .....	31
3.2.4	<b>Etilbenzeno</b> .....	31
3.2.5	<b>Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP)</b> .....	32
3.3	DINÂMICA DA CONTAMINAÇÃO DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA 32	
3.4	REMEDIAÇÃO DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	35
3.4.1	<b>Atenuação Natural Monitorada</b> .....	39
3.4.2	<b>Biorremediação</b> .....	41
3.4.3	<b>Bioventilação</b> .....	45
3.4.4	<b>Tratamento Térmico</b> .....	46
3.4.5	<b>Oxidação Química</b> .....	47
3.4.6	<b>Fitorremediação</b> .....	50
3.4.7	<b>Contenção</b> .....	51
3.4.8	<b>Barreiras Reativas Permeáveis</b> .....	51
3.4.9	<b>Remoção e redistribuição de solos</b> .....	52
3.4.10	<b>Bombeamento e Tratamento (“Pump and Treat”)</b> .....	52
3.4.10.1	Extração de Vapor .....	54
3.4.10.2	Extração por Solvente.....	55
3.4.10.3	Extração Multifásica (MPE).....	55
3.4.10.4	Injeção de ar na zona saturada (“Air Sparging”).....	56

3.4.10.5	Adsorção.....	57
3.4.10.6	Extração de Compostos Voláteis em torre de aeração (“Air Stripping”).....	59
3.5	FUNDAMENTOS .....	60
<b>3.5.1</b>	<b>Solubilidade de gases em água.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Mecanismos da Transferência de gases.....</b>	<b>62</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Sistemas de aeração .....</b>	<b>65</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Remoção de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) por aeração.....</b>	<b>68</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Adsorção .....</b>	<b>70</b>
3.6	ESTUDOS ACERCA DE APLICAÇÕES DE TRATAMENTO .....	75
3.7	NORMAS E LEGISLAÇÕES APLICADAS À ÁREA .....	92
4	METODOLOGIA.....	94
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA .....	95
4.2	MATERIAIS ADSORVENTES .....	95
4.3	ENSAIOS EM ESCALA PILOTO .....	99
<b>4.3.1</b>	<b>Projeto e construção de perfil de solo e poço de sucção.....</b>	<b>99</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Caracterização da água subterrânea contaminada sintética.....</b>	<b>104</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Aparato experimental .....</b>	<b>106</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Testes hidráulicos do sistema de remediação.....</b>	<b>112</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Ensaio de eficiência do tratamento.....</b>	<b>113</b>
4.4	ENSAIOS EM ESCALA REAL .....	114
4.5	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS .....	117
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	118
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA .....	118
5.2	ENSAIOS EM ESCALA PILOTO .....	122
<b>5.2.1</b>	<b>Resultados da água subterrânea contaminada usada nos ensaios piloto</b> 122	
<b>5.2.2</b>	<b>Resultados do tratamento ao longo do experimento .....</b>	<b>125</b>
5.2.2.1	Parâmetros: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno.....	125
5.2.2.2	Parâmetros: TPH DRO, TPH GRO e TPH Total .....	128
5.2.2.3	Parâmetros: cor aparente, turbidez e sólidos suspensos .....	130
<b>5.2.3</b>	<b>Resultados de eficiência do tratamento .....</b>	<b>132</b>

5.2.4	<b>Resultados do tratamento em escala piloto para o tempo de monitoramento igual a 240 minutos</b> .....	134
5.2.5	<b>Influência da temperatura, pH e Alcalinidade no tratamento</b> .....	141
5.3	<b>ENSAIOS EM ESCALA REAL</b> .....	145
5.3.1	<b>Resultados da água subterrânea contaminada usada nos ensaios em escala real</b> .....	145
5.3.2	<b>Resultados do tratamento ao longo do experimento</b> .....	148
5.3.2.1	Parâmetros: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno.....	148
5.3.2.2	Parâmetros: TPH C8–C40 e TPH GRO C6–C10 .....	151
5.3.3	<b>Resultados de eficiência do tratamento</b> .....	152
5.3.4	<b>Resultados do tratamento em escala real para o tempo de monitoramento igual a 240 minutos</b> .....	154
5.3.5	<b>Influência da temperatura e pH no tratamento</b> .....	157
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	159
7	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	162
8	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	163
	<b>APÊNDICE I – Resultados do Monitoramento em Escala Piloto</b> .....	171
	<b>APÊNDICE II – Resultados dos Decréscimos em Escala Piloto</b> .....	185
	<b>APÊNDICE III – Resultados do Tratamento em Escala Piloto para pH, Temperatura e Alcalinidade</b> .....	189
	<b>APÊNDICE IV – Resultados do Monitoramento em Escala Real</b> .....	190
	<b>APÊNDICE V – Resultados dos Decréscimos em Escala Real</b> .....	195
	<b>APÊNDICE VI – Resultados do Tratamento em Escala Real para pH e Temperatura</b> .....	197



## 1 INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia significou nos últimos anos, a nível mundial, um maior consumo de recursos naturais não renováveis e/ou escassos. Entre os diversos recursos naturais utilizados (por exemplo: água, energia, minerais, rochas), os combustíveis fósseis são destaque pelo seu uso na geração de energia.

No entanto, a problemática principal não está relacionada somente ao aspecto ambiental do consumo de combustíveis (embora o impacto ambiental, redução da disponibilidade de recursos naturais e/ou escassos, seja uma preocupação), mas também ao aspecto ambiental emergencial relacionado à probabilidade de vazamentos e/ou derramamentos destes produtos.

Conforme CORSEUIL *et al.* (1996) e TIBURTIUS *et al.* (2005b), no Brasil existem cerca de 27.000 postos de combustíveis com potencial de possuir vazamentos. Esta realidade não é só brasileira, mas sim mundial. Estes mesmos trabalhos e outros diversos pesquisadores relatam a existência e preocupações com vazamentos provenientes de tanques enterrados em postos de combustíveis em diversos locais do mundo, desde Estados Unidos até Europa.

Analisando sob o ponto de vista ambiental, estes vazamentos significam potencialidade de geração de impactos ambientais como: contaminação de água, solo e alteração da qualidade do ar. A principal preocupação está relacionada segundo diversos pesquisadores (CORSEUIL *et al.* (1997), CORSEUIL *et al.* (1996), MALAMUD *et al.* (2005), NUNES & CORSEUIL (2005), SCHNEIDER *et al.* (2005), WATTS *et al.* (2000), AYOTAMUNO *et al.* (2006), CORSEUIL *et al.* (2004), FINOTTI *et al.* (2001)) a contaminação dos aquíferos que possam ser utilizados como fonte de abastecimento de água para consumo humano.

Já sob o ponto de vista de saúde e segurança da população, esta relação está ligada a presença de compostos químicos perigosos com potencial de geração de doenças graves, como é o exemplo do benzeno, tolueno e xileno. Além disso, o risco iminente de explosão e incêndios também deve ser analisado.

O fundamento destas preocupações se deve ao histórico de acidentes ambientais. Enquanto problemas maiores relacionados a falhas na extração, refino e transporte são

mais divulgados e representam grandes impactos ambientais; os tanques enterrados em postos de combustíveis são destacados na literatura principalmente devido à quantidade destes estabelecimentos, local físico de instalação e frequência de vazamentos, embora em pouco volume.

A questão dos postos de abastecimento são os tanques que na sua maioria são enterrados e de composição metálica. Associando isto a idade destes tanques (a maioria acima da vida útil, ou seja, 20 anos), problemas de manutenções e o produto químico estocado, a consequência são os acidentes ambientais relatados anteriormente.

A partir disto, ocorre a necessidade de avaliação ambiental da área para verificação da extensão e gravidade da ocorrência. A ação posterior está relacionada a recuperação destas áreas de forma a torná-las o mais próximo possível do ambiente natural local, antes do sinistro.

Surgem assim diversas tecnologias de remediação de áreas, amplamente abordadas na literatura. Desde medidas bastante usuais, não tão efetivas, porém com custos menores, como é o exemplo do “Pump and Treat” e “Extração de Vapor”, até tecnologias mais arrojadas e custosas, como injeção de calor e “air stripping”, entre outros.

O estudo de revisão de tecnologias de remediação realizado por KHAN *et al.* (2004) aponta algumas considerações a respeito dos métodos de tratamento:

- O método convencional “pump-and-treat” foi o mais freqüentemente usado no passado;
- Devido aos custos e não garantia de segurança do tratamento, atualmente há um domínio das tecnologias de “air sparging” e SVE (Extração de Vapor);
- A utilização do método de “air sparging” em quatro casos estudados pelos autores, demonstrou a capacidade do método em reduzir as altas concentrações de contaminantes em um curto espaço de tempo.

Como resultados finais KHAN *et al.* (2004) citam que não há uma única tecnologia apropriada para todos os tipos e variedades das áreas contaminadas. As condições da área, tipos e origem dos contaminantes, medidas de controle disponíveis e o potencial impacto determinam a escolha da estratégia e tecnologia de remediação. A utilização de processos combinados de tratamento é usualmente aplicada em áreas

contaminadas e é indicada. O resultado é uma melhor eficiência de remediação a custos viáveis.

De acordo com a CETESB (2007), as técnicas de remediação podem ser distinguidas em dois “status” de aplicação: tecnologias consagradas e tecnologias inovadoras ou emergentes. As consagradas são aqueles que já possuem suficiente conhecimento técnico para prever resultados e não requerem mais testes de laboratório ou piloto.

Por outro lado, as tecnologias emergentes ou inovadoras estão em desenvolvimento, sendo opção alternativa de tratamento, porém ainda requerem estudos e testes laboratoriais e pilotos de forma a comprovar sua eficiência. O princípio destas novas tecnologias é a redução de custo e da periculosidade ou nível de toxicidade dos contaminantes presentes em uma determinada área por meio da degradação biológica ou da modificação química, utilizando-se reações que neutralizem ou decomponham esses compostos; ou ainda, por meio da retirada de determinadas frações desta contaminação, tais como fases gasosas ou outras (CETESB, 2007).

A necessidade de inovação em processos de remediação de áreas contaminadas é tema central na Europa. Conforme SPIRA *et al.* (2006), os principais problemas de “sites” contaminados no continente são devido ao crescimento do número de indústrias e o posterior abandono. Conforme os autores, os sistemas de tratamento tradicionais, como “pump and treat”, por exemplo, não se apresentam sustentáveis na relação custo-benefício e eficiência de tratamento. Assim, por estas razões os estudos na área relacionados ao refinamento de tecnologias inovadoras de remediação objetivam principalmente: a) a sustentabilidade; b) serem ambientalmente amigáveis; c) possibilidade de gestão da contaminação com minimização de impactos; d) baixo consumo de energia e recursos naturais; e) relação custo-eficiência.

Ainda segundo os autores, o uso de sistemas de remediação tradicionais ainda é comum na Europa em função da dificuldade de introdução de inovações neste mercado, o que justifica a necessidade de comprovação de testes em laboratórios e pilotos de forma a garantir a funcionalidade da proposta.

No Brasil, uma das técnicas de remediação de áreas degradadas por hidrocarbonetos bem difundida é a sucção MPE utilizando sistema de vácuo e tratamento do efluente utilizando processo aerado.

Analisando as tecnologias de aeração, destacam-se a utilização do processo de “air stripping” e “air sparging”. O sistema conhecido por “air stripping” usual refere-se, conforme EPA (2001d), a um tanque composto por material de empacotamento (composto por plástico, metal ou cerâmica) e injeção de ar para promoção do processo de arraste. Este tipo de equipamento possui representação no Brasil, de certa forma restrita e ainda partindo de investimentos elevados, o que limita sua utilização.

Outra opção muito utilizada refere-se ao “air sparging”. Compreende a injeção de ar comprimido, em volumes e pressões controlados, na água subterrânea, abaixo dos pontos mais profundos da contaminação. Envolve um ou mais poços de injeção, compressor, válvulas de controle de bombeamento e medidores de pressão (EPA, 1997b; CETESB, 2007).

Ambas tecnologias de remediação utilizam injeção de ar, bombas ou compressores para promoção da aeração. Existe, no entanto, uma opção muito conhecida, comum e muito eficiente em sistemas de tratamento de efluentes industriais, aonde a aeração é promovida por aeradores de superfícies. A questão neste caso é o tamanho destes aeradores os quais não poderiam ser utilizados em sistemas de remediação em postos de abastecimento, principalmente devido às dimensões.

A busca por uma eficiência maior de remoção de contaminantes, obtida, por exemplo, com uso de aeradores superficiais, porém com dimensões e custos aplicáveis a sistemas de remediação em postos de abastecimento, também motiva o estudo por sistemas alternativos para promoção de aeração e tratamento deste tipo de efluentes, levando em consideração maior eficiência e redução de recursos naturais e de custos.

Em relação à sucção, o sistema de bombeamento para posterior tratamento (“pump and treat”) descrito nesta pesquisa e abordado nos estudos da EPA (2001b) e CETESB (2007), pode ocorrer de diversas formas. Atualmente, tem-se visto a utilização de tecnologia de vácuo para bombeamento com sucção das fases líquida e gasosa. A questão principal refere-se aos custos dos equipamentos (tanque de vácuo, bomba de anel líquido e reservatório de água limpa) para realização de bombeamento e a área ocupada por este sistema.

Assim as atuais tecnologias necessitam de uma área muito grande para instalação (considerando-se que Postos de Combustíveis possuem áreas restritas para instalação), ou possuem um consumo excessivo de energia elétrica, ou produtos para

remediação que causam severos impactos ambientais (como carvão ativado, por exemplo) ou são sistemas não efetivos quando realizada uma avaliação de custo-benefício. O resultado são custos elevados de tratamento que, para um operador de um posto de abastecimento, significa inviabilização da implantação do sistema de tratamento.

Neste contexto o tema deste trabalho se refere a estudos alternativos de tratamento de águas contaminadas por hidrocarbonetos em subsolo localizados em postos de abastecimento. Questões como: 1) é possível a utilização de sistemas alternativos para remediação de áreas degradadas por hidrocarbonetos otimizando custos de operação e eficiência? e 2) é possível utilização de cinza de casca de arroz como um novo adsorvente destes contaminantes? São essas as hipóteses de trabalho, as quais foram estudadas.

O projeto é derivado de três projetos maiores: dois aprovados pelo Edital de Subvenção Econômica do INOVA RS, financiados pelo Sistema FIERGS, SEBRAE e FINEP, e um resultado da aprovação do Edital PRONEM/FAPERGS/CNPq n. 003/2011 Programa de apoio a núcleos emergentes. O desenvolvimento dos projetos é uma parceria entre a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a empresa Projeconsult Engenharia Ltda.

A pesquisa propõe algumas inovações nos sistemas de remediações atualmente empregados. Diz respeito ao desenvolvimento de um sistema compacto composto por: 1) equipamento de sucção e tratamento por vácuo e aeração utilizando injetores (substituição ao sistema de sucção com bomba de vácuo convencional e sistema de tratamento por “air stripping” e/ou “air sparging”); 2) equipamentos aeradores de superfície em pequena escala (substituição ao sistema de tratamento por “air stripping” e/ou “air sparging”); 3) Filtro de adsorção com recheio composto por mistura de carvão ativado e cinza de casca de arroz (substituição ao sistema de filtro de adsorção com 100% carvão ativado). Os princípios gerais deste sistema referem-se a permitir:

- A extração e tratamento de VOC's e o tratamento “ex situ” “in site” e/ou “off site” de águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos voláteis em fase dissolvida;

- Instalação dos equipamentos em pequenos espaços territoriais de forma a poder ser utilizado, por exemplo, em postos de abastecimento / serviços, que são empreendimentos dotados, normalmente, de pequenas áreas disponíveis;
- Utilização de um ou mais módulos de aeradores de superfície;
- A utilização de módulo composto por filtros de adsorção para polimento do tratamento.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa é o desenvolvimento de um equipamento compacto de tratamento aplicável ao tratamento de águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos provenientes de postos de abastecimento.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos e comparar com legislação vigente;
- Desenvolver equipamento para tratamento de águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos composto por: sucção e tratamento a vácuo, aeração e filtro de adsorção com recheio de cinza de casca de arroz;
- Testar a eficiência do equipamento em escala piloto, sob condições operacionais controladas, quanto ao decréscimo da concentração de BTEX e TPH em água subterrânea contaminada sintética;
- Testar a eficiência do equipamento em escala real, sob condições reais de operação em um posto com remediação ativa, quanto ao decréscimo da concentração de BTEX e TPH na água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS

Cem anos atrás a disposição de resíduos industriais e domésticos não era um sério problema. As indústrias eram relativamente pequenas e havia apenas poucas grandes cidades. As contaminações existentes eram tratadas por atenuação natural no meio ambiente (SUTHERSAN & PAYNE, 2005).

Com o crescimento das populações e da indústria, foram criados novos produtos e novas tecnologias, que objetivam a melhora na qualidade de vida das populações. Com isso cresceu também a demanda por produtos químicos e combustíveis. A consequência, porém, deste desenvolvimento foi o aumento da quantidade de poluentes dispostos no meio ambiente oriundos de resíduos destes processos industriais (BERGER, 2005; SUTHERSAN & PAYNE, 2005).

Em paralelo a isto, foram desenvolvidas no mundo todo, diversas legislações de forma a regular a disposição de resíduos no meio ambiente e para tratamento de áreas contaminadas (SUTHERSAN & PAYNE, 2005).

Percebe-se, no entanto, a existência de diversas áreas que já estão contaminadas e/ou problemas de lançamentos de resíduos ou efluentes de forma inadequada no meio ambiente, não atendendo estas normas e/ou legislações. Um dos impactos de relevância, conforme BERGER (2005) e GALANTE (2008), está relacionado a problemas operacionais de extração de petróleo e seus derivados, refinamento, transporte e operações de armazenamento.

CAETANO *et al.* (2010) destaca a preocupação com os efeitos danosos no meio ambiente e constante riscos de incêndios e explosões associados diretamente a vazamentos de tubulações subterrâneas e reservatórios de armazenamento de postos de combustíveis. GALANTE (2008) cita que este impacto ambiental é crescente no Brasil e uma preocupação antiga em outros países como na Europa e Estados Unidos. TIBURTIUS *et al.* (2005a) destacam a preocupação em função da alta frequência de ocorrência e gravidade com que o meio ambiente é afetado. Embora, ainda de acordo



com TIBURTIUS, *et al* (2005a); os grandes vazamentos de petróleo sejam preocupantes e ocupem maior destaque na mídia, estima-se que a principal fonte está relacionada a pequenos e contínuos vazamentos de combustível em postos de distribuição.

CORSEUIL *et al.* (1997) exemplifica estas afirmações citando a estimativa da Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (EPA), a qual afirma que, dos 2 milhões de tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina existentes, na época, nos Estados Unidos, cerca de 600.000, ou seja, 30% já tinham vazado ou estavam com vazamentos. Segundo CORSEUIL *et al.* (1996) a frequência de vazamento nos tanques de gasolina nos EUA, deve-se a operações inadequadas de frentistas e/ou em função do final da vida média esperada dos tanques que é de 25 anos, sendo este último motivo também citado por TIBURTIUS *et al.* (2005b). WATTS *et al.* (2000) destacam, da mesma forma, que a origem, nos EUA, mais comum das contaminações por gasolina e produtos químicos de solos e águas subterrâneas deve-se a tanques enterrados de armazenamento de combustível.

No Brasil, CORSEUIL *et al.* (1996) e TIBURTIUS *et al.* (2005b) relatam que há cerca de 27.000 postos de combustíveis com potencial para provocar vazamentos. Esta afirmação se baseia na estimativa de que muitos destes tanques possuem mais de 25 anos, com possíveis rachaduras e corrosão do casco. Ainda segundo os autores, o número de postos que apresentam problemas variam de 20% a 30%, sendo que na maioria dos casos, só percebe-se os vazamentos depois da descoberta dos seus efeitos.

Em seu estudo, GALANTE (2008) citou fatores que contribuem para a ocorrência destes vazamentos: 1. a oxidação e a corrosão dos tanques e das tubulações subterrâneas; 2. problemas operacionais durante a comercialização e/ou manipulação dos combustíveis; 3. acidentes durante o transporte; 4. instalações defeituosas e rompimento/deformações das linhas de distribuição dos combustíveis.

É consenso entre diversos pesquisadores da área – entre estes: CORSEUIL *et al.* (1997), CORSEUIL *et al.* (1996), MALAMUD *et al.* (2005), NUNES & CORSEUIL (2005), SCHNEIDER *et al.* (2005), WATTS *et al.* (2000), AYOTAMUNO *et al.* (2006), CORSEUIL *et al.* (2004), FINOTTI *et al.* (2001) - que uma das principais preocupações com estes acidentes deve-se a contaminação dos aquíferos que possam ser utilizados como fonte de abastecimento de água para consumo humano. Conforme NUNES & CORSEUIL (2005), devido a crescente deterioração das águas superficiais

dos meios urbanos, as águas subterrâneas passaram a exercer um papel importante como fonte de abastecimento. Assim sendo, sua preservação se torna uma questão estratégica para política ambiental de todas as nações do mundo.

FINOTTI *et al.* (2001) ainda citam três motivos relacionadas a tal preocupação com as águas subterrâneas e contaminações por hidrocarbonetos: (1) porque postos de combustíveis fazem parte da vidas das cidades e são espalhados em vários locais; (2) porque apesar do Brasil ser um país privilegiado em volume de águas superficiais para abastecimento público, sua poluição tem sido tão intensa desenvolvendo a necessidade do uso cada vez mais freqüente do uso de águas subterrâneas; (3) porque a contaminação subsuperficial é muito difícil de ser detectada. Além de prejuízos ao solo e água subterrânea, MALAMUD *et al.* (2005) ainda mencionam outros prejuízos associados a estas contaminações que são os gastos de recursos econômicos e riscos de incêndios e explosões das áreas afetadas.

A grande questão referente a vazamentos de combustíveis e possíveis ameaças a qualidade das águas dos lençóis freáticos e subterrâneos, está relacionada, de acordo com NUNES & CORSEUIL (2005) e TIBURTIUS & ZAMORA (2004), a alta toxicidade dos hidrocarbonetos monoaromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos - BTEX). CORSEUIL *et al.* (1997) relatam que estes compostos podem estar presentes em significativas concentrações na gasolina, possuindo razoável solubilidade, sendo os primeiros contaminantes a atingir os recursos hídricos.

Dentre os compostos tóxicos apresentados anteriormente, o benzeno é considerado o mais crítico. Isto é justificado principalmente pela sua toxicidade e risco a saúde humana com caráter carcinogênico e mutagênico. Além do benzeno, tolueno e xileno também causam sérios danos à saúde tais como: distúrbios no modo de falar, na visão, na audição, no controle dos músculos e outros (TIBURTIUS & ZAMORA, 2004; TIBURTIUS *et al.*, 2005).

Outra questão que merece destaque é citada por diversos pesquisadores (entre estes: TIBURTIUS & ZAMORA, 2004; TIBURTIUS *et al.*, 2005; MALAMUD *et al.*, 2005; CORSEUIL *et al.*, 1997; CORSEUIL *et al.*, 2004; SCHNEIDER *et al.*, 2005) refere-se a característica da gasolina brasileira em relação a presença de cerca de 20 a 26% de adição de etanol na composição. A consequência disso, em caso de vazamentos,

pode ser, conforme os autores, a dificuldade de atenuação dos hidrocarbonetos de petróleo, aumentando sua mobilidade e inibindo o processo de biodegradação.

Este efeito negativo foi explicado em um estudo de acompanhamento de degradação do benzeno com e sem ausência de etanol desenvolvido por CORSEUIL *et al.* (1996). Conforme os resultados obtidos, em caso de contaminação de aquíferos por misturas de etanol e compostos BTEX, a pluma de BTEX se desloca sem degradação até completa biodegradação do etanol. Somente então, desde que haja oxigênio disponível, os compostos de BTEX serão biotransformados.

MALAMUD *et al.* (2005) confirmaram esta citação ao estudar o processo de atenuação natural como forma de remediação de água subterrânea contaminada por gasolina e etanol. Os resultados experimentais demonstraram que o primeiro poluente a ser degradado foi o etanol. Somente depois do desaparecimento deste contaminante no meio foi percebida a redução da concentração das plumas de BTEX. Destes contaminantes, aquele que apresentou maior degradação foi o benzeno, sendo justificado pelos autores, possivelmente, em função da maior mobilidade do mesmo.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS E TOXICIDADE DOS HIDROCARBONETOS

A importância do estudo da toxicologia deve-se em função da quantidade de utilização e desenvolvimento de substâncias químicas no mundo atual (GOES, 1997). O conceito está associado à proteção da saúde da sociedade o que, conseqüentemente, envolve a proteção ambiental.

Assim, com o reconhecimento de diversos países quanto à necessidade do desenvolvimento sustentável, crescem as práticas de redução de recursos naturais, resíduos e a utilização de produtos menos poluentes. Neste contexto, aliado ao conceito de toxicologia (ciência que estuda os efeitos nocivos decorrentes das interações de substâncias químicas com os organismos, sob condições específicas de exposição), os autores descrevem então o conceito de ecotoxicologia (OGA *et al.*, 2008):

“A ecotoxicologia é o estudo dos efeitos tóxicos de substâncias químicas e efluentes industriais em uma população, na comunidade e também no ecossistema, bem como as medidas necessárias para prever, conter ou tratar os danos causados. Dentre as classes dos poluentes, destacam-se: herbicidas, inseticidas, fungicidas, íons inorgânicos como metais, solventes orgânicos, substâncias radioativas, entre outros”

Em relação aos poluentes hidrocarbonetos, conforme citado anteriormente nos trabalhos de BERGER (2005) e GALANTE (2008), há uma grande preocupação mundial quanto à toxicidade e ecotoxicidade destes compostos em virtude de possíveis acidentes ambientais.

PATNAIK (1999) e GOES (1997) descrevem os hidrocarbonetos como uma importante classe de compostos orgânicos que contém diversos tipos de moléculas formadas de átomos de hidrogênio e carbono. Estes compostos ocorrem em produtos de petróleo, óleos e graxas, gases naturais, hulha e alcatrão de hulha, e em gases no interior do solo.

GOES (1997) divide estes produtos em hidrocarbonetos saturados (Parafínicos: cadeias retilíneas com ligações simples; Naftênicos: cadeias em forma de anel com ligações simples) e insaturados (Aromáticos: cadeias em forma de anel, com ligações duplas e/ou simples alternadas; Olefinas: cadeias retilíneas com ligação dupla; Diolefinas: cadeias retilíneas com duas ligações duplas; Acetilênicos: cadeias retilíneas com ligação tripla).

No entanto, PATNAIK (1999) classifica em 3 categorias: compostos alifáticos de cadeia aberta (Ex. metano, etano, propano, etileno, buteno, etc); compostos cíclicos e alicíclicos (Ex. ciclopropano, ciclobutano, ciclopentano, etc) e aromáticos (Ex. Benzeno, tolueno, xileno, etc). Em relação às características, o autor destaca ainda que a toxicidade para humanos e animais, e reatividade dos compostos alifáticos e alicíclicos são muito baixas, tanto os gases gerados como em água; ao contrário dos compostos aromáticos os quais são muito agressivos para saúde humana e meio ambiente.

Independente das diferentes denominações relacionadas a classificação dos hidrocarbonetos, percebe-se que os combustíveis de interesse neste estudo, gasolina e óleo diesel, conforme GOES (1997), são uma mistura complexa de hidrocarbonetos, a

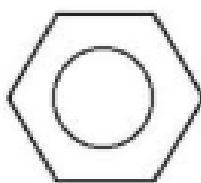
qual inclui, aromáticos e alifáticos. Dentre estes, os aromáticos merecem destaque em termos de toxicologia.

A inalação de vapores com alta concentração destes compostos, por exemplo, podem causar sintomas como alucinação, euforia, distorção da percepção e dores de cabeça. Severas intoxicações podem acarretar depressão, letargia e coma. Além do benzeno, os hidrocarbonetos polinucleares aromáticos (PAH) podem também causar câncer ou outros efeitos crônicos para o ser humano (PATNAIK, 1999).

A seguir uma breve descrição das características e toxicidade dos principais compostos de interesse deste estudo:

### 3.2.1 Benzeno

O benzeno pode ser encontrado como produto de destilação de hulha e alcatrão de hulha e em produtos de petróleo como a gasolina (Figura 1). Outras ocorrências podem ser em: gases e lixiviados de aterros de resíduos industriais, resíduos de demolição e resíduos domésticos; e durante a remoção, limpeza, bombeamento e testes em tanques subterrâneos de gasolina. Este composto é usado em ceras, adesivos, tintas, resinas, óleos, indústria farmacêutica, entre outras diversas aplicações (PATNAIK, 1999).



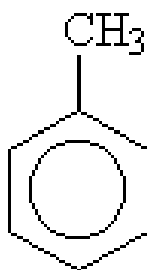
**Figura 1: Molécula do Benzeno**

Em relação aos danos a saúde, o composto é tóxico e os efeitos quanto à inalação, ingestão e contato com a pele variam de baixo a moderado. Os sintomas humanos são alucinações, distorção da percepção, euforia, sonolência, náusea, vômito e dor de cabeça. Por inalação, os efeitos narcóticos do benzeno devem ocorrer em

concentrações a partir de 200ppm. Altas concentrações podem causar convulsões e, entre 5 e 10 minutos de exposição a 2% de benzeno no ar pode ser fatal. Exposições ocupacionais podem causar ainda depressão, anemia e leucemia (PATNAIK, 1999).

### 3.2.2 Tolueno

É derivado tanto do alcatrão de hulha quanto do petróleo. Aparece na gasolina e em muitos solventes (Figura 2). Utilizado na produção de trinitrotolueno (TNT), benzeno, entre outros; como um ingrediente de pigmentos, remédios e detergentes; e como solvente industrial para borrachas, tintas, revestimentos e óleos (PATNAIK, 1999).



**Figura 2: Molécula do Tolueno**

A toxicidade do tolueno é parecida com o benzeno. As vias de exposição são a inalação, ingestão e absorção pela pele, afetando o sistema nervoso central, fígado e rim. Exposições agudas, a partir de 200ppm no ar, podem produzir euforia, alucinação, distorção da percepção, dor de cabeça. Altas concentrações podem causar depressão, sonolência e letargia. Altas concentrações no ar (em torno de 10.000ppm) deve causar óbito devido a problemas respiratórios (PATNAIK, 1999).

### 3.2.3 Xileno

O xileno pode ser encontrado em solventes de petróleo e gasolina (Figura 3). É utilizado em solventes para pinturas, revestimentos, borrachas; também em manufaturas de pigmentos, remédios, pesticidas, entre outros. As propriedades tóxicas são similares ao tolueno, podendo afetar, em altos níveis de exposição, o sistema nervoso central, olhos, intestinos, fígado, rim, sangue e pele.

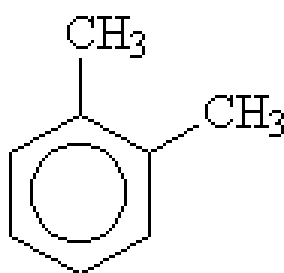
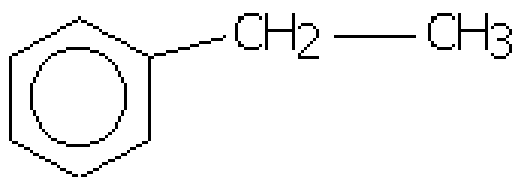


Figura 3: Molécula do Xileno

A exposição ao composto deve causar irritação nos olhos, nariz e garganta; dores de cabeça, náuseas, vômitos, dores abdominais, dermatites, etc. Para os seres humanos, concentrações acima de 200ppm no ar e exposições acima de 10.000ppm por 6-8 horas, devem ser fatais (PATNAIK, 1999).

### 3.2.4 Etilbenzeno

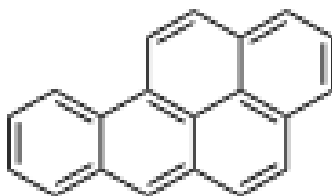
Etilbenzeno é usado como um solvente e como intermediário na produção de monômero de estireno (Figura 4). A toxicidade aguda do composto é baixa. Em altas concentrações, possui efeitos narcóticos similares ao benzeno e tolueno. Da mesma forma, que estes é irritante para pele, olhos e nariz (PATNAIK, 1999).



**Figura 4: Molécula do Etilbenzeno**

### 3.2.5 Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Estes elementos possuem mais de um anel aromático. Entre estes podem ser citados: naftaleno, benzo(a)pireno, benzo(e)pireno, benzo(a)antraceno, entre outros. Os PAH's também podem estar presentes na gasolina e os efeitos a saúde, conforme PATNAIK (1999), podem ser: irritação dos olhos, pele e trato respiratório. Exposição prolongada pode afetar os rins, fígado, sangue, pele, olhos e sistema nervoso central. O benzo(a)pireno, pode causar mutações no organismo, e todos os outros compostos como o benzo(e)pireno e benzo(a)antraceno, por exemplo, são potenciais agentes cancerígenos.



**Figura 5: Molécula do Benzo(a)pireno**

## 3.3 DINÂMICA DA CONTAMINAÇÃO DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA

O transporte dos contaminantes no aquífero é dado pela movimentação da água subterrânea. Este transporte é controlado por uma combinação de fatores físicos, químicos e bióticos. Isto inclui processos físicos de advecção, difusão, dispersão e



capilaridade; processos bióticos e abióticos de bioacumulação, degradação, imobilização, retardação e volatilização (CHARBENEAU *et al.*, 1992).

Conforme FETTER (1999) e MAXIMIANO (2001) *apud* GALANTE (2008):

- **Adveção:** processo onde a água, fase livre e fase dissolvida infiltram na zona não saturada sob ação da gravidade e pressão até chegar na zona saturada. O transporte se dá no sentido e direção do fluxo d'água. É o principal mecanismo responsável pela migração do contaminante no aquífero;
- **Dispersão:** refere-se ao espalhamento dos contaminantes no fluxo d'água;
- **Difusão:** é o processo aonde os íons e moléculas dissolvidas passam da área de maior concentração para a de menor concentração;
- **Retardação:** é o processo que retarda o transporte do contaminante imobilizando ou atrasando a fase dissolvida ou vapor. O principal processo é a adsorção no solo;
- **Atenuação:** é o processo que pode remover ou transformar a massa de produto. Para compostos orgânicos, os processos principais de atenuação podem ser reações de oxidação-redução química ou biológica, hidrólise ou volatilização;
- **Biodegradação:** são as transformações dos compostos orgânicos pela atividade metabólica dos microrganismos;
- **Volatilização:** consiste na conversão para a fase vapor dos compostos químicos voláteis presentes em fase livre, fase dissolvida ou na fase retida no solo.

A Figura 6 apresenta um exemplo de pluma de contaminação de combustíveis em um posto de combustíveis. Com isto é possível perceber o transporte de contaminantes do ponto mais contaminado (coloração roxa escura) até os pontos menos contaminados (coloração amarela mais clara).

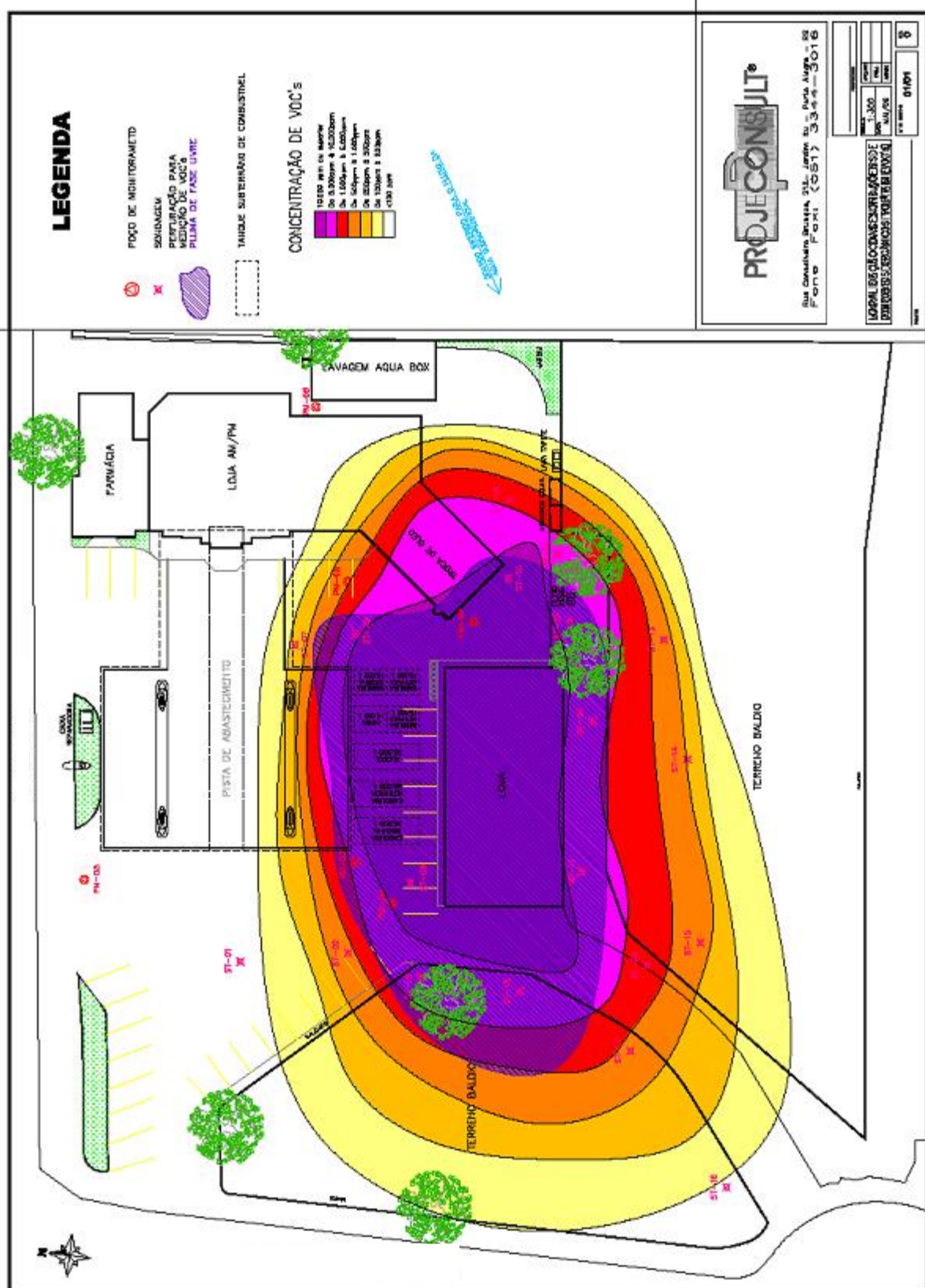


Figura 6: Exemplo de pluma de contaminação em um Posto de Combustível

Fonte: Projeconsult Engenharia Ltda (2009)

### 3.4 REMEDIAÇÃO DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA

MARIANO *et al.* (2007) e TEIXEIRA (2007) citam que existem inúmeras pesquisas com foco em estudos de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos. O objetivo da remediação é a recuperação da qualidade dos solos e das águas subterrâneas destes locais aos níveis originais com a eliminação de fontes subterrâneas e dos riscos toxicológicos.

No entanto, a implantação de um sistema de remediação de uma área deve ser projetada e executada de forma cuidadosa conforme será visto na sequência deste trabalho. CAETANO *et al.* (2010) em seu estudo identificou e avaliou os aspectos e impactos ambientais associados a todo o processo de remediação utilizando método “pump and treat” e adsorção utilizando carvão ativado de uma área de posto de combustíveis contaminados por hidrocarbonetos. O resultado mostrou a existência de 99 aspectos e 149 impactos ambientais associados à atividade, sendo que destes 25 foram considerados significativos. Dentre os aspectos significativos destacam-se: incêndio e explosão, derramamento de óleo lubrificante, emissão de gases, geração de resíduos (carvão ativado e bairers).

Em função de problemas associados à remediação de áreas contaminadas por petróleo e o reconhecimento (da indústria, governo e sociedade) do perigo potencial a saúde humana e ao meio ambiente, da mistura química complexa formada por TPH, PCB's, PAH's, metais pesados e pesticidas, KHAN *et al.* (2004) demonstram a necessidade de desenvolvimento de tecnologias de remediação exequíveis, rápidas e aplicáveis as diversas variáveis de uma área contaminada por hidrocarbonetos.

Ainda conforme KHAN *et al.* (2004), de acordo com as condições da área a ser remediada, há a necessidade de implantação de uma associação de procedimentos de forma a tornar a remediação efetiva e eficaz. Comumente utiliza-se uma combinação de tecnologias de tratamento considerando aspectos biológicos, físicos e químicos.

TEIXEIRA (2007) cita que para tratamento e remoção de hidrocarbonetos de petróleo puro e dissolvidos na água subterrânea, existe uma variedade destes processos físico-químicos e biológicos. Para cada um destes tratamentos, de acordo com TEIXEIRA (2007) e MARIANO *et. al* (2007), há vantagens e desvantagens, como:

- **Tratamento físico** (por exemplo, aspersão de ar e adsorção em carvão ativado): separam os contaminantes do solo sem destruí-los ou modificá-los quimicamente, porém apresentam muitas limitações com destaque para o custo elevado. Também percebe-se uma eficiência de remoção de apenas 50% em função de que quando há percolação de hidrocarbonetos no solo, grande quantidade permanece sorvida na matriz;
- **Processos Biológicos**: uma metodologia promissora para remoção destes contaminantes, principalmente em função da simplicidade e eficiência de custo, quando comparados a outras alternativas;
- **Tratamento químico** (por exemplo, extração de vapores do solo – SVE, recuperação do produto livre, extração com solventes e extração multifásica): é um tratamento com alto custo e acarreta grande impacto na paisagem.

Para identificação e/ou definição de um sistema de remediação, conforme CHARBENEAU *et al.* (1992), devem ser analisados, primeiramente, três informações básicas: 1) LANÇAMENTO - a fonte de lançamento da contaminação ao meio ambiente; 2) MIGRAÇÃO - reconhecimento do potencial de transporte da contaminação desde o lançamento até o local de exposição a população; 3) EXPOSIÇÃO – refere-se a verificação dos prováveis contaminantes e possíveis conseqüências a saúde da população.

Posterior a estas primeiras informações, conforme a CETESB (2007), é essencial estabelecer a solução de remediação para a área contaminada identificada. No entanto, ainda antes de definir a tecnologia a ser utilizada, deve ser elaborado o que a CETESB chama de investigação para remediação. Esta objetiva oferecer subsídios para a concepção e detalhamento de um projeto de remediação, que seja tecnicamente adequado, legalmente cabível e economicamente viável, para cada situação de contaminação, visando prevenir danos presentes ou futuros ao meio ambiente, à saúde humana e segurança pública.

As informações necessárias para a investigação devem incluir, entre outras: a complementação e o refinamento das características geológicas e hidrogeológicas, geoquímicas e hidroquímicas da área de interesse; a identificação dos poluentes presentes, em termos de sua origem, tipos, propriedades físicas, químicas e biológicas

(peso molecular, toxicidade, solubilidade em água, pressão de vapor, etc.) e processos de transporte e imobilização ambiental (degradabilidade, persistência, bioacumulação, mobilidade). Todas estas informações possibilitarão uma previsão inicial da pluma de contaminação de solos e águas subterrâneas (CETESB, 2007).

Na sequência, para definição do tipo de sistema de remediação, também deve ser analisado, conforme CETESB (2007), a questão de que as áreas contaminadas apresentam um quadro muito variável no que se refere as concentrações e distribuição dos contaminantes na matriz do solo. Isto significa dizer que os contaminantes podem estar presentes da seguinte maneira:

- **Fase Livre:** quando existem altas concentrações do contaminante, ou ainda quando existe produto puro no subsolo;
- **Fase gasosa ou vapor:** quando o contaminante se apresenta como um gás, nas condições normais do meio ambiente, ou se encontra volatilizado;
- **Fase Adsorvida:** quando os contaminantes estão retidos nas partículas do solo por processos de adsorção, sobretudo em solos com alto teor de argila ou de matéria orgânica;
- **Fase Dissolvida:** quando o contaminante se encontrar dissolvido em meio aquoso.

Por fim, conforme MARIANO *et al.* (2007), somente após a avaliação e reconhecimento individual de cada caso e cada particularidade do local, define-se a tecnologia de remediação a ser utilizada.

Em termos de tecnologias de remediação de águas subterrâneas e solos, CHARBENEAU *et al.* (1992) descrevem que há duas classificações. O primeiro grupo visa o tratamento ou a contenção da contaminação no próprio local, ou seja, o contaminante não é removido para outro local para posterior tratamento. Esta tecnologia é denominada “in situ”, sendo os sistemas de biorremediação de solo e biorremediação de água subterrânea os mais usuais. Já o segundo grupo, consiste em retirada e transporte do contaminante para outro local para tratamento e/ou disposição. Os sistemas mais utilizados relacionados a este grupo são: sistema de bombeamento de água subterrânea, sistema de extração de vapor do solo e sistema de recuperação de fase livre (uso caixa separadora de água e óleo).

A CETESB (2007) menciona a classificação como “in situ” e “on site” ou “ex situ”, a qual é aceita em todo mundo pelas agências reguladoras e cortes de justiça. Tratamento “in situ” refere-se ao tratamento realizado sem retirada de água ou solo do local (por exemplo: extração de vapor, injeção de ar, bioventilação, tratamento térmico e biorremediação “in situ”, etc). O Método “ex situ” ocorre quando o solo e/ou a água subterrânea são removidos e tratados em um sistema em separado (tanques de reação contínua ou reatores de fluidificação, por exemplo); respectivamente na própria área (“on site”) ou em uma instalação situada em outro local (“off site”). Exemplos destes métodos são: biorremediação “ex situ”, remoção e redistribuição de solo, bombeamento e tratamento de águas subterrâneas, tratamento térmico, etc.

Conforme CHARBENEAU *et al.* (1992), dentre estes métodos de remediação, o sistema mais usual tem sido a aplicação de sistema de bombeamento com posterior utilização de tratamento por “air stripping”, adsorção por carvão ativado, tratamento biológico, entre outros. Em alguns casos, quando há presença de fase livre de produto, há necessidade de uso de caixa separadora de água e óleo. Posterior a este tratamento a água tratada deve voltar para o aquífero por injeção ou drenagem superficial. A Tabela 1 a seguir ilustra um resumo da classificação de remediação “in situ” e “ex situ”.

Tabela 1: Tecnologias de remediação de solos contaminados e água subterrânea

Tecnologias “in situ”	Tecnologias “ex situ”
Atenuação Natural Monitorada	Remoção e Redistribuição de solos
Biorremediação de solos e água subterrânea	Biorremediação de solos e água subterrânea
Extração de Vapor	Bombeamento e Tratamento (“Pump and Treat”)
Injeção de ar na zona saturada (“Ar Sparging”)	Tratamento Térmico
Bioventilação	Oxidação Química (Fenton, Peróxido de cálcio, Permanganatos, Persulfatos, Ozônio)
Tratamento Térmico (injeção de vapor, aquecimento por resistência elétrica, rádio frequência ou condução térmica)	Extração por solvente
Oxidação Química (Fenton, Peróxido de cálcio, Permanganatos, Persulfatos, Ozônio)	Fitorremediação
Fitorremediação	Adsorção
Contenção	Sistema de recuperação de fase livre
Barreiras Reativas	“Air Stripping”

Fonte: Modificado de CHARBENEAU *et al.* (1992).

A seguir uma descrição das tecnologias de remediação aplicadas a áreas contaminadas por hidrocarbonetos.

### **3.4.1 Atenuação Natural Monitorada**

Atenuação natural refere-se à remediação “in situ” onde processos físicos, químicos e/ou biológicos em condições favoráveis e sem intervenção humana reduz a massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentração dos contaminantes no solo e água subterrânea KHAN & HUSAIN (2003).

A CETESB (2007) de forma similar descreve que se refere a um processo de atenuação que ocorre naturalmente no solo dentro do contexto de remediação e monitoramento adequadamente controlado. O objetivo é a redução das concentrações dos contaminantes, toxicidade, massa e/ou volume até níveis adequados à proteção da saúde humana e ao meio ambiente, dentro de um período razoável.

Segundo a CETESB (2007) a atenuação natural deve ser sempre acompanhada e monitorada durante longos períodos, sendo que este processo está estabelecido como método de remediação apenas para alguns contaminantes, destacando-se o benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno. Os principais processos de atenuação que ocorrem naturalmente no solo são: biodegradação, dispersão, sorção, volatilização, diluição e mecanismos de degradação abiótica.

KHAN & HUSAIN (2003) também citam que o processo de atenuação natural inclui biodegradação, absorção, diluição e dispersão, sendo a biodegradação o processo dominante. MOREIRA & DOURADO (2007) confirmam, descrevendo que a degradação por microrganismos é um dos processos mais importantes na atenuação de contaminantes, especialmente compostos de fase líquida não aquosa (NAPL).

De acordo com a CETESB (2007), os parâmetros que devem ser avaliados para monitoramento de qualquer processo de atenuação natural são: oxigênio dissolvido, nitrito, nitrato nitrogênio, ferro total e dissolvido, sulfato e sulfeto, metano, dióxido de carbono, alcalinidade e pH.

O custo normalmente é significativamente mais baixo que o custo de outros métodos, é a maior vantagem da tecnologia. Como desvantagens podem ser citados: tempo de tratamento, presença de contaminantes resistentes a biodegradação, baixas taxas de dispersão no aquífero contaminado, falta de informações para o projeto e dados e resultados que comprovem a eficiência de remoção (CETESB, 2007).

Exatamente este alto custo associado a baixas eficiências de algumas técnicas de remediação faz com que, segundo KHAN & HUSAIN (2003), a atenuação natural monitorada seja uma alternativa. Segundo os autores, estudos recentes têm demonstrado que a bioremediação “in situ” (sendo este processo de atenuação natural o mais importante para remoção de hidrocarbonetos) é uma boa alternativa em relação à eficiência e o custo.

MOREIRA & DOURADO (2007) apresentaram um estudo comparativo entre perfis de GPR (Radar de Penetração de Solo) adquiridos em 1998 e 2003 em uma área contaminada por compostos de fase líquida leve não aquosa (LNAPL). Segundo os autores, se a degradação dos microrganismos for efetiva, o resultado é a geração de ácidos orgânicos que, sob elevadas concentrações ocasionam a dissolução de minerais presentes em subsuperfície onde se encontra a contaminação, com conseqüente liberação de íons. O aumento da quantidade de íons resulta no aumento da condutividade elétrica do meio. O princípio físico da técnica de GPR é a emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência e a propagação da onda é condicionada a frequência de sinal emitido e as propriedades elétricas do meio. Os resultados obtidos pelos pesquisadores indicam um aumento da condutividade elétrica do meio, a partir da atenuação acentuada do sinal GPR das seções de 2003, sendo o aumento associado à liberação de íons por dissolução de minerais, pelo ataque de ácidos orgânicos resultantes do processo de biodegradação. A técnica apresentou potencial para utilização como forma de monitoramento de remediação por atenuação natural.

KHAN & HUSAIN (2003) discutiram uma proposta de metodologia reconhecida (RBCA - Risk Based Corrective Actions) de monitoramento do risco para remediação por atenuação natural monitorada. A metodologia foi desenvolvida e utilizada para verificação da evolução de áreas contaminadas por vazamentos de tanques de combustíveis enterrados. As análises mostraram um alto risco no local de contaminação dos trabalhadores por benzeno e tolueno. Segundo o modelo, nos estágios



iniciais da contaminação há um substancial risco, no entanto após 15 anos de monitoramento, há diluição e degradação da pluma, sendo que o risco reduz para níveis aceitáveis. Resumidamente, o estudo concluiu que a atenuação natural pode ser usada como uma avaliação efetiva para remediação deste tipo de área, no entanto requer a implantação de um programa de monitoramento de forma a acompanhar a periculosidade do contaminante e controlar o risco da área. Este programa deve envolver sistemas de emergências, o qual tem que prever qualquer eventualidade.

### 3.4.2 Biorremediação

A biorremediação de hidrocarbonetos de petróleo foi estabelecida como tecnologia de remediação em 1972 quando Richard Raymond aplicou este método em uma área contaminada por gasolina em Ambler, Pennsylvania. O trabalho de Raymond demonstrou que a aplicação controlada de oxigênio e nutrientes poderiam reduzir substancialmente a contaminação por hidrocarbonetos. A partir desta primeira aplicação houve grandes evoluções no processo de biorremediação de hidrocarbonetos. Anteriormente os projetos de biorremediação em áreas contaminadas por gasolina duravam cinco anos e custava um milhão de dólares. Atualmente este mesmo processo leva, aproximadamente, dois anos e custa cem mil dólares. Esta melhora de eficiência se deu com o desenvolvimento do sistema de aeração, extração de vapor e “air sparging” (BROWN *et al.*, 1996).

Conforme CETESB (2007) a biorremediação pode ser aplicada “in situ” ou “ex situ” e está relacionada com a transformação ou destruição de contaminantes orgânicos por decomposição biológica. O contaminante funciona como fonte de carbono para os microrganismos, sendo necessário o fornecimento de nutrientes para a efetividade do processo. CHARBENEAU *et al.* (1992) descreve que o fator essencial do processo de biodegradação é a conversão de resíduos orgânicos em biomassa e dióxido de carbono, metano e sais inorgânicos.

CHARBENEAU *et al.* (1992) cita os fatores essenciais para que ocorra de forma adequada o processo de biodegradação ou biorremediação: 1) a condutividade

hidráulica do solo deve ser alta de forma a proporcionar o transporte e oxigênio através do aquífero; 2) os microrganismos devem estar presentes em número suficiente e tipos adequados para que ocorra a degradação dos contaminantes de interesse.

De acordo com a CETESB (2007) a biorremediação compreende duas técnicas: bioestimulação (ocorre quando o crescimento dos microrganismos naturais, autóctones ou indígenas da comunidade do local contaminado, é estimulado por práticas que incluem a introdução de: oxigênio, nutrientes, substâncias para correção do pH do meio e receptores de elétrons específicos para a degradação da contaminação) e bioaumentação (ocorre quando há insuficiência de microrganismos indígenas para biodegradação do contaminante em questão, mesmo após realizada a bioestimulação, sendo necessária a aplicação de microrganismos não indígenas - alóctones).

Nos casos de realização da técnica de bioaumentação, alguns fatores devem ser considerados, como por exemplo: realização de adequada caracterização da área e relação com a melhor tecnologia de remediação; o produto biotecnológico deverá estar avaliado e liberado pelo Órgão Ambiental Competente; garantia de que os microrganismos aplicados sejam específicos para aquele contaminante e/ou para aquele caso (CETESB, 2007).

BROWN *et al*, (1996) classifica o processo de biorremediação em quatro níveis baseados na intensidade de oxigênio e suprimento de nutrientes:

- Agressivo:
  - Agressividade e continuidade do suplemento de oxigênio;
  - Continuidade e frequência do suplemento de nutrientes;
  - Tempo de tratamento entre um e quatro anos;
  - Aplicação em áreas com alta concentração de contaminantes o que requeiram descontaminação rápida;
  - Efetivo para ambos, solo e água subterrânea;
  - Usado com tecnologias suplementares como: extração de vapor ou bombeamento e tratamento para acelerar e controlar a pluma.
- Intensidade Moderada (Bioventilação/Bioinjeção):
  - Inserção de ar na zona não saturada da contaminação / fio capilar;
  - Suplemento de oxigênio;
  - Sem aplicação de nutrientes;

- Tempo de remediação que varia de dois a dez anos.
- **Baixa intensidade / Passivo:**
  - Suplemento de oxigênio utilizando componentes de baixa reação como Peróxido de magnésio, por exemplo;
  - Sem aplicação de nutrientes;
  - Usado como controle de água subterrânea, usado em remediação com baixos níveis de pluma de contaminação;
  - Tempo de remediação que varia de dois a dez anos.
- **Intrínseco**
  - Usa os níveis de oxigênio e nutrientes do próprio ambiente sem adição;
  - Pode ser por processo aeróbio ou anaeróbio;
  - Efetivo no controle e mitigação de plumas dissolvidas;
  - O tempo de remediação varia conforme contaminação;
  - Mais efetivo em baixas concentrações.

A CETESB (2007) descreve como vantagens do método de biorremediação: baixo custo, se comparados a outras técnicas; capacidade dos microrganismos biodegradarem substâncias perigosas; eficiência de tratamento. Como desvantagens: dificuldade de aclimação dos microrganismos, limitação de escala para aplicação “in situ”, possibilidade de formação de subprodutos tóxicos e inibição por compostos competidores (MTBE - metil tercbutil éter - na presença de BTEX, por exemplo).

O estudo de MARIANO *et al.* (2007) monitorou o processo de biorremediação natural da água subterrânea contaminada por óleo diesel em um posto de gasolina no município de Santa Bárbara d’Oeste em São Paulo. A contaminação presente continha concentrações de BTEX e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HAP). O monitoramento da área foi realizado em um período de dois anos sendo analisados parâmetros físico-químicos, concentração de hidrocarbonetos e ensaios laboratoriais de biodegradação. As análises microbiológicas consistiram na contagem de bactérias heterotróficas totais, na verificação da presença de bactérias hidrocarbonoclasticas e no teste de biodegradabilidade utilizando o indicador redox DCPIP. Os resultados mostraram que a presença de microrganismos capazes de biodegradar hidrocarbonetos, a disponibilidade de oxigênio dissolvido e a diminuição da concentração de

hidrocarbonetos ao longo do sentido do fluxo da água subterrânea são indicativos de que está ocorrendo a biodegradação. No entanto, conforme os autores, a presença de hidrocarbonetos no solo representa uma fonte contínua de contaminação, o que justifica a necessidade de monitoramento a longo prazo.

Utilizando a biorremediação com injeção de nitrato, COSTA *et al.* (2009), estudou durante 32 anos a recuperação em campo de águas subterrâneas impactadas por gasolina com 25% de etanol. Por meio da análise da massa e da distribuição espacial dos compostos dissolvidos, os autores verificaram que a bioestimulação influenciou positivamente na biodegradação do etanol e do BTEX, evitou a formação de zonas altamente redutoras (90% dos valores foram superiores a +100 mV) e impediu o avanço das plumas de BTEX e etanol na área monitorada. Os resultados indicaram que a bioestimulação com nitrato é uma alternativa altamente eficiente para se remediarem águas subterrâneas impactadas por gasolina contendo etanol.

MIRANDA & PONTES (2011) estudaram a biodegradação de óleo lubrificante no solo, buscando comparar os processos de atenuação natural (sem adição de nutrientes) e de bioestimulação (com adição de nutrientes). Para realização da pesquisa, foram desenvolvidos sete respirômetros alternativos ao respirômetro de Bartha. Os experimentos realizados foram: 1) frasco de controle com solo sem adição de poluentes e sem adição de nutrientes; 2) Teste de atenuação natural utilizando solo com adição de poluente (30 % de óleo lubrificante) e sem adição de nutrientes; 3) Bioestimulação usando solo com adição de poluente (30 % de óleo lubrificante) e com adição de nutrientes (fósforo e nitrogênio). Os resultados mostraram que em 154 dias de monitoramento foi verificada produção de gás carbônico no solo sem e com adição de poluente, tendo-se observado a ocorrência de atenuação natural para o óleo lubrificante. Observou-se também uma eficiência de 49% na remoção de óleo lubrificante por atenuação natural e uma eficiência de 42% para a bioestimulação após 154 dias de biodegradação a 20°C.

### 3.4.3 Bioventilação

Bioventilação é um processo que se baseia primeiramente na oxigenação de subsuperfície e posteriormente estimulação da degradação dos contaminantes através de microrganismos indígenas (CUNHA *et al.*, 2004).

É uma técnica de remediação “in situ” aonde ocorre a 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 de ar (oxigênio) na zona não saturada através de poços de injeção ou extração (CETESB, 2007).

BROWN *et al.*, (1996) descreve que esta técnica:

- é utilizada para contaminações presentes na zona vadosa do solo (não saturada);
- geralmente não é realizada aplicação de nutrientes;
- é aplicada em áreas com contaminações em níveis moderadas;
- possui tempo de remediação de aproximadamente 2 a 10 anos.

Conforme a CETESB (2007), é eficiente em qualquer contaminante degradável em meio aeróbio, com destaque na efetividade de aplicação em áreas contaminadas por hidrocarbonetos, sendo recomendada em contaminações de diesel, compostos com peso molecular médio. A bioventilação não é efetiva onde as concentrações de contaminantes impedem a biodegradação em solos com baixa permeabilidade. As principais vantagens desta tecnologia de remediação são:

- utilização de equipamentos de fácil aquisição e instalação;
- minimização da extração de vapores, com redução dos custos de seu tratamento;
- pode ser implantando sem causar grande impacto na operação da área;
- atua em áreas de difícil acesso.

CUNHA *et al.* (2004) estudou a evolução da tecnologia de tratamento por bioventilação em uma área contaminada por etanol e gasolina no Rio de Janeiro Brasil. Cabe ressaltar que no Brasil a gasolina e o etanol são rotinariamente misturados. A contaminação e os efeitos do tratamento foram monitorados por métodos convencionais

de microbiologia, análises químicas e GPR (Radar de Penetração de Solo). Os resultados mostraram que: 1) ao comparar contaminação com etanol e gasolina e apenas gasolina, foi verificado indicativos da preferência pela degradação do etanol em relação aos compostos de BTEX; 2) a bioventilação se mostrou uma ferramenta importante na regeneração de solos contaminados por gasolina e etanol.

#### 3.4.4 Tratamento Térmico

O método de tratamento térmico para remediação de áreas contaminadas, conforme a CETESB (2007), consiste no aquecimento do solo, como o objetivo de promover a separação dos contaminantes orgânicos por volatilização ou destruição. Esta alternativa pode ser aplicada de duas maneiras:

- **Tratamento “in situ”:**
  - **Injeção de vapor:** o vapor é injetado no subsolo por meio de poços de injeção, aquecendo a área e mobilizando, evaporando ou destruindo os compostos químicos perigosos presentes, que são coletados nos poços de extração. No lugar de vapor também pode ser injetado ar quente ou água quente;
  - **Aquecimento por resistência elétrica:** o aquecimento ocorre por passagem de corrente elétrica, a partir de eletrodos que são introduzidos na área de tratamento. O calor da corrente elétrica converte a água contida no solo em vapor, o qual elimina os compostos químicos presentes, que são coletados por vácuo nos poços de extração. O solo deve permanecer úmido para garantir a passagem da corrente elétrica;
  - **Aquecimento por radio frequência:** envolve a instalação de uma antena que emite ondas hertzianas (ondas de rádio). As ondas hertzianas aquecem o solo e evaporam os compostos químicos voláteis presentes;

- **Aquecimento por condução térmica:** o calor é fornecido por meio de poços de aço (poços térmicos) ou por uma manta térmica que cobre a superfície do solo. A manta é usada onde a contaminação no solo é rasa, enquanto os poços de aço são usados para as contaminações mais profundas.
- **Tratamento “ex situ” “off site”:** neste método de tratamento ocorre a escavação do solo e o tratamento (desorção térmica) é realizado em instalações específicas. Estas instalações utilizam equipamentos como fornos, sistema de refrigeração e reumidificação de solos tratados, pós-queimadores de gases, entre outros.

Ainda conforme a CETESB (2007) o processo de tratamento térmico sugere alguns comentários:

- Possibilita eliminação rápida de muitos compostos químicos do solo a custos adequados, em muitos casos;
- É um dos poucos métodos capazes de eliminar fases livres não aquosas;
- No entanto, deve haver garantia da não emissão de gases tóxicos para a atmosfera.

### 3.4.5 Oxidação Química

A oxidação química (pode ser realizada “in situ” ou “ex situ”) é utilizada com o objetivo de modificar quimicamente, decompor, reduzir ou destruir a toxicidade de dos contaminantes através de mistura superficial ou injeção profunda de produtos químicos. Os princípios das reações são: oxidação, redução, polimerização ou precipitação (CETESB, 2007; SUTHERSAN & PAYNE, 2005).

A CETESB (2007) cita que a reação mais empregada é a oxidação. Estas podem ocorrer naturalmente no solo, ou aceleradas mediante a introdução de um agente oxidante. Os oxidantes transformam compostos químicos perigosos em compostos menos nocivos, como água e dióxido de carbono, podendo destruir muitos tipos de compostos químicos como combustíveis, solventes e pesticidas.

A oxidação química tem sua aplicação amplamente utilizada em remediações. Frequentemente aplicada para limpeza de contaminantes que não podem ser alcançados por outros métodos de remediação como, por exemplo, contaminações profundas em águas subterrâneas. Apresenta grandes vantagens em aplicação “in situ” devido a evitar os custos de remoção e transporte de solo (CETESB, 2007). Conforme SUTHERSAN & PAYNE (2005), em relação à biorremediação ou oxidação natural, a aplicação de oxidação química através de poços de injeção, por exemplo, possui a grande vantagem relacionada à alta velocidade de destruição dos contaminantes.

Segundo CETESB (2007) e SUTHERSAN & PAYNE (2005) para os processos de reações químicas por oxidação, os oxidantes mais utilizados são: peróxido de hidrogênio, permanganato (potássio e sódio), ozônio e persulfatos. Conforme a CETESB (2007), o peróxido de hidrogênio vinha sendo o agente mais empregado em função da disponibilidade em solução aquosa e pelo poder de reação. Recentemente este agente tem sido substituído ou empregado em conjunto com outros oxidantes como: peróxido de cálcio, permanganato de sódio e persulfato de sódio.

A seguir uma breve descrição a respeito de alguns processos de oxidação e agentes oxidantes que são utilizados para remediação de áreas contaminadas, conforme CETESB (2007):

- **Processo de Fenton:** reação de peróxido de hidrogênio e ferro, para gerar radicais hidroxila, altamente reativos. O ferro atua como um catalisador do processo, podendo estar naturalmente presente no solo, ou ser adicionado no processo;
- **Processos com Peróxido de Cálcio:** o peróxido de cálcio é um sólido insolúvel em água, aplicado na forma de pasta. Em pH baixo, o peróxido de cálcio rapidamente se decompõe em  $O_2$ , mas estando o pH entre 10-12 leva seis meses para se decompor em peróxido de hidrogênio e oxigênio, fato que pode ser aproveitado numa combinação de aumento de oxidação e bioremediação. Em pH 8, a produção de peróxido de hidrogênio a taxas controladas, a partir do peróxido de cálcio, se aproxima da máxima eficiência, promovendo as reações do sistema de Fenton modificado (que gera maior quantidade de radicais livres);



- **Processos com Permanganatos:** destacam-se o permanganato de potássio (fornecido na forma de cristais sólidos, o qual é dissolvido em água, na concentração desejada, no próprio local da aplicação) e o permanganato de sódio (fornecido na forma de líquido concentrado. Os permanganatos reagem prontamente com a matriz de solo orgânico, sendo esta uma limitação do emprego desse tipo de oxidante. Os outros oxidantes são pouco reativos com o solo. Os permanganatos também podem reagir com a água, mesmo que lentamente, resultando numa consumação do oxidante e formação do  $MnO_2$ ;
- **Processos com Persulfatos:** os sais de persulfato (persulfato de sódio e de potássio, por exemplo) quando dissolvidos em água se dissociam em íons persulfato ( $S_2O_8^{2-}$ ), os quais são oxidantes. Quando aquecidos (persulfatos ferventes), a ebulição do persulfato gera o radical livre sulfato ( $SO_4^-$ ), que é muito reativo e está sendo explorado para uso em remediação ambiental.
- **Processos com Ozônio / Peroxônio:** O ozônio é um forte oxidante, mas por ser gás, sua utilização pode ser difícil. O gás é gerado no próprio local de aplicação, por meio de geradores de ozônio. O ozônio pode ser aplicado em condições de pH elevado, para aumentar a taxa de degradação de alguns contaminantes, aumentando a formação do radicais livre hidroxila e o potencial de dissociação das formas iônicas. A destruição dos contaminantes orgânicos pode ocorrer pelo ataque direto do  $O_3$ , nas ligações insaturadas carbono-carbono da molécula do contaminante, e por meio da reação com os radicais livres hidroxilas.

A aplicação dos agentes oxidantes deve ser realizada após estudo detalhado do local (geologia, hidrogeologia, contaminantes, pluma, etc). O sucesso do tratamento está na maximização da dispersão e difusão do reagente através do solo, caso contrário, o tratamento ocorrerá apenas por caminhos preferenciais, sem atingir toda a massa de solos contaminados. Também deve ser previsto o controle do tratamento de forma a garantir a eficiência (CETESB, 2007). No entanto, ainda conforme o autor deve-se ter cuidados de aplicação devido à corrosividade e poder de explosividade de alguns oxidantes.

### 3.4.6 Fitorremediação

Segundo a CETESB (2007), fitorremediação é a tecnologia que utiliza diversas espécies de plantas para degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes no solo e/ou água subterrâneas. Pode ser utilizada combinada com outros processos de remediação como etapa de polimento, sendo que a limitação deste tratamento está relacionada à baixas/médias concentrações de contaminantes e poucas profundidades no subsolo.

Os processos de fitorremediação estão a seguir citados, de acordo com CETESB (2007):

- **Fitoextração e fitovolatilização:** refere-se a retirada e deslocamento dos contaminantes do solo para as raízes e porções superiores das plantas. Mais utilizada para extração de metais;
- **Fitoestabilização:** uso de plantas para imobilizar os contaminantes do solo por meio de sorção e precipitação na rizosfera (zona de influência das raízes);
- **Fitodegradação:** é a degradação de contaminantes orgânicos por meio da atividade microbiana mais intensa que ocorre na rizosfera;
- **Rizofiltração:** é a sorção ou precipitação de contaminantes que estão em solução ao redor das raízes, devido a processos bióticos ou abióticos. Primeiro a rizofiltração resulta na contenção do contaminante, onde este será imobilizado e acumulado dentro da planta. O processo final é a remoção integral da planta;
- **Contenção hidráulica:** é o uso de plantas e árvores para controlar o fluxo da água subterrânea em profundidades rasas;
- **Coberturas alternativas:** é o uso de vegetação em longo prazo, para cobertura vegetativa de áreas onde existiam resíduos em aterros, utilizando um mecanismo natural das plantas para minimizar a infiltração de água e consequente transporte dos contaminantes.

### 3.4.7 Contenção

A CETESB (2007) relaciona a técnica de contenção na criação de barreiras com o objetivo de evitar a liberação de poluentes, do solo para outros meios como o ar e as águas subterrâneas. Estas barreiras podem ser:

- **Físicas:** constituídas por camadas impermeabilizantes de argila ou outro material, empregadas nos casos em que não existe a possibilidade do contato entre o solo contaminado e o aquífero freático;
- **Hidráulicas:** utilizadas quando existe a possibilidade de contato do solo contaminado com o aquífero freático. Realiza-se o rebaixamento do nível do freático, pelo bombeamento das águas subterrâneas em poços estrategicamente localizados, ou através de trincheiras drenantes.

### 3.4.8 Barreiras Reativas Permeáveis

Consistem na passagem da água subterrânea contaminada através de uma barreira permeável instalada em subsuperfície transversalmente à ao sentido de escoamento interceptando essa pluma. Projetadas conforme critérios hidrogeológicos, podendo ser afuniladas em portais, tem sido muito utilizada em remediações de áreas contaminadas por: halocarbonos, metais passíveis de redução, metais totais, compostos orgânicos e hidrocarbonetos de petróleo (CETESB, 2007).

Ainda segundo o autor, estas barreiras possuem um composto específico, como por exemplo, o ferro de valência zero, para tratamento de halocarbonos, que tratam e removem o contaminante da água subterrânea. Além deste composto, os outros materiais mais comuns usados em PRB's são: metais reduzidos, pares de metais, calcário, agentes de sorção, agentes redutores e receptores biológicos de elétrons. O objetivo é que a água subterrânea saia da barreira com uma desejada concentração reduzida de contaminante, ou que o contaminante seja transformado em um composto não nocivo, ou ainda que ele seja completamente eliminado.

Como limitações, podem ser citadas: necessidade de uma grande área de implantação, velocidade da água subterrânea, concentração extremamente alta de contaminantes, prazo de remediação (CETESB, 2007).

### **3.4.9 Remoção e redistribuição de solos**

É umas das técnicas mais tradicionais e consagradas de remediação “ex situ”. Apesar de possibilitar a eliminação dos principais focos de contaminação na zona insaturada, deve ser realizada com cautela em função: 1) da exposição dos trabalhadores aos riscos de inalação de vapores e/ou materiais particulados; 2) transferência do passivo para outro local (CETESB, 2007).

Em relação aos custos, dependendo da quantidade de material a ser removido, esta alternativa pode se tornar a mais onerosa em função das despesas de transporte, tratamento e disposição final do solo. Em função de todos estes fatores, a adoção da técnica de remoção de solos se justifica nos casos de presença de resíduos perigosos, solos altamente contaminados ou em que uma análise mais criteriosa demonstre a impossibilidade de aplicação de outras técnicas, de maneira a se atingir as metas de remediação requeridas, no intervalo de tempo desejado (CETESB, 2007).

### **3.4.10 Bombeamento e Tratamento (“Pump and Treat”)**

Em muitos casos, devido à dificuldade e/ou impossibilidade de tratamento dos poluentes presentes nas águas no subsolo, a tecnologia de bombeamento e tratamento torna-se a melhor forma de remediação da área (EPA, 2001b).

Este sistema de tratamento é o mais comum método de remediação de água subterrânea do mundo. O princípio é o transporte, por meio de bomba e poços de extração, da água subterrânea para a superfície onde esta pode ser tratada com maior

facilidade. Também é bastante empregado para a contenção hidráulica de plumas de contaminação (EPA, 2001b; CETESB, 2007).

Conforme a CETESB (2007) consiste em posicionar geograficamente e estrategicamente poço(s) de sucção em uma pluma de contaminação para extração da água para posterior tratamento. Para tratamento utiliza-se tipicamente filtros, extração de compostos voláteis em torre de aeração (conhecido como “air stripping”) ou carvão ativado.

O posicionamento dos poços de sucção depende do objetivo pretendido. Quando o objetivo é eliminar o máximo possível de contaminantes, os poços são geralmente localizados imediatamente a jusante da fonte de contaminação ou no núcleo mais concentrado da pluma. Se a finalidade é conter a pluma os poços são localizados nos limites da pluma de contaminação (CETESB, 2007).

Conforme a EPA (2001b) o tempo de remediação é relativamente pequeno, em torno de 5 a 10 anos. Em relação a isto a CETESB (2007) cita que os custos do tratamento dependem do tempo de remediação já que, na maioria dos sistemas, as bombas funcionam 24 horas por dia 7 dias por semana.

A CETESB (2007) descreve que a principal vantagem de bombeamento e tratamento, além de ser muito eficiente para a remoção de grandes volumes de contaminantes do aquífero, está relacionado à eficiência na contenção da migração da pluma de contaminação e para certos objetivos específicos, como a criação de cones de depressão para auxiliar a remoção de fases livres leves não-aquosas (LNAPL's).

KHAN *et al.* (2004) cita algumas vantagens da implantação desta tecnologia. Entre estas:

- Facilidade de projeto e operação;
- Os equipamentos são de fácil avaliação;
- Pode ser utilizado em todos os tipos de remediação com contaminantes dissolvidos;
- Implementação é rápida.

Entre as limitações, conforme KHAN *et al.* (2004):

- Não aplicáveis para solos argilosos ou rochas fraturadas;
- Os custos dos projetos tendem a ser altos pelo tempo de remediação.

O trabalho de KIELING *et al.* (2010) mostrou que dos diferentes sistemas de remediação instalados em 10 postos de combustíveis em Porto Alegre no Rio Grande do Sul, a tecnologia “pump and treat” associada a extração de vapores do solo foi a que apresentou a melhor eficiência de remoção de BTEX e TPH.

A seguir são listados os tratamentos utilizados associados a tecnologia “pump and treat”.

#### 3.4.10.1 Extração de Vapor

Segundo a EPA (2001a) e CETESB (2007) a extração de vapores do solo (SVE) é um método de remediação “in situ” e objetiva eliminar substâncias químicas perigosas que aparecem em formas de vapor acima do lençol freático, através da aplicação de vácuo. Com a redução da pressão, um fluxo de ar é induzido na subsuperfície, volatilizando e eliminando os compostos orgânicos voláteis.

Juntamente com este processo de volatilização, o sistema de SVE remove alguns hidrocarbonetos por biodegradação, pois o fluxo de ar induzido fornece oxigênio para o sistema, o que promove a biodegradação aeróbia (CETESB, 2007).

A SVE e a aeração são um dos métodos mais rápidos de eliminação de contaminações que dependem de processos naturais para este fim. Em geral os poços e o equipamento são fáceis de instalar e manter, podendo alcançar maiores profundidades, sem necessitar retirada do solo local, do que outros métodos de remediação (EPA, 2001). Tanto o método de SVE quanto aeração funcionam melhor em solos pouco compactos, mais permeáveis, sendo o caso de solos arenosos ou siltosos (EPA, 2001a; CETESB, 2007).

Conforme CARBENEAU *et al.* (1992) e CETESB (2007), um sistema de SVE consiste de: um ou mais poços de extração localizados na área contaminada, um ou mais poços de injeção de ar (quando necessário), tubulações, bomba de vácuo, estação de tratamento de vapor e amostradores de gases.

#### 3.4.10.2 Extração por Solvente

A técnica de extração por solventes envolve a utilização de um solvente capaz de promover a dissolução de contaminantes pouco solúveis em água, presentes numa área contaminada. Utilizada com maior frequência “ex situ” envolvendo a remoção de solo a ser tratado em instalações específicas (CETESB, 2007).

Segundo a CETESB (2007) tem sido utilizada no tratamento de lodos ou sedimentos contaminados por óleos minerais, solventes halogenados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e pesticidas.

O processo envolve: mistura do solo com o solvente; extração do contaminante; secagem do solo e evaporação de solventes remanescentes; destilação para recuperação de solventes; disposição final do resíduo da recuperação do solvente (CETESB, 2007).

#### 3.4.10.3 Extração Multifásica (MPE)

Conforme EPA (1997a) o processo de MPE foi desenvolvido para a remediação de VOC's e outros contaminantes em formações subterrâneas de baixa a moderada permeabilidade. O processo é uma modificação do SVE convencional. Ao invés do sistema de sucção extrair somente ar e/ou somente água, na tecnologia de MPE há a extração simultânea dos vapores presentes no solo e na água subterrânea, ou seja, extração duas fases (TPE – “Two-Phase Extraction”). Esta pode ser realizada com baixo ou alto vácuo (DPE - Low or High Vacuum Dual-Phase extraction).

A Tabela 2 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens da utilização das tecnologias TPE (Extração duas fases), HVDPE (Extração duas fases com alto vácuo) e LVDPE (Extração duas fases com baixo vácuo).

Tabela 2: Vantagens e desvantagens das tecnologias TPE, HVDPE, LVDPE

	HVDPE e LVDPE	TPE
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sem limitação da profundidade de contaminação;</li> <li>- Perda de vácuo dentro do poço de extração</li> <li>- Sem limitação de taxa de produção de água subterrânea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acima de 98% de transferência de contaminantes da fase aquosa para fase de vapor;</li> <li>- Sem necessidade de bombas ou equipamentos mecânicos nos poços;</li> <li>- Pode ser aplicado em extração existente ou poços de monitoramento.</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se usado bombas de submersão, há necessidade de retenção de água acima da bomba;</li> <li>- Mais controles para bombas em relação ao TPE.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitado para nível de água subterrânea igual a 15,25m;</li> <li>- Limite máximo de taxa de fluxo de água subterrânea de 0,000315451 m<sup>3</sup>/s</li> <li>- Perda de vácuo devido a saída de água do poço</li> </ul>

Fonte: Modificado de EPA (1997a).

A conclusão do trabalho da EPA (1997a) é que a tecnologia de MPE, para solo ou água subterrânea e, se utilizado considerando as características apropriadas da área a ser remediada, é economicamente e tecnicamente efetiva. Segundo o autor, esta tecnologia é mais efetiva na remoção de VOC's do que os sistemas convencionais de tratamento "pump and treat" e extração de vapor (SVE).

#### 3.4.10.4 Injeção de ar na zona saturada ("Air Sparging")

Este método também é conhecido como "in situ air stripping" e "in situ volatilization". Consiste na injeção de ar comprimido, em volumes e pressões controlados, na água subterrânea, abaixo dos pontos mais profundos da contaminação. É mais efetivo quando há presença de contaminantes orgânicos facilmente biodegradáveis e/ou voláteis, em áreas como solos altamente permeáveis e aquíferos não confinados. Ocasionalmente, junto com o processo de "air sparging" utiliza-se o método de extração de vapores (SVE) para remoção dos contaminantes voláteis na zona vadosa, ou zona saturada (EPA, 1997b; CETESB, 2007).



Corroborando com isso, uma observação importante do desempenho do sistema de “air sparging” citada por KHAN *et al.* (2004) é que, em condições de muita heterogeneidade das condições geológicas (muitas camadas de solos com baixa permeabilidade), há redução da efetividade do sistema.

Conforme EPA (1997b) e CETESB (2007), o método de “air sparging” foi primeiramente utilizado na Alemanha em meados de 1980, sendo espalhado, no final desta década, para o restante da Europa e Estados Unidos. Porém, a tecnologia somente se tornou popular em remediação de áreas contaminadas a partir da segunda metade dos anos 90.

Durante a aplicação deste método, ocorrem de acordo com CETESB (2007), três processos de transferência de massa:

- extração “in situ” dos compostos orgânicos voláteis (VOC’s) dissolvidos;
- volatilização da contaminação em fase adsorvida abaixo do nível d’água;
- aumento da biodegradação dos contaminantes em fase adsorvida e dissolvida, em função do aumento dos níveis de oxigênio dissolvido.

O sistema é composto por um ou mais poços de injeção, compressor, válvulas de controle de bombeamento e medidores de pressão. O ar é injetado com volume e pressão controlados, geralmente determinados previamente, a partir da execução de um teste piloto no local de aplicação. A eficiência do método é medida usando sondas de monitoramento, posicionadas tanto na zona saturada como na zona não-saturada. As sondas são utilizadas para: 1) medir a extensão lateral da sobrelevação da água subterrânea; 2) verificar o aumento dos níveis de oxigênio dissolvido; verificação do potencial de oxi-redução; monitorar o aumento da pressão dentro do cone e a redução nas concentrações de compostos orgânicos voláteis (CETESB, 2007).

#### 3.4.10.5 Adsorção

Carvão ativado é um material utilizado para filtrar produtos químicos nocivos oriundos da contaminação de água e/ou ar. Quando a água ou ar poluído passam pelo sistema de filtro, ocorre o fenômeno de adsorção, ou seja, os contaminantes são aderidos

na superfície e no interior dos poros dos grânulos de carvão. Este processo de adsorção por carvão ativado está presente na maioria dos filtros de água da torneira e, frequentemente são utilizados como parte do sistema de tratamento de águas subterrâneas (EPA, 2001c).

Ainda conforme a EPA (2001c), o tempo de tratamento de águas subterrâneas promovido por sistema de adsorção por carvão ativado, pode levar de poucos dias até muitos anos, dependendo de uma série de fatores: 1) quantidade de poluente na água ou ar; 2) tipo e quantidade de produtos químicos nocivos presente; 3) tamanho e número de colunas e/ou filtros do sistema.

Os motivos de utilização de filtros de carvão ativado, conforme a EPA (2001c), podem ser em virtude de bons resultados obtidos na remoção em áreas contaminadas por combustíveis, PCB's, dioxinas, etc...; e custo baixo em relação aos demais sistemas de remediação. No entanto, o carvão ativado não destrói estes produtos químicos adsorvidos, gerando resíduos com características de classe I perigoso (conforme a ABNT, 2004), sendo necessário uma disposição final e/ou outra forma de tratamento.

CHAVES *et al.* (2009) cita que o problema do uso de carvão ativado como adsorvente refere-se ao custo de produto, sendo, em muitos casos, um empecilho de uso em escala industrial. Com isso, conforme os autores, há necessidade de estudos e alternativas de materiais adsorventes que cumpram esta função, levando em consideração a sustentabilidade do sistema.

Nesta busca por alternativas e avaliando outro contexto, vê-se uma grande demanda do desenvolvimento global, a evolução da indústria no mundo. Uma das consequências disto gira em torno de uma geração de resíduos sólidos cada vez maior e heterogênea, fazendo com que haja necessidades de destino e/ou tratamento destes resíduos. Em virtude da necessidade de alternativas para destino dos resíduos gerados, somada à crise energética mundial que leva à busca de fontes alternativas de energia renovável, surge à opção do aproveitamento destes como uma fonte de biomassa que pode ser utilizada na geração de energia térmica, sendo uma alternativa para substituir o abastecimento limitado dos combustíveis fósseis (KIELING, 2009).

Segundo KIELING (2009), devido a extensões territoriais e vocação agrícola, o Rio Grande do Sul, possui uma geração de resíduos agroindustriais elevada, resultante da colheita e processamento de alguns vegetais. Como destaque está a casca de arroz,

cuja produção na safra de 2008 foi superior a 7 milhões de toneladas. Em virtude do poder calorífico desta casca, esta biomassa vem sendo utilizada por empresas em substituição ao combustível, para queima em caldeiras e fornos usados no processo produtivo para geração de calor e vapor. Isto significa uma grande geração de uma cinza de casca de arroz (CCA) de difícil degradação, poucos nutrientes para uso no solo e contendo um alto teor de sílica. Embora, não sendo considerado resíduo perigoso, esta cinza representa um problema quanto à disposição final.

Uma das alternativas utilizadas mundialmente com a CCA que apresenta resultados importantes é a adsorção de metais pesados como tratamento de áreas degradadas por estes compostos. KIELING (2009) em sua dissertação cita alguns estudos abordando a adsorção de metais utilizando CCA após queima sem qualquer tipo de ativação da mesma, sendo também objeto de estudo da autora.

Percebe-se com todo este contexto que, o processo de tratamento por adsorção de hidrocarbonetos de sítios contaminados é muito conhecido e utilizado mundialmente, conforme já abordado nesta revisão da literatura. No entanto, para estes casos, utiliza-se o carvão ativado para a função de adsorção. Conforme citado por CHAVES *et al.* (2009) e verificado nos sistemas de remediação de postos combustíveis utilizados no Rio Grande do Sul, este produto possui um custo elevado o que pode acarretar em limitação do uso. Aliado a isto, deve ser considerado os impactos ambientais gerados pelo processo de ativação química do carvão.

Assim, para estas áreas contaminadas por BTEX e TPH, a alternativa do uso da CCA como adsorvente, sem a ativação, ou seja, utilização da cinza após a queima em industriais; é uma opção que se mostra, a partir dos estudos de adsorção de metais pesados, como potencial.

#### 3.4.10.6 Extração de Compostos Voláteis em torre de aeração (“Air Stripping”)

Conforme EPA (2001d), “air stripping” é um processo aonde o ar é forçado através dos poluentes da água subterrânea e/ou água superficial para remoção da contaminação. METCALF & EDDY (2003) descrevem que este processo envolve a

transferência de fases de um meio líquido para um meio gasoso. De acordo com EPA (2001d), este processo, em tratamento de águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos, é comumente utilizado em conjunto com a tecnologia de remediação “pump and treat”.

O funcionamento do sistema de “air stripping”, conforme explica a EPA (2001d), refere-se a um tanque composto por material de empacotamento (composto por plástico, metal ou cerâmica). O efluente contaminado entra no sistema por meio de bombeamento. Existe um sistema de injeção de ar que, juntamente com o material de empacotamento, promove a incorporação de ar no sistema e a ocorrência do processo de “air stripping”. O gás liberado é coletado na parte superior do tanque e, posteriormente, tratado com utilização de carvão ativado (EPA, 2001d).

Ainda conforme a EPA (2001d) o processo de “air stripping” é o melhor sistema para tratamento de água contaminada por produtos químicos que evaporam facilmente como é o caso de combustíveis e solventes. Quando projetado adequadamente, a estimativa é uma remoção de 99% destes contaminantes.

### 3.5 FUNDAMENTOS

As diversas tecnologias de remediação de áreas apresentadas anteriormente pressupõe a utilização de diversos conceitos reconhecidos do tratamento de efluentes, os quais embasam teoricamente o desenvolvimento destes equipamentos e sistemas atualmente empregados. No caso da pesquisa proposta por esta tese, para desenvolvimento do equipamento, foram utilizados os conceitos de: volatilização, aeração, gás “stripping”, volatilização e adsorção. Com isso, a seguir são abordados tópicos conceituais relacionados a estes temas, bem como resultados de pesquisas acadêmicas envolvendo este tipo de tratamento.

### 3.5.1 Solubilidade de gases em água

A quantidade de gases que podem estar presentes em uma solução é governada, segundo METCALF & EDDY (2003), pela: a) solubilidade do gás definida pela Lei de Henry; b) a pressão parcial do gás na atmosfera; c) a temperatura e d) a concentração de impurezas na água (por exemplo, salinidade, sólidos suspensos, etc...).

Nesta questão, cabe uma breve revisão quanto as teorias mencionadas anteriormente que são apresentadas por METCALF & EDDY (2003):

- **Lei do gás ideal:** deriva da Lei de Boyle (o volume do gás é inversamente proporcional a pressão sob temperatura constante) e Lei de Charles (o volume de gás é diretamente proporcional a temperatura sob pressão constante). A Lei do gás ideal é representada pela equação 1:

$$PV = nRT \quad \text{Equação 1}$$

Onde: P (pressão absoluta), V (volume ocupado pelo gás), n (moles do gás), R (constante), T (Temperatura).

- **Lei de Henry para os gases dissolvidos:** o equilíbrio ou saturação da concentração de gás dissolvido em um líquido é função do tipo de gás e da pressão parcial do gás em contato com este líquido (acima do líquido). A relação entre a fração molar do gás na atmosfera sobre o líquido e a fração molar do gás no líquido é dada pela equação 2:

$$p_g = \frac{H}{P_T} \times X_g \quad \text{Equação 2}$$

Onde:  $P_g$  (fração molar do gás no ar); H (Constante);  $P_T$  (pressão total);  $X_g$  (fração molar do gás em água).

### 3.5.2 Mecanismos da Transferência de gases

SPERLING (2006) descreve que há dois mecanismos básicos para a transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida: difusão molecular e difusão turbulenta.

A difusão molecular pode ser descrita como a tendência de qualquer substância de se espalhar uniformemente pelo espaço disponível (SPERLING, 2006). Inclui então:

- **Teoria do duplo filme:** princípio desta teoria refere-se à presença de duas fases (uma líquida e uma gasosa) na interface gás-líquido, que proporciona a maior resistência à passagem de moléculas de gás na fase de massa de gás para o líquido. Para gases com grande solubilidade na fase líquida (por exemplo, absorção de  $\text{SO}_2$  em água), a maior resistência está relacionada ao filme gasoso. Para gases de baixa solubilidade em fase líquida (por exemplo, absorção de oxigênio por uma água residual), a resistência limitante está no filme líquido;
- **Teoria da penetração:** esta teoria não assume filmes estagnados, mas sim elementos de fluido que são momentaneamente expostos à face gasosa na interface do líquido. Durante este tempo de exposição o gás difunde no elemento fluido, penetrando no líquido.

Já a difusão turbulenta, descrita por SPERLING (2006), que é gerado pela aeração mecânica, consiste em um movimento secundário complexo, que se superpõe ao movimento primário de translação da massa líquida. A turbulência é caracterizada por oscilações e turbilhonamentos, que transportam partículas de fluido de uma camada para a outra, com velocidade variáveis.

SPERLING (2006) cita que desde que o líquido esteja deficiente de um gás (oxigênio, por exemplo), há uma tendência natural do gás passar da fase gasosa, onde se encontra em quantidade satisfatória, para a fase líquida, onde está deficiente.

Conforme METCALF & EDDY (2003) a aplicação de transferência de oxigênio é mais comumente utilizada em sistemas biológicos de tratamento de esgotos, devido a baixa solubilidade de oxigênio e, conseqüentemente, baixa quantidade de transferência de oxigênio através de interface normal água - ar atmosférico.

Analisando o mecanismo de transferência de gases e em relação ao equilíbrio da concentração de saturação do gás na fase líquido, SPERLING (2006) cita que as velocidades de absorção ( $v_g$ ) e de liberação ( $v_l$ ) do gás são iguais. Além disso, as concentrações de saturação nas duas fases são proporcionais a estas velocidades. Considerando um coeficiente de distribuição (que depende da natureza do gás e do líquido, e da temperatura), a concentração de saturação é diretamente proporcional à concentração na fase gasosa, conforme demonstra a equação 3 a seguir.

$$C_s = k_D \times C_g \quad \text{Equação 3}$$

Onde:  $C_s$  (concentração do gás na fase gasosa em mg/L);  $K_D$  (coeficiente de distribuição) e  $C_g$  (concentração do gás na fase líquida em mg/L). A concentração  $C_g$  pode ser obtida utilizando a equação 1 anteriormente apresentada.

Quanto maior a temperatura, menor a solubilidade do gás no meio. A maior agitação das moléculas na água faz com que os gases tendam a passar para a fase gasosa. Como exemplo, cita-se que para temperatura 0°C o  $K_D$  estimado é de 0,0493; enquanto para temperatura igual a 30°C o coeficiente é 0,0296 (SPERLING, 2006).

SPERLING (2006) ainda finaliza demonstrando a associação entre as equações 1 e 3; a qual estabelece a concentração de saturação de um gás na água, em função da temperatura e pressão (Equação 4).

$$C_s = k_D \times d_v \times (P_a - P_v) \times \frac{PM}{R \times T} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:  $C_s$  (concentração do gás na fase gasosa em mg/L);  $K_D$  (coeficiente de distribuição);  $d_v$  (distribuição volumétrica do oxigênio no ar atmosférico – 21% do ar);  $PM$  (peso molecular do oxigênio – 32 g/mol);  $P_a$  (pressão atmosférica – 101.325 Pa nas CNTP);  $P_v$  (pressão de vapor da água).

IMHOFF & IMHOFF (1986) confirmam que a introdução de ar na massa líquida traz benefício para os esgotos. Porém relatam a simples aeração tem um efeito limitado. Isto ocorre em virtude de que a água só pode dissolver o oxigênio do ar até o ponto de saturação, que se situa em torno de 10 mg/L. Esta saturação depende da temperatura (Tabela 3) e, em menos grau, da pressão atmosférica.

Tabela 3: Limites de saturação de oxigênio dissolvido em função da temperatura.

Classificação da água	Limites de saturação de oxigênio dissolvido (mg/L)						
	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
Água Doce	14,6	12,8	11,3	10,2	9,2	8,4	7,6
Água do mar	11,3	10,0	9,0	8,1	7,4	6,7	6,1

Fonte: IMHOFF & IMHOFF (1986)

Com a Tabela 3, percebe-se, uma redução do limite de saturação em virtude do aumento de temperatura. Em uma comparação entre as temperaturas de 0°C até 30°C há, praticamente, o dobro de limite de saturação para 0°C.

Ainda conforme os autores:

“O *déficit de oxigênio* é a quantidade de oxigênio em miligramas por litros para se ter saturação a uma certa temperatura. Quanto maior for o déficit tanto maior será a avides da água pelo oxigênio, e tanto mais rapidamente esta absorverá o oxigênio do ar” (IMHOFF & IMHOFF, 1986; página 28).

Assim, associando a equação 4 e os conceitos apresentados por IMHOFF & IMHOFF (1986), SPERLING (2006) propõe a Tabela 4.

Tabela 4: Limites de saturação de oxigênio dissolvido (em mg/L) para água limpa.

Temperatura do líquido (°C)	Altitude (m)			
	0	500	1000	1500
10	11,3	10,7	10,1	9,5
15	10,2	9,7	9,1	8,6
20	9,2	8,7	8,2	7,7
25	8,4	8,0	7,5	7,1
30	7,6	7,2	6,8	6,4

Fonte: Adaptado de SPERLING (2006)



No entanto SPERLING (2006) relata que o oxigênio é um gás que se dissolve mal no meio líquido. Com isso, conforme METCALF & EDDY (2003) e SPERLING (2006), há necessidade de adição de suplemento de oxigênio no meio. Este pode ser introduzido através de bolhas de ar ou oxigênio puro criando uma interface adicional gás-água. Uma forma é a utilização de misturadores, aonde as bolhas são introduzidas pelo centro de uma turbina. Estes equipamentos atuam na mistura do líquido e no transporte do ar atmosférico para dentro do sistema, o qual ingressa na água por meio de microbolhas. A análise de Oxigênio Dissolvido (OD) é o método aceito de determinação do coeficiente de transferência de oxigênio.

### 3.5.3 Sistemas de aeração

A taxa de transferência de oxigênio do equipamento de aeração depende das condições de operação. Isto, conforme SPERLING (2006) depende dos seguintes fatores:

- **Temperatura:** a elevação da temperatura causa uma redução da concentração de saturação e redução da taxa de transferência. No entanto, esta elevação concomitantemente, também provoca um aumento do coeficiente de transferência de massa e aumento de taxa de transferência;
- **Oxigênio dissolvido:** em condições estacionárias, quanto maior a concentração de oxigênio dissolvido mantida no reator, menor será a taxa de transferência de oxigênio;
- **Características do efluente e do reator:** a presença de sais, matéria particulada e agentes tensoativos altera a concentração de saturação do líquido no reator. Além disso, estas características, bem como, a geometria e o grau de agitação influencia o coeficiente de transferência.

A eficiência de oxigenação (a qual retrata a taxa de transferência de oxigênio por unidade de potência consumida) é determinada, por SPERLING (2006), conforme a equação 5.

$$EO = \frac{TTO_{padr\tilde{a}o}}{P} \quad \text{Equa\~{c}\~{a}o 5}$$

Onde: EO (efici\~{e}ncia de oxigena\~{c}\~{a}o em kgO<sub>2</sub>/kWh); TTO<sub>padr\~{a}o</sub> (taxa de transfer\~{e}ncia de oxig\~{e}nio padr\~{a}o em kgO<sub>2</sub>/h); P (potencia consumida).

A efici\~{e}ncia de oxigena\~{c}\~{a}o pode ser obtida empiricamente, no entanto, METCALF & EDDY (2003) e SPERLING (2006) apresentam valores t\~{i}picos desta vari\~{a}vel conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 5: Valores t\~{i}picos de efici\~{e}ncia de oxigena\~{c}\~{a}o

Sistema de aera\~{c}\~{a}o	Tipo	EO (kgO <sub>2</sub> /kWh)
Aera\~{c}\~{a}o mec\~{a}nica	Baixa rota\~{c}\~{a}o fluxo radial	1,5 – 2,2
	Alta rota\~{c}\~{a}o fluxo axial	1,2 – 2,0
	Rotor de eixo horizontal	1,2 – 2,0
Aera\~{c}\~{a}o por ar difuso	Bolhas finas	1,2 – 2,0
	Bolhas m\~{e}dias	1,0 – 1,6
	Bolhas grossas	0,6 – 1,2
	Aeradores por aspira\~{c}\~{a}o	1,2 – 1,5

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (2003) e SPERLING (2006)

RAMALHO (1993) descreve que a transfer\~{e}ncia de oxig\~{e}nio dos aeradores ocorre por: a) Mecanismo de turbul\~{e}ncia (transfer\~{e}ncia na superf\~{i}cie turbulenta de um l\~{i}quido); b) Mecanismo de dispers\~{a}o (transfer\~{e}ncia das gotas dispersas na l\~{a}mina de \~{a}gua). Com isso, percebe-se que h\~{a} duas formas principais de se produzir a aera\~{c}\~{a}o artificial, de acordo com SPERLING (2006): introdu\~{c}\~{a}o de ar ou oxig\~{e}nio no l\~{i}quido (aera\~{c}\~{a}o por ar difuso) e/ou causar um grande turbilhonamento, expondo o l\~{i}quido, na forma de got\~{i}culas, ao ar, e ocasionando a entrada do ar atmosf\~{e}rico no meio l\~{i}quido (aera\~{c}\~{a}o superficial ou mec\~{a}nica).

METCALF & EDDY (2003), descrevem os tipos de sistemas de aera\~{c}\~{a}o aplic\~{a}veis ao tratamento de efluentes. A Tabela 6 apresenta esta varia\~{c}\~{a}o.

Tabela 6: Tipos de sistemas de aeração aplicáveis no tratamento de efluentes

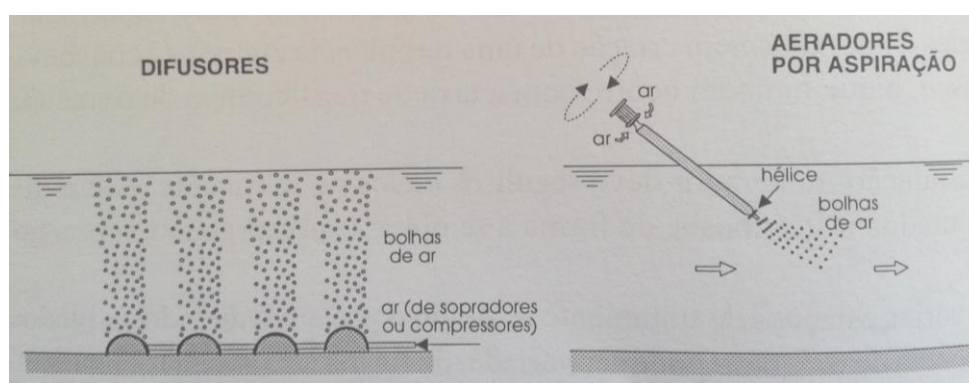
Classificação	Descrição	Uso ou Aplicação
<b>Submerso</b>		
Ar difuso: sistema de bolhas finas ou poros finos.	Bolhas geradas com dispositivo cerâmico, plástico ou por membranas flexíveis.	Todos os tipos de processos com lodos ativados.
Ar difuso: Sistema de bolhas grosseiras.	Bolhas geradas com orifícios, injetores e esguichos.	Todos os tipos de processos com lodos ativados, tanques de areia aerados e digestão aeróbia.
Turbina de aspersão	Turbinas de velocidade lenta e compressor para injeção de ar.	Todos os tipos de processos com lodos ativados e digestão aeróbia.
Tubo misturador estático	Pequenos tubos com chicanas internas projetadas para cisalhar o ar e provocar uma mistura com o líquido.	Lagoas aeradas e processo de lodos ativados.
Jato	Ar comprimido injetado líquido por bombeamento sob pressão através de dispositivo de jato.	Todos os tipos de processos com lodos ativados, tanque de aeração e aeração.
<b>Superficial</b>		
Aerador com turbina de velocidade lenta	Turbinas de grandes diâmetros usada para expor as gotículas de água para a atmosfera.	Processo de lodos ativados convencional, lagoas aeradas e digestão aeróbia.
Aerador flutuante de alta velocidade	Hélices de pequenos diâmetros usados para expor as gotículas de água para a atmosfera.	Lagoas aeradas e digestão aeróbia.
Aspirando	Conjunto de hélice inclinado	Lagoas aeradas
Conjunto rotor-escova ou disco-rotativo.	Lâminas ou discos montados em um eixo horizontal central que são rotacionados através do líquido.	Vala de oxidação, canais de aeração e lagoas aeradas.
Cascata	Passagem de esgotos ao longo de uma série de degraus.	Pós-aeração

Fonte: METCALF & EDDY (2003)

Em relação aos sistemas de aeração, embora SPERLING (2006) classifique de forma um pouco diferente em comparação a METCALF & EDDY (2003), as descrições de funcionalidades apresentadas são similares.

Cabe, neste ponto, uma ampliação em relação aos sistemas de aeração por ar difuso. A Figura 7 apresenta um esquema da aeração por difusores porosos e aeração por aspiração. Conforme SPERLING (2006):

“Os aeradores por aspiração possuem uma hélice na extremidade inferior (imersa no líquido), a qual, ao girar, cria uma subpressão, succionando o ar atmosférico de uma ranhura situada na parte superior (fora do líquido). O ar é difundido no meio líquido na forma de pequenas bolhas, responsáveis pela oxigenação e mistura da massa líquida. Os aeradores por aspiração são apresentados em alguns textos como aeradores mecânicos, por terem motores rodando fora do líquido, e em outros como aeradores por ar difuso, por gerarem bolhas de ar no meio líquido.” (SPERLING, 2006; página 202).



**Figura 7: Aeração por ar difuso**

**Fonte: SPERLING (2006)**

De acordo com SPERLING (2006), em geral, quanto menor o tamanho da bolha de ar, maior a área superficial disponível para a transferência de gases, ou seja, maior a eficiência de oxigenação.

#### **3.5.4 Remoção de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) por aeração**

De acordo com METCALF & EDDY (2003), os principais mecanismos utilizados para remoção de compostos orgânicos voláteis são a volatilização e o gás “stripping”.

### a) Volatilização:

A liberação de VOCs provenientes das superfícies de efluentes para a atmosfera é denominado volatilização. Isto ocorre devido a divisão entre a fase gás e água até a ocorrência de uma concentração de equilíbrio. A transferência ótima da concentração constituinte entre cada fase ocorre quando a concentração de uma das fases está mais distante do equilíbrio. Como a concentração de VOCs na atmosfera é extremamente baixa, a transferência destes compostos geralmente ocorre do efluente para a atmosfera (METCALF & EDDY, 2003).

YONG & MULLIGAN (2004) descrevem que a volatilização é um importante processo de atenuação para contaminantes orgânicos voláteis presentes na água subterrânea. O processo pode ocorrer em fase livre ou dissolvida. A razão de volatilização depende da constante da Lei de Henry, temperatura, umidade de solo, profundidade da contaminação, sorção, porosidade e tipo de solo. Os autores apresentam uma compilação da constante da Lei de Henry para hidrocarbonetos. A Tabela 7 demonstra a constante para BTEX.

Tabela 7: Constantes da Lei de Henry para BTEX

Parâmetro	Constante de Henry (mol/L.atm)
Benzeno	0,22
Tolueno	0,26
Etilbenzeno	0,32
Xileno	0,29

Fonte: Adaptado de YONG & MULLIGAN (2004)

### b) Gás “stripping”:

O processo ocorre quando o gás (geralmente ar) é arrastado temporariamente do efluente ou é introduzido proposadamente de forma a alcançar o objetivo do tratamento. Quando este gás (por exemplo: ar) é introduzido dentro do efluente, os

VOCs são transferidos do efluente para o gás. No tratamento de efluentes, este processo, ocorre mais comumente em tanques de areia aerado, processo de tratamento biológico aerado e canais de transferência aerados (METCALF & EDDY, 2003).

De acordo com LEITE *et al.* (2009) o componente transferido é denominado soluto e os demais são denominados inertes. Portanto, no “stripping”, somente o soluto deverá ser transferido da fase líquida para a fase gasosa.

### 3.5.5 Adsorção

RAMALHO (1993) conceitua adsorção como a concentração de um soluto em uma superfície de um sólido. Este fenômeno ocorre quando se coloca tal superfície em contato com uma solução. Uma camada de moléculas de soluto se acumula na superfície do sólido devido ao desequilíbrio das forças superficiais.

O sólido (por exemplo, carvão ativado) se denomina adsorvente e o soluto se denomina adsorbato. A capacidade de adsorção é função da superfície total de adsorção, e quanto maior esta superfície, maior o número de forças residuais desequilibradas para a adsorção (RAMALHO, 1993).

Os compostos permanecem adsorvidos na superfície do adsorvente pela ação de diversos tipos de forças químicas, como ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo e forças de Van der Waals. Uma das mais importantes características de um adsorvente é a quantidade de substância que pode ser retida na superfície do mesmo (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

Os mesmo autores ainda relatam que diversos parâmetros podem ser usados para descrever a capacidade adsorptiva de um adsorvente, tais como: a) número de Melaço ou Índice de Descoloração (está relacionada a capacidade do adsorvente em adsorver moléculas de grande massa molar); b) Índice de Fenol (expressa em quantidade de adsorvente – mg – necessário para diminuir a quantidade de fenol de 100 para 10 mg em solução aquosa); c) Índice Azul de Metileno (o IAM fornece uma indicação da capacidade do adsorvente em adsorver moléculas com dimensões similares à do azul de metileno e está relacionado a área superficial dos poros maiores que 1,5mm; é expresso

em mg AM por g de adsorvente); d) Número de Iodo (expressa a quantidade de iodo que é adsorvida pelo adsorvente sob condições específicas e geralmente está relacionado com a adsorção de moléculas de pequena massa molecular; é geralmente expresso em mg de iodo por g de adsorvente).

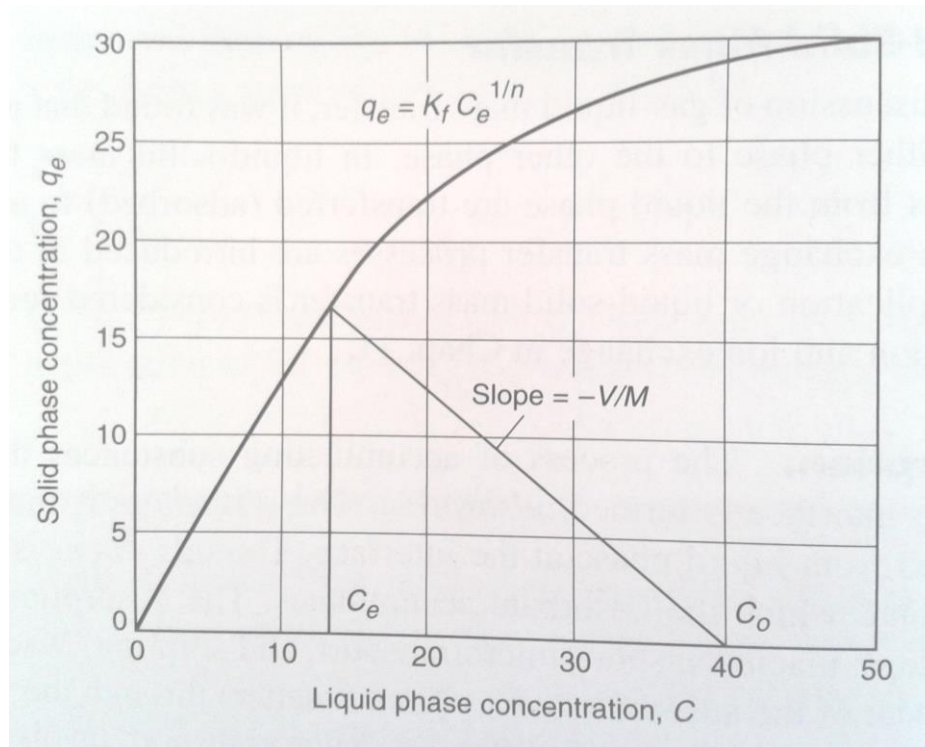
Contudo, os capítulos de livros que abordam o termo adsorção do DI BERNARDO & DANTAS (2005); RAMALHO (1993); PAYNE *et. al* (2008), descrevem que as relações de equilíbrio entre o adsorvente e adsorbato são descritas mediante as isotermas de adsorção. Entre estes modelos matemáticos, RAMALHO (1993) apresenta: Isoterma de Langmuir, Isoterma de Freundlich e Isoterma de adsorção BET. No entanto, conforme PAYNE *et. al* (2008), para remediações hidrogeológicas as duas primeiras são mais utilizadas.

#### a) Isoterma de Freundlich:

Equação empírica e muito utilizada, pois descreve com muita precisão os dados de ensaios de adsorção (Figura 8). Conforme DI BERNARDO & DANTAS (2005); RAMALHO (1993); PAYNE *et. al* (2008); METCALF & EDDY (2003):

$$q_e = \frac{X}{M} = k \times C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: X (peso do soluto adsorvido - adsorvato - em mg ou moles); M (peso do adsorvente - em g);  $C_e$  (concentração de equilíbrio do soluto/adsorvato em mg/L); k (coeficiente a serem determinado empiricamente – relacionado a capacidade de adsorção do adsorvato pelo adsorvente); n (coeficiente a serem determinado empiricamente – depende das características da adsorção).



**Figura 8: Típica Isotherma de Adsorção de Freundlich**

Fonte: METCALF & EDDY (2003)

#### b) Isotherma de Langmuir:

Supõe-se que o soluto se adsorve como um filme monomolecular na superfície do adsorvente (Figura 9). Conforme RAMALHO (1993); PAYNE *et. al* (2008):

$$\frac{X}{M} = \frac{K \times b \times C_e}{(1 + (K \times C_e))} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: X (peso do soluto adsorvido - adsorvato - em mg ou moles); M (peso do adsorvente - em g);  $C_e$  (concentração de equilíbrio do soluto/adsorvato em mg/L); K (constante de equilíbrio -  $\text{cm}^3$  de adsorvente / mg de adsorbato); b (constante - mg de adsorbato / g de adsorvente).



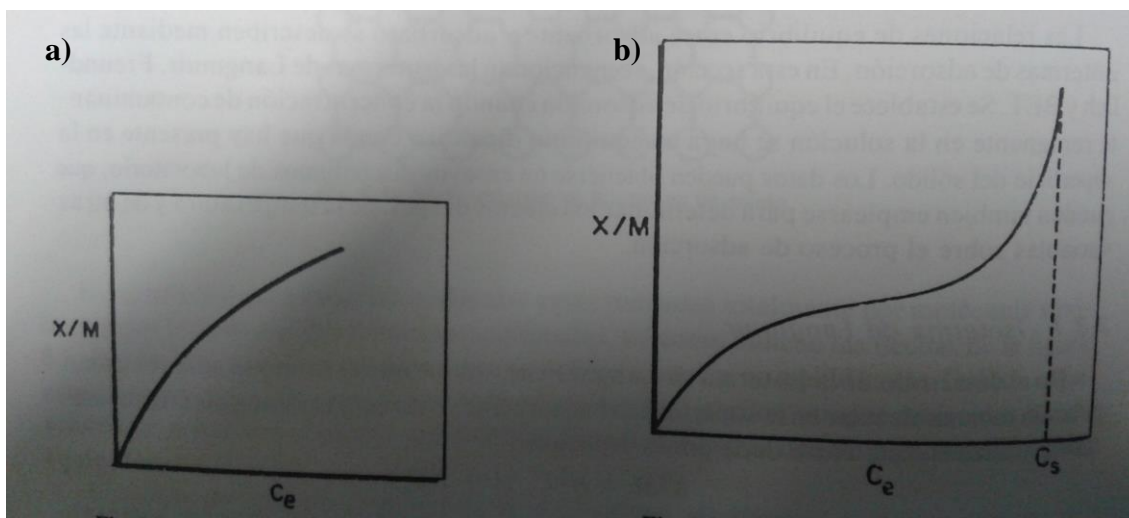


Figura 9: Típica Isotherma de Adsorção de Langmuir(a) e BET(b)

Fonte: Adaptado de RAMALHO (1993)

### c) Isotherma de Adsorção BET:

RAMALHO (1993) cita que no modelo BET (Figura 9) as camadas das moléculas se adsorvem na parte superior da molécula previamente adsorvida. A equação 8 apresenta o modelo matemático desta isoterma.

$$\frac{X}{M} = \frac{b \times k \times C_e}{(C_s - C_e) \times \left[ 1 + (k - 1) \times \left( \frac{C_e}{C_s} \right) \right]} \quad \text{Equação 8}$$

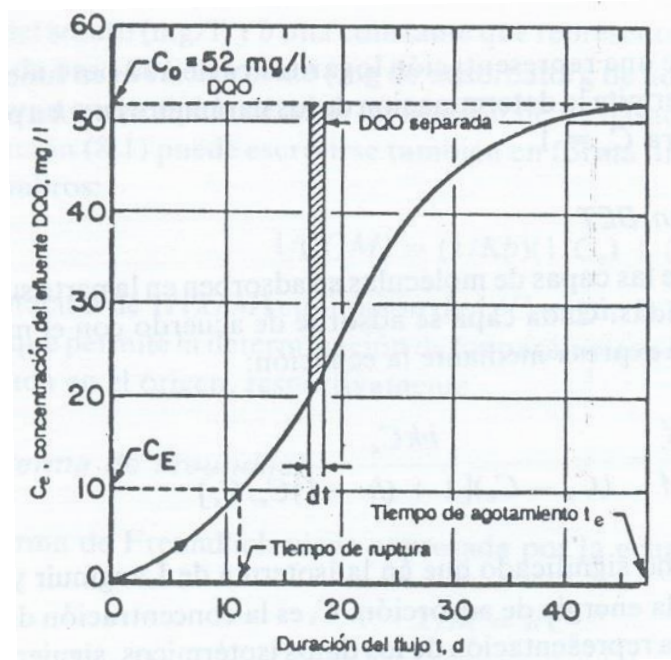
Onde: X (peso do soluto adsorvido - adsorvato - em mg ou moles); M (peso do adsorvente - em g);  $C_e$  (concentração de equilíbrio do soluto/adsorvato em mg/L);  $C_s$  (concentração de soluto até saturação em todas as camadas); k (constante relacionada com a energia de adsorção); b (constante - mg de adsorvato / g de adsorvente).

Os principais tipos de adsorventes incluem carvão ativado, polímeros sintéticos e adsorventes a base de sílica. Entre os adsorventes, o carvão ativado é o mais utilizado em tratamento de efluentes (METCALF & EDDY, 2003).

Segundo METCALF & EDDY (2003), o processo de adsorção envolve 4 etapas:

- **Transporte da massa de solução:** envolve o movimento do material orgânico para ser adsorvido, através da massa líquida para o filme existente na borda do adsorvente, que ocorre tipicamente por advecção e dispersão nos contactores de carbono;
- **Transporte do filme por difusão:** envolve o transporte do filme, por difusão, do material orgânico através filme líquido para a entrada dos poros do adsorvente;
- **Transporte dos poros:** envolve o transporte do material para ser adsorvido através dos poros por uma combinação de difusão molecular através do líquido no poro e/ou por difusão ao longo da superfície do adsorvente;
- **Adsorção:** envolve a aderência do material para ser adsorvido pelo adsorvente.

Conforme RAMALHO (1993), quando a água residual flui através de uma coluna de carvão ativado, por exemplo, os contaminantes se separam gradualmente e o efluente vai se purificando progressivamente. Forma-se uma zona de transição na qual a concentração de contaminante varia desde um máximo (final da zona) até praticamente zero (na parte inicial da mesma). Esta zona é a porção ativa da coluna e se denomina zona de adsorção. O movimento progressivo da zona de adsorção pode ser vista a partir da representação das chamadas curvas de ruptura. As ordenadas de uma curva de ruptura representam a concentração do efluente enquanto as abscissas correspondem à duração do fluxo através da coluna (Figura 10). Normalmente, a operação de uma coluna de adsorção não leva até seu esgotamento. Pode-se decidir parar a operação quando a concentração do efluente alcança um valor  $C_e$  (concentração de ruptura).



**Figura 10: Curva típica de ruptura para adsorção por carvão ativado**

**Fonte: Adaptado de RAMALHO (1993)**

### 3.6 ESTUDOS ACERCA DE APLICAÇÕES DE TRATAMENTO

São diversos trabalhos apresentados na literatura abordando o tema remediação de águas subterrâneas contaminados por hidrocarbonetos. A seguir são apresentados alguns resultados do monitoramento destas áreas contaminadas utilizando as diferentes tecnologias de tratamento já apresentadas por esta tese (Tabela 8).

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

<b>Autor</b>	<b>Escala</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Parâmetros avaliados</b>	<b>Tipo de Tratamento</b>	<b>Resultados</b>
SMITH <i>et al.</i> (1996)	Laboratório	Tanque composto por: solo, tubo de injeção de contaminantes e sucção, boba de vácuo.	Concentração de vapor de Tolueno (mg/L) - cromatografia	Extração de Vapor (SVE) utilizando bomba de vácuo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Média de concentração de vapor inicial = 4,5 – 5,0 mg/L</li> <li>• Decréscimo = aproximadamente 100%</li> <li>• Tempo de monitoramento = 650 min.</li> </ul>
ODENCRANTZ <i>et al.</i> (1996)	Escala Real	Utilizou peróxido de magnésio como suplemento de oxigênio, inserido perpendicularmente a direção do fluxo de água subterrânea em uma área contaminada por BTEX em Belen, Novo México (Tempo de monitoramento de 93 dias)	BTEX	Injeção de oxigênio e oxidação avançada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O acréscimo do oxigênio dissolvido na contaminação tem um impacto significativo na fase dissolvida da pluma de BTEX;</li> <li>• Noventa e três dias de monitoramento houve considerável decréscimo da pluma de BTEX presente na área.</li> </ul>
EPA (1997b)	USA - Conservancy	Monitoramento de área contaminada devido a gasolina – tempo de remediação igual a 5 meses	Benzeno	“Air sparging”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração inicial de Benzeno: 3 – 6 mg/L;</li> <li>• Remoção de benzeno = 59%.</li> </ul>
	USA - Arenal	Monitoramento de área contaminada devido a	Benzeno	“Air sparging”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração inicial de Benzeno: &gt; 30 mg/L;</li> <li>• Concentração final de Benzeno: &lt; 5 mg/L.</li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
		gasolina – tempo de remediação igual a 10 meses			
	USA - Firehouse	Monitoramento de área contaminada devido a combustíveis – tempo de remediação igual a 30 meses	Benzeno	“Air sparging”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração inicial de Benzeno: 400 – 600 mg/L;</li> <li>• Concentração final de Benzeno: 0,5 – 4,0 mg/L.</li> </ul>
	USA - Gasoline Service Station	Monitoramento de área contaminada devido a gasolina – tempo de remediação igual a 3 meses	BTEX	“Air sparging”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração inicial de BTEX: 21 mg/L;</li> <li>• Concentração final de BTEX: &lt;1 mg/L.</li> </ul>
	USA - Gasoline Service Station	Monitoramento de área contaminada devido a gasolina – tempo de remediação igual a 24 meses	BTEX	“Air sparging”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração inicial de BTEX: 6 - 24 mg/L;</li> <li>• Concentração final de BTEX: 0,380 – 7,6 mg/L.</li> </ul>
BASS <i>et al.</i> (2000)	Escala Real (Estados Unidos) – 44 áreas com o sistema “air sparging” instalado, sendo que destes 36 eram áreas contaminadas com	Levantamento de dados de 49 estudos de caso que aplicaram “air sparging” para remediação de áreas degradadas.	BTEX e TPH	“Air Sparging”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>BTEX:</b></li> <li>• Faixa de concentração inicial variando de 24 até 198.000 µg/L de BTEX;</li> <li>• Melhor remoção obtida foi de 99,997% para BTEX após 15 meses de operação do sistema;</li> <li>• Pior remoção obtida foi de 23% para BTEX</li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
KHAN <i>et al.</i> (2004)	Escala Real	Apresenta uma revisão dos sistemas de remediação em solo e água. A Tabela 2 do artigo demonstra resultados de remediação em escala real.	Hidrocarbonetos	“Air Sparging” e Extração de Vapor (SVE):	<p>após 31 meses de monitoramento;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>TPH</u>: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faixa de concentração inicial variando de 240 até 34.000 µg/L de TPH;</li> <li>• Melhor remoção obtida foi de 99,8% para TPH após 37 meses de operação do sistema;</li> <li>• Pior remoção obtida foi de 90,6% para TPH após 8 meses de monitoramento;</li> </ul> </li> <li>• <u>Conclusão</u>: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 21 áreas (48%) com reduções permanentes maiores do que 90%. 10 áreas (23%) foram consideradas insatisfatórias.</li> </ul> </li> <li>• Tecnologia “Air Sparging” associado com Extração de Vapor (SVE): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posto de Combustíveis na Flórida (EUA): operação de 47 meses com redução da concentração de BTEX de 24.000 µg/L para 10 µg/L (99,9%);</li> <li>• Posto de Combustíveis em New Hampshire (EUA): operação de 13 meses com redução</li> </ul> </li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
					da concentração de BTEX de 3270 µg/L para 5 µg/L (99,8%)
ABDANUR & NOLASCO (2005)	Escala Real: área remediada foi o aquífero freático contaminado por BTEX da Refinaria de Petróleo Duque de Caxias no Rio de Janeiro	Monitoramento de área contaminada devido a acidente ocorrido na Refinaria	BTEX	Injeção de ar no solo e extração de vapores do solo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de remediação estudado contribuiu para redução das concentrações dos compostos BTEX em 52,8% e Benzeno 30,3% na água subterrânea.</li> </ul>
AYOTAMUNO <i>et al.</i> (2006)	Escala de laboratório – água subterrânea contaminada da área de Eagle Island, Port Harcourt, Nigéria	Uso de carvão ativado para tratamento de água contaminada por óleo cru e produtos de refino de petróleo. Os autores testaram diferentes massas de adsorvente e a eficiência do tratamento foi medida através do parâmetro TPH	TPH	Adsorção com carvão ativado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoção de TPH igual a 99,9% (concentração inicial igual 9304,70 mg/L e após tratamento igual a 12,37 mg/L);</li> <li>• As conclusões dos autores demonstram que o carvão ativado é muito efetivo para uso em remediação de águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos, sendo recomendado seu uso.</li> </ul>
MARIANO <i>et al.</i> (2007)	Escala Real – Posto de Combustíveis em	Monitoramento da água subterrânea de 2004 a 2006.	BTEX, pH, temperatura,	Atenuação Natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faixa de concentração inicial: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzeno = 4,0 - 57,0 µg/L;</li> </ul> </li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
	Santa Bárbara d'Oeste (São Paulo)		alcalinidade, Eh, OD, condutividade, sódio, cloro, etc...		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolueno = 4,0 – 69,0 µg/L;</li> <li>• Etilbenzeno = 4,0 - 4330 µg/L;</li> <li>• Xileno = 4,0 - 372 µg/L;</li> <li>• BTEX = 56,1 até 4702 µg/;</li> <li>• pH = 5,8 – 6,5;</li> <li>• Temperatura = 24,5 – 27,4 °C;</li> </ul>
RAHBEH & MOHTAR (2007)	Escala Real em duas áreas contaminadas da Indiana (EUA)	Os autores desenvolveram um modelo numérico para projeto e operação de um sistema de “air sparging” e extração de vapor (SVE). Foram utilizados dados de monitoramentos reais em 02 áreas contaminadas com hidrocarbonetos.	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno	“Air Sparging” e Extração de Vapor (SVE):	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área 1: Porter County <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração inicial aproximada de: Tolueno (0,9 mg/L) e Xileno (15 mg/L);</li> <li>• Remoções após 1113 dias de, aproximadamente, 100%;</li> </ul> </li> <li>• Área 2: Chesterton County <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração inicial de: Benzeno (4,56 mg/L), Etilbenzeno (1,76 mg/L), Xileno (7,43 mg/L);</li> <li>• Remoções aproximadas, após 411 dias, de 100%.</li> </ul> </li> </ul>
JUNEAU JR <i>et al.</i> (2007)	Escala real	Sistema de tratamento instalado em um Posto de Combustíveis em New		“pump and treat”, “air stripping”,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentrações iniciais de BTEX para o tratamento por “air stripping” variou de Não detectado até 41.390,0 µg/L;</li> </ul>



Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
FERRARESE <i>et al.</i> (2008)	Em escala de laboratório	<p>Hampshire (EUA). O sistema consistia de: poço de extração, torre de “air stripping”, biorreator com leito fluidizado e polimento com carvão ativado.</p> <p>Realização de testes com: peróxido de hidrogênio, fenton modificado, persulfato de sódio e peróxido de hidrogênio. A finalidade do estudo era a verificação de qual oxidante era o mais efetivo na redução dos contaminantes e qual é a dose ótima de regente.</p>	Hidrocarbonetos Poliaromáticos (PAH’s)	<p>bioreator e adsorção</p> <p>Oxidação química para remediação “ex situ”</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Após tratamento por “air stripping” obteve-se concentrações que variaram de não detectável até 4.829,0 µg/L;</li> <li>• Em termos de porcentagem de remoções para o “air stripping”, obteve-se variação de: 30% até 100% aproximadamente;</li> <li>• Para o efluente final após todos os sistemas de remediação, obteve-se remoções de 100% para todos os testes.</li> <li>• Reagentes tiveram diferentes remoções, sendo que as melhores performances foram obtidas com fenton modificado, peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio;</li> <li>• Para o peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio a remoção foi de cerca de 90%, porém com uma dosagem muito elevada;</li> <li>• Para o reagente de fenton a remoção foi de 95% e a dosagem considerada adequada;</li> <li>• Pior eficiência foi obtida com a combinação dos oxidantes permanganato e peróxido de hidrogênio.</li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
WIRTHENSOHN <i>et al.</i> (2009)	Planta Piloto – Produção de gás em Viena na Áustria	Monitoramento em 3 estágios (Tempo total = 180 dias) de planta piloto de tratamento com seguintes processos: 02 poços de sucção, 01 unidade de sedimentação/ flotação aerada (SED/Flo), 02 reatores com aeração (Bio), Filtro Multi-média com solo e areia (MMF) e 02 filtros com carvão ativado (GAC).	BTEX, DQO, PAH, Fenol, etc...	Sistema Pump- and-Treat, Sedimentação, Flotação, Aeração e Adsorção.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faixa de concentração inicial:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• BTEX = 295 - 806 µg/L;</li> <li>• Benzeno = 247 - 547 µg/L;</li> <li>• pH = 6,7 – 7,4;</li> <li>• Temperatura = 13,1 – 13,7 °C</li> </ul> </li> <li>• Resultados:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maioria dos BTEX foram removidos na unidade de sedimentação / flotação aerada;</li> <li>• Com adição de fosfato: 98% de remoção na unidade SED/Flo, 100% nas unidades de aeração e filtração;</li> <li>• Sem adição de fosfato: 98% de remoção na unidade SED/Flo; 99% nas unidades Bio e MMF e 100% nas unidades GAC;</li> <li>• Alta velocidade de aeração: 92% de remoção para SED/Flo, 95% na unidades Bio, 96% na unidade MMF e 97% nas unidades GAC.</li> </ul> </li> <li>• Conclusão:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• O filtro de polimento com carvão ativado garante a qualidade do efluente tratado;</li> </ul> </li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
CHEN <i>et al.</i> (2010)	Escala Real em área contaminada por combustíveis em Taiwan.	Monitoramento, em 2 anos, de 05 poços distribuídos na área. A primeira fase foi de verificação de vestígios de atenuação natural dos contaminantes e a segunda fase foi a execução de tratamento por injeção de ar no subsolo (biorremediação aeróbia)	BTEX, pH, OD, Temperatura, etc...	Atenuação natural e biorremediação aeróbia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O sistema pump-and-treat provou ser eficiente e com adequado custo-benefício.</li> <li>• Faixa de concentração inicial:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• BTEX = 39 - 2838 µg/L;</li> <li>• Benzeno = 15 - 743 µg/L;</li> <li>• Tolueno = 2 - 712 µg/L;</li> <li>• Etilbenzeno = 6 - 419 µg/L;</li> <li>• Xileno = 16 - 964 µg/L;</li> <li>• pH = 6,6 – 7,0;</li> <li>• Temperatura = 23,9 – 24,2 °C</li> </ul> </li> <li>• Resultados atenuação natural:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoção de Benzeno = 63,8 – 86,3%;</li> <li>• Tolueno = 73,7 – 97,3%;</li> <li>• Etilbenzeno = 66,4 – 91,4%;</li> <li>• Xileno = 64,7 – 96,5%;</li> <li>• BTEX = 68,0 – 92,1%</li> </ul> </li> <li>• Resultados biorremediação aeróbia:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoção de Benzeno = 83,7 – 99,3%;</li> <li>• Tolueno = 89,3 – 99,8%;</li> <li>• Etilbenzeno = 85,8 – 99,6%;</li> </ul> </li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
					<ul style="list-style-type: none"> <li>• Xileno = 80,0 – 99,4%;</li> <li>• BTEX = 85,0 – 99,0%</li> </ul>
KIELING <i>et al.</i> (2010)	Escala Real em 10 postos de combustíveis em Porto Alegre/RS	Levantamento de dados de 10 postos de combustíveis em remediação ativa (tempo de monitoramento de 4 anos)	BTEX e TPH	Pump-and-treat, “Air Sparging”, SVE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A maior eficiência de remoção de BTEX e TPH foi utilizando o método “Pump and Treat” associado à Extração de Vapor;</li> <li>• Menor eficiência foi obtida com o método de “Air Spargingg”;</li> <li>• A remoção de BTEX, na maioria dos postos, foi de 100% no período de monitoramento;</li> <li>• Para TPH não foi obtido remoção de 100% em quase todos os postos de combustíveis avaliados.</li> </ul>
SOARES <i>et al.</i> (2010)	Escala de laboratório utilizando solos (arenosos e húmidos) coletados na região de Porto em Portugal.	Uso de bomba de vácuo para extração com vazão variando entre 2 a 19 L/h. O tempo de remediação variou de 2,3h até 45,4h. Medido o nível de contaminação em solo em mg/kg e calculado a porcentagem de remediação.	Benzeno	Tratamento combinado de Extração de Vapor com biorremediação em solos contaminados com Benzeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O experimento mostrou eficiência de 92% para solos arenosos e de 78% para solos húmidos.</li> </ul>
AFFERDEN <i>et</i>	Escala Piloto	02 Filtros de solo com injeção	Concentração	Tratamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faixa de concentração inicial:</li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

<b>Autor</b>	<b>Escala</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Parâmetros avaliados</b>	<b>Tipo de Tratamento</b>	<b>Resultados</b>
<i>al.</i> (2011)	construído perto de <del>Leuna em uma</del> Refinaria do Nordeste da Alemanha (acidente ocorrido em 2007)	vertical de ar, sendo que o último filtro possuía plantas no topo. Foi estudado 4 estágios de tratamento variando a injeção de ar entre 60 L/m <sup>2</sup> .d e 480 L/m <sup>2</sup> .d.	de benzeno, tolueno, xileno e etilbenzeno (µg/L)	Biológico (com injeção de ar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzeno = 13.046 – 18.625 µg/L;</li> <li>• Tolueno = 6,7 – 8,0 µg/L;</li> <li>• Etilbenzeno = 31,0 – 50,0 µg/L;</li> <li>• Xileno = 63,7 – 82,5 µg/L;</li> <li>• pH médio igual a 7,45;</li> <li>• Número de amostras = variando entre 26 até 154;</li> <li>• Tempo de monitoramento = 611 dias;</li> <li>• Remoção de benzeno variando entre 97% até 100%. Resultados similares em todas as fases do tratamento;</li> <li>• Remoção de tolueno, xileno e etilbenzeno igual a 100%.</li> </ul>
LIANG <i>et al.</i> (2011)	Escala de Laboratorio	Executado testes em colunas (25cm de altura e diâmetro de 5cm) compostas por material oxidante cimento tipo 1 e areia e oxidantes persulfato de sódio e potássio. Foi utilizada água contaminada com	MTBE e Benzeno	Sistema de barreiras de oxidação química “in situ”.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 86% - 92% MTBE e 95% - 99% de benzeno foi removido no primeiro estágio de liberação do persulfato;</li> <li>• A remoção de MTBE (40% - 56%) e Benzeno (85% - 93%) foi menor na última parte do período de liberação do oxidante.</li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
ALBERGARIA <i>et al.</i> (2012)	Escala de laboratório	<p>padrões de MTBE e benzeno.</p> <p>Coleta de solos em uma área na cidade do Porto em Portugal. Executado processo de limpeza do solo. Execução de colunas 10cm de diâmetro, 37 de altura e 4 kg de solo. Contaminação na proporção de 0,025 – 0,4 de BTEX. Posterior foi instalado sistema de extração de gás com bomba de vácuo. O gás era coletado e analisado em cromatógrafo.</p>	BTEX, Tricloroetileno; Percloroetileno.	SVE (extração de VOC's)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiência de remoção superiores a 92%;</li> <li>• O benzeno foi o parâmetro com maior remoção.</li> </ul>
		FRANCO <i>et al.</i> (2012)			

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento “stripping”	Resultados
CHIU <i>et al.</i> (2013)	Escala Real em uma área com derramamento de gasolina e diesel no norte de Taiwan	As etapas de investigação incluíram: coleta e análise de amostras de água subterrânea, diversidade microbiológica, bactérias dominantes, capacidade de biodegração, degradação dos contaminantes. Período de pesquisa foi de 2 anos.	BTEX	Atenuação Natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração Inicial: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzeno: &lt;1 - 3919 µg/L;</li> <li>• Tolueno = &lt;1 – 688 µg/L;</li> <li>• Etilbenzeno = &lt;1 – 837 µg/L;</li> <li>• Xileno = &lt;1 – 4084 µg/L;</li> <li>• BTEX = &lt;1 – 9528 µg/L;</li> <li>• pH = 5,6 – 6,8;</li> </ul> </li> <li>• Redução do TPH de 9,5 mg/L para 0,06 mg/L – 99%.</li> </ul>
MAIR <i>et al.</i> (2013)	Estudo de laboratório com amostras de solos retiradas de uma área militar localizada no Sul da Itália. Solo com contaminação devido a tanques de óleo diesel e gasolina.	O estudo foi realizado em 30 semanas de forma a determinar o efeito da temperatura (10°C e 20°C) e vários bioestimuladores (nitrogênio, fósforo, fertilizantes e produtos comerciais) versus atenuação natural para decréscimo de TPH, atividade microbiana e	TPH	Atenuação Natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O TPH foi removido quase que totalmente para temperaturas de 20°C (92,7%);</li> <li>• Para temperaturas de 10°C a remoção foi de TPH foi de 69%;</li> <li>• Significativa estimulação utilizando adição de nutrientes.</li> </ul>

Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
SIMANTIRAKI <i>et al.</i> (2013)	Escala de Laboratório	<p>composição da comunidade microbiológica</p> <p>Utilizado amostras de composto proveniente da Planta de Resíduos Orgânicos da Prefeitura Municipal de Chania na Grécia e lodos da ETE do mesmo município. As amostras foram caracterizadas quanto a presença de metais, toxicidade, compostos orgânicos, etc... Este material foi utilizado como adsorvente para tratamento de água subterrânea contaminada por BTEX. Utilizado misturas com BTEX (10 ppm) e relação composto/lodo de 1/10.</p>	BTEX	Adsorção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O modelo da isoterma de Freundlich foi o mais adequado para amostras de composto e lodo;</li> <li>• Foi obtido resultados de adsorção de BTEX superiores a 90%;</li> <li>• Os piores resultados foram obtidos utilizando lodo digerido anaerobicamente (remoção de 30% – 50% de BTEX);</li> <li>• Para lodos não tratados e frescos foram obtidos remoções na ordem de 50% - 60% de BTEX.</li> </ul>
		FAN et al. (2013)			Escala Real



Tabela 8: Estudos abordando tecnologias de tratamento de água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos.

Autor	Escala	Metodologia	Parâmetros avaliados	Tipo de Tratamento	Resultados
EL-NAAS <i>et al.</i> (2014)	-	<p>remediação de aquífero semi-confinado contaminado por hidrocarbonetos no Noroeste da China.</p> <p>Os autores executaram um “Review” a respeito da biodegradação aeróbia do BTEX. Na Tabela 2 do artigo estão apresentados diversos estudos e respectivos resultados obtidos.</p>	hidráulicos	BTEX	<p>no tratamento acima de 8-9 metros de profundidade.</p> <hr/> <ul style="list-style-type: none"> <li>• SINGH &amp; CELIN (2010): pH = 7,5; Temperatura = 37°C; Tempo de degradação = 48h. Obtenção das seguintes remoções: 100% benzeno, 80% tolueno, 100% etilbenzeno, 70% xileno;</li> <li>• JIN <i>et al.</i> (2013): pH = 7,0; Temperatura = 25 – 35°C; Tempo de degradação = 60h. Obtenção das seguintes remoções: 45,5% BTEX;</li> <li>• MORLETT-CHÁVEZ <i>et al.</i> (2010): pH = 7,2; Temperatura = 36°C; Tempo de degradação = 60h. Obtenção das seguintes remoções: 99,8% BTEX.</li> </ul>

O estado da arte demonstra que, a partir de 2012, quase não há relatos de pesquisas de tratamento de água subterrânea contaminadas por hidrocarbonetos utilizando sistemas de aeração. Percebe-se uma grande difusão de tratamentos como atenuação natural e/ou biorremediação. Estes temas sempre foram amplamente estudados, porém atualmente estão se sobrepondo aos demais. Destaque também para o número de pesquisa envolvendo tratamento por oxidação química.

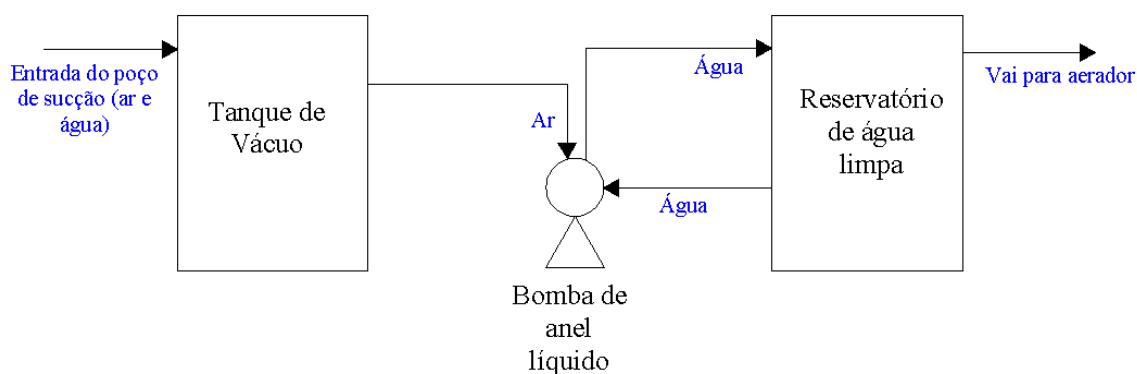
Ainda, na análise dos equipamentos comercializados aplicáveis a remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos percebe-se sistemas separados de bombeamento e tratamento. A Figura 11 mostra um sistema comercial de bombeamento utilizando vácuo.



**Figura 11: Sistema de sucção à vácuo**

Fonte: [http://www.sibravac.com.br/produtos\\_equipamentos\\_mpe.php](http://www.sibravac.com.br/produtos_equipamentos_mpe.php)

Na Figura 12, está um fluxograma que apresenta um modelo padrão comumente utilizado para sucção à vácuo de água subterrânea contaminada em Postos de Combustíveis.



**Figura 12: Fluxograma sistema típico de bombeamento por vácuo em postos de combustíveis**

A Figura 14 ilustra o filtro de adsorção padrão utilizando carvão ativado. Já a Figura 13 demonstra o sistema de “air stripper” utilizado para extração de VOC’s.



**Figura 13: Sistema de “air stripper”**



**Figura 14: Filtro de adsorção**

**Fonte:** <http://www.clean.com.br/site/produtos/remediacao-e-investigacao-ambiental/>

Esta breve exposição demonstra equipamentos com funções separadas e de grandes dimensões. A proposta e o avanço tecnológico desta pesquisa é a compactação destes equipamentos de forma a otimizar a energia utilizada pelos mesmos, garantindo uma eficiência similar ao sistema comercializado atualmente. O sistema compacto proposto pode ser resumido da seguinte maneira:

- Equipamento de sucção e tratamento por vácuo e aeração utilizando injetores (substituição ao sistema de sucção com bomba de vácuo convencional e sistema de tratamento por “air stripping” e/ou “air sparging”);
- Equipamentos aeradores de superfície em pequena escala (substituição ao sistema de tratamento por “air stripping” e/ou “air sparging”);
- Filtro de adsorção com recheio composto por mistura de carvão ativado e cinza de casca de arroz (substituição ao sistema de filtro de adsorção com 100% carvão ativado).

Uma análise de mercado, analisando empresas que executam projetos e implantam sistemas de remediação de áreas em Postos de Combustíveis, tecnologias de biorremediação no Brasil ainda são pouco usuais devido, principalmente, ao tempo de remediação e a poucas pesquisas e/ou produtos nacionais na área.

### 3.7 NORMAS E LEGISLAÇÕES APLICADAS À ÁREA

Como referência de padrão de potabilidade de água adotado no Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde nº 2914 regulamenta concentração máxima permitida de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno igual a 5µg/L, 170µg/L, 200µg/L e 300µg/L respectivamente (BRASIL, 2011).

Já para lançamento de efluentes em corpos d'água no país deve-se atender a Lei nº 9.433/97 a qual aborda a Política Nacional de Recursos Hídricos. Esta menciona cinco instrumentos de gestão de recursos hídricos: planos de recursos hídricos, outorga dos direitos de uso da água, sistema de informações sobre recursos hídricos, enquadramento dos corpos d'água e cobrança pelo uso da água.

Nestes termos, o instrumento referente ao enquadramento dos corpos hídricos é normatizado pela Resolução do CONAMA nº 020/86, alterada pela Resolução CONAMA nº 357/05, a qual foi recentemente alterada parcialmente pela Resolução CONAMA nº 430/2011, incluindo inclusive padrões para BTEX. Para esta resolução 430/2011, os padrões de lançamento em recursos hídricos referente aos parâmetros benzeno, Etilbenzeno, Tolueno e Xileno, são respectivamente: 1,2 mg/L, 0,84 mg/L, 1,2 mg/L e 1,6 mg/L.

Em nível estadual, no Rio Grande do Sul, a legislação para atendimento quanto a emissão de efluentes em corpos hídricos é a Resolução do CONSEMA nº 128 de 2006, a qual não faz menção a padrões de BTEX e tão pouco TPH.

Para água subterrânea a Resolução do CONAMA nº 396/2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento, prevenção e controle da poluição das águas subterrâneas, apresenta no anexo I os valores máximos permitidos (VMP) para os diversos usos de água. Analisando o uso para consumo humano em relação aos VMP's, os limites são: Benzeno 5,0 µg/L; Tolueno 170,0 µg/L; Xileno Total 300 µg/L, similares aqueles apresentados pela Portaria 2914 do Ministério da Saúde.

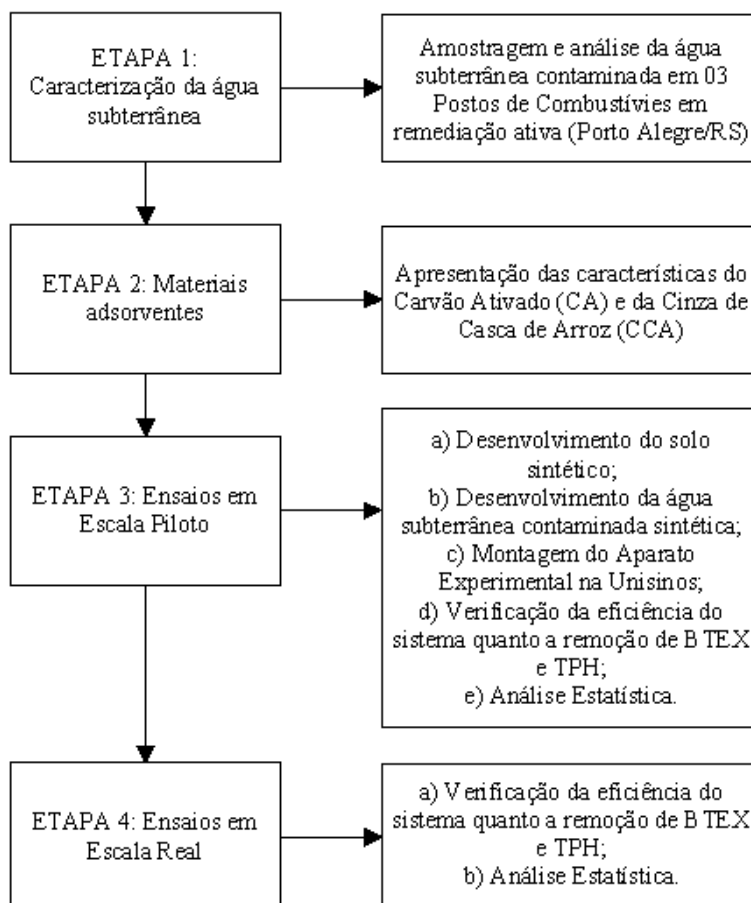
Ainda em relação a água subterrânea, a CETESB (2005) também apresenta valores orientadores de intervenção em área contaminadas para os parâmetros; Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno e Xilenos iguais a, respectivamente, 5,0 µg/L, 300,0 µg/L, 700,0

$\mu\text{g/L}$ ,  $500,0 \mu\text{g/L}$ . Estas concentrações máximas são as mesmas citadas pela CONAMA nº 420/2009..

Cabe neste momento uma breve crítica à legislação nacional a respeito do parâmetro TPH. A preocupação se dá com os parâmetros BTEX e com razão. Porém, sem um limite de TPH na saída do sistema, embora os Órgãos Ambientais locais monitorem e fiscalizem, não há eficiência completa da remediação. O processo de adsorção, para estes casos, conforme demonstra a literatura é efetivo e pode ser utilizado como alternativa de remoção de todos os contaminantes.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa dividiu-se em 04 etapas as quais estão resumidas no fluxograma da Figura 15.



**Figura 15: Etapas da metodologia da pesquisa**

As etapas metodológicas de caracterização dos materiais adsorventes e dos materiais utilizados para os ensaios em escala piloto (por exemplo: água subterrânea sintética e perfil de solo), são apresentadas no capítulo de metodologia, em função de que estes resultados serviram como embasamento para estruturação dos ensaios em escala piloto e real.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Realizaram-se coletas de água subterrânea em 03 postos de combustíveis, com características similares, em Porto Alegre no Rio Grande do Sul (Postos de combustível nominados A, B e C). Todos os postos estudados estavam, no momento das coletas, em processo de remediação ativa em função de derramamentos de diesel e/ou gasolina.

Estas amostras foram analisadas para concentrações de BTEX (benzeno, tolueno, xileno e etilbenzeno) e TPH (Hidrocarbonetos Totais de Petróleo), conforme descrito na Tabela 9.

Tabela 9: Datas de amostragens para caracterização da água subterrânea.

Posto	Parâmetros analisados
	Todos os parâmetros da Tabela 6
A	BTEX e TPH
B	BTEX e TPH
C	BTEX e TPH

Em um dos pontos, de forma a se obter um reconhecimento macro da amostra, fez-se uma varredura envolvendo vários parâmetros físico-químicos: Turbidez, pH, condutividade, DBO, DQO, OD, COT, Série de Nitrogênio, Alcalinidade, Fósforo, Série de Sólidos (APHA, 1995) e Coliformes Totais e Termotolerantes (SILVA *et al.*, 1997), executados na Unisinos; BTEX (EPA 8260-b); TPH Total (EPA 3510-d e EPA 8015-d), executados em laboratório externo.

#### 4.2 MATERIAIS ADSORVENTES

Para o experimento em escala piloto, descrito na sequencia deste trabalho, utilizou-se filtro de adsorção composto por recheio de carvão ativado e cinza de casca de arroz. O carvão ativado utilizado era granular de casca de coco queimado,

proveniente do fornecedor do Paraná, utilizado pela Projecosult Engenharia Ltda. Já a cinza de casca de arroz foi proveniente de casca de arroz queimada em caldeira (temperatura não constante de aproximadamente 900 °C) originada de empresa privada do ramo alimentício no Rio Grande do Sul.

As características desses materiais adsorventes estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Características dos materiais adsorventes utilizados.

<b>Parâmetro</b>	<b>Cinza de Casca de Arroz</b>	<b>Carvão Ativado</b>	<b>Metodologia de caracterização</b>
pH	8,7	9,3	NG CHILTON <i>et al.</i> (2002)
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	81,7	227,5	NG CHILTON <i>et al.</i> (2002)
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,9	1,7	ABNT NBR 6508, 1984 / ASTM D850, 2002
Granulometria (mm)	1,7 – 0,053	3,35 – 0,85	ABIFA, 2003 <sup>b</sup>
Percentual de Perda ao fogo (%)	7,2	98,4	ABIFA, 2003 <sup>a</sup>

Estas características demonstram que o carvão ativado apresenta uma composição predominantemente orgânica, com uma perda ao fogo maior do que a cinza. A condutividade conferida a água é maior no carvão ativado, provavelmente em virtude da liberação de íons  $\text{K}^+$ , decorrentes do processo de ativação do material com KOH. As massas específicas são similares.

Em termos de granulometria (Figura 16), a cinza de casca de arroz apresenta-se mais fina em relação ao carvão ativado. A distribuição granulométrica do carvão ativado situa-se entre 3,35 e 0,85 mm, enquanto que a cinza de casca de arroz entre 1,7 e 0,053 mm.



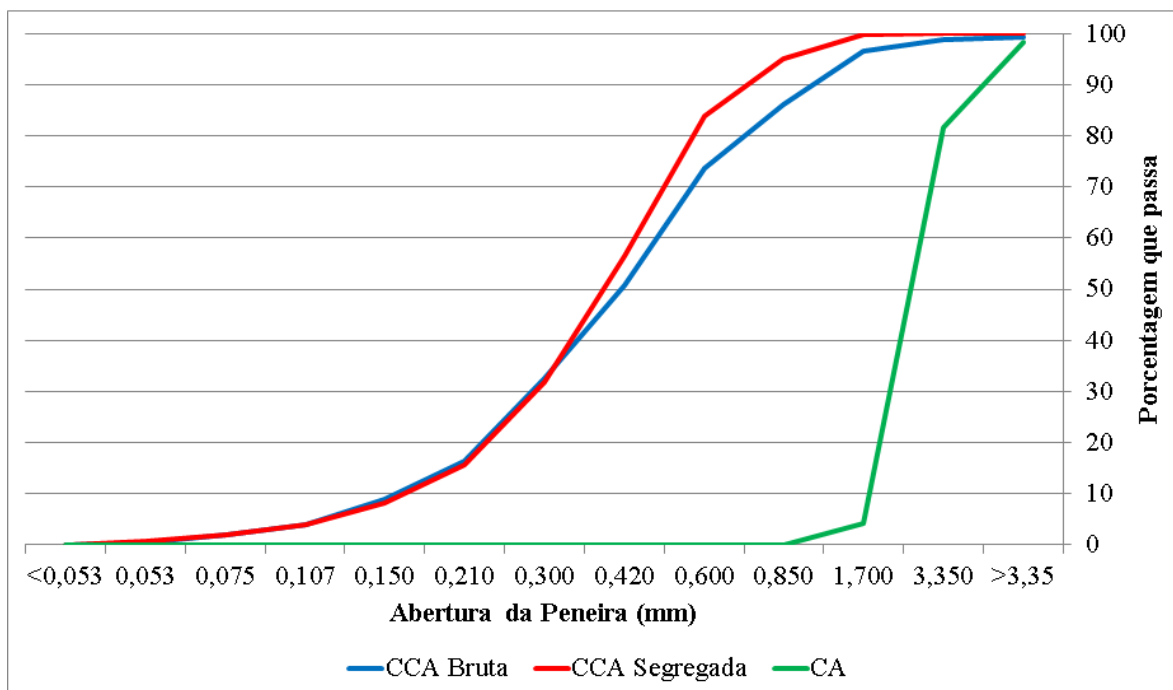


Figura 16: Distribuição granulométrica do carvão ativado e da cinza de casca de arroz.

A Figura 17 mostra as características a partir da análise de fluorescência de Raio x. Como componentes inorgânicos, no carvão ativado predomina o potássio (K), enquanto que na cinza de casca de arroz predomina a silício (Si).

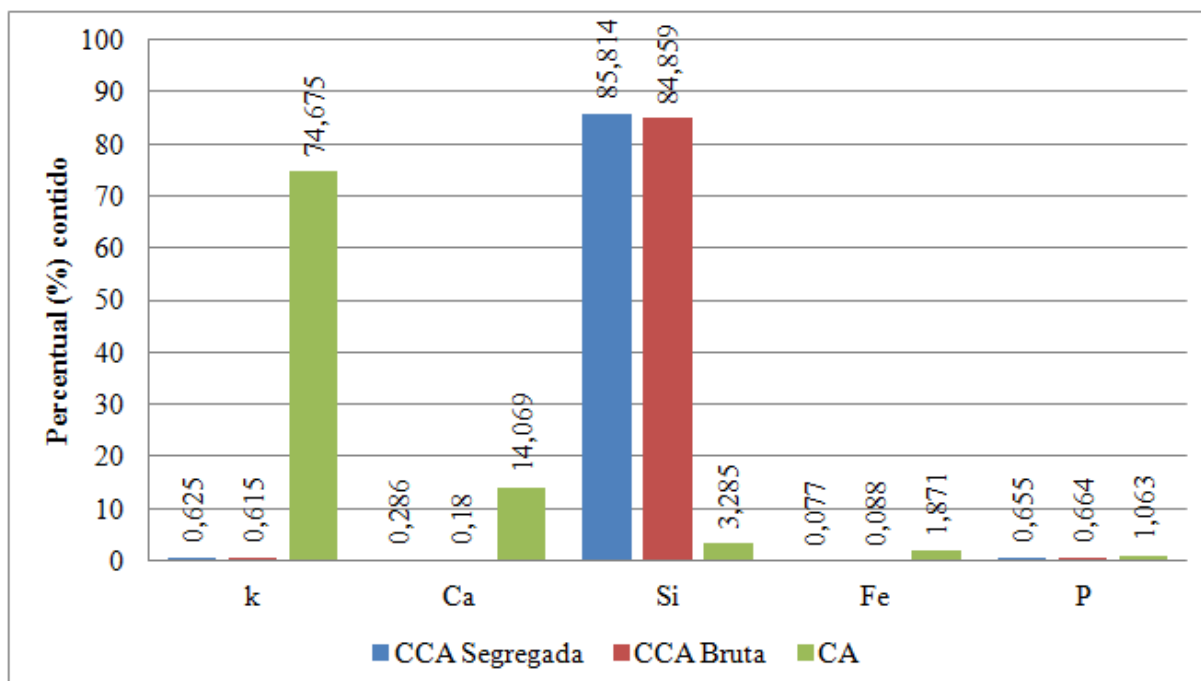


Figura 17: Caracterização por Fluorescência de Raio X

Para definição da composição do recheio do filtro de adsorção utilizado nos ensaios em escala piloto, foram realizados testes de bancada e em escala real. As características destes ensaios estão a seguir descritas:

- Escala de laboratório:
  - Filtros de adsorção descendentes confeccionadas com colunas de vidro de 52,4mm de diâmetro e altura de 260mm, composto por 36mm de brita e 147mm de adsorvente;
  - Foram testados filtros com 100% CA, 100% CCA e 50%CA - 50%CCA;
  - Foi utilizado 301 g de cinza de casca de arroz e 269 g de carvão ativado. Isso corresponde a um volume de recheio de 316,84 cm<sup>3</sup>. A vazão empregada foi 0,11 L/s, velocidade de percolação de 2,6 cm/s e um volume tratado final de 65L com TPH inicial igual a 555 µg/L;
  - Os filtros com 100% carvão ativado e filtros com a mistura 50% carvão ativado e 50% cinza de casca de arroz se comportaram de forma similar. Filtros com 100% de cinza de casca de arroz saturaram em um tempo menor (75 minutos).
- Escala real (Posto de Combustíveis em remediação ativa em Porto Alegre/RS):
  - Filtros de adsorção descendentes confeccionadas com colunas de PVC de 250mm de diâmetro e altura de 1240mm, composto por 180mm de brita e 703mm de adsorvente;
  - Foram testados filtros com 100% CA, 100% CCA e 50%CA - 50%CCA;
  - Foi utilizado 33,1 kg de cinza de casca de arroz e 29,6 kg de carvão ativado. Isso corresponde a um volume de recheio de 0,034 m<sup>3</sup>. A vazão empregada foi 0,07 L/s e velocidade de percolação de 0,07 cm/s com TPH inicial igual a 12617 µg/L;
  - Os filtros com 100% carvão ativado e filtros com a mistura 50% carvão ativado e 50% cinza de casca de arroz se comportaram de forma similar. A saturação ocorreu em 1085,5 horas;
  - Filtros com 100% de cinza de casca de arroz não foram viáveis devido a problemas de colmatção do recheio. Isto foi associado a granulometria mais fina da cinza.

A partir destas características optou-se pela utilização de filtros de adsorção com adsorventes com a mistura 50% carvão ativado e 50% cinza de casca de arroz.

#### 4.3 ENSAIOS EM ESCALA PILOTO

O objetivo do ensaio em escala piloto foi simular um poço de sucção instalado em uma área com água subterrânea contaminada, da forma mais parecida possível com o sistema de remediação instalado em um Posto de Gasolina em escala real, porém com controles operacionais.

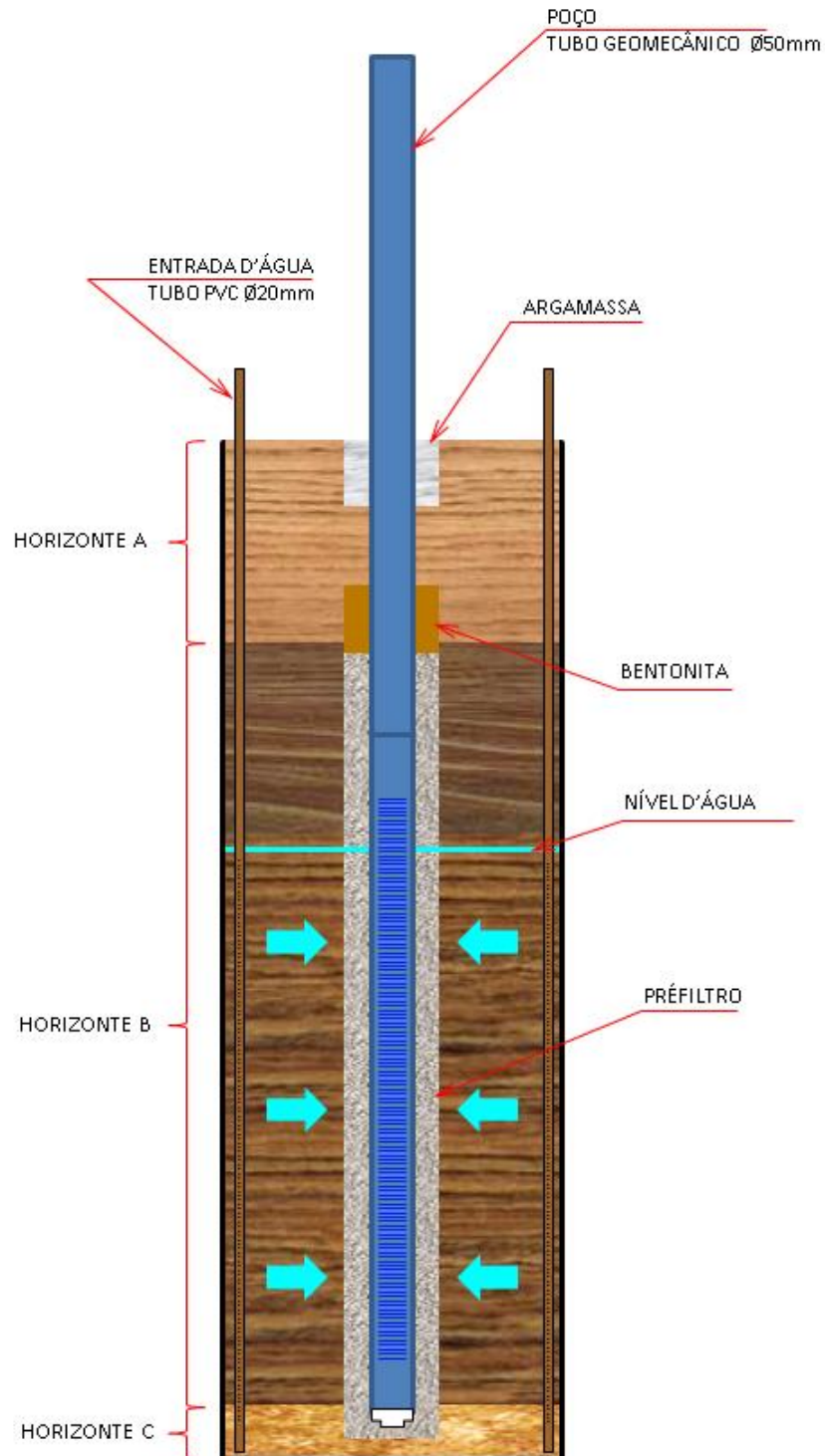
Com isso, desenvolveu-se um experimento que foi instalado no Anexo II do Laboratório de Saneamento Ambiental da Unisinos. Para execução dos testes foram previstos: 1) perfil de solo sintético e instalação de poço de sucção para monitoramento; 2) água subterrânea sintética composta por água da chuva e contaminação em diferentes proporções de diesel e gasolina; 3) sistema de remediação composta por reservatório de água, injetor, tanque de equalização, aeradores e filtro de adsorção.

Assim, a metodologia desta etapa está apresentada em 05 itens: projeto e construção de perfil de solo e poço de sucção; caracterização da água subterrânea contaminada sintética; aparato experimental; testes hidráulicos do sistema e ensaios em escala piloto.

##### **4.3.1 Projeto e construção de perfil de solo e poço de sucção**

Para simular uma área com água subterrânea contaminada e a instalação do poço de sucção construiu-se, em uma tubulação de PVC de diâmetro 500 milímetros e altura de 2,0 metros, um perfil de solo sintético com presença dos horizontes A (espessura de 0,2 m), B (espessura de 1,7 m) e C (espessura de 0,1 m). Em meio a este perfil de solo, foi instalado poço de sucção composto por tubo geomecânico de 50 milímetros de diâmetro e sistema de pré-filtro composto por areia grossa, cuja função é impedir a

colmatação, pelo solo, dos furos de drenagem existente no geomecânico. A Figura 18 ilustra a instalação relatada.



**Figura 18: corte esquemático do perfil de solo e poço de sucção**

A simulação do fluxo de água proveniente da movimentação do lençol freático foi executada pela presença de tubulações de PVC de 20 milímetros perfuradas localizadas na borda do tubo de PVC de 500 milímetros. Estas tubulações permitiam, por meio de conexões com mangueiras, o ingresso e distribuição de água com presença de gasolina e diesel no perfil de solo simulando assim a contaminação do ambiente. A Figura 10, anteriormente apresentada, demonstra estas tubulações. Na Figura 19, no entanto, mostra, mais claramente, uma foto da instalação e na Figura 20 pode ser visualizado o perfil finalizado e a presença das mangueiras de alimentação da água contaminada.



**Figura 19: Tubulações de PVC de 20mm utilizados para simular o fluxo do lençol freático**



**Figura 20: Perfil de solo e poço de sucção utilizado nos ensaios e mangueiras de alimentação da água contaminada.**

Para execução do solo sintético utilizado no perfil estudado, retirou-se parcelas de solo da Unisinos ponto 02 (Figura 21) de forma a compor os 03 horizontes de solo mencionados anteriormente. Para execução do horizonte “C” do solo sintético, coletou-se o horizonte “B” do solo natural e fez-se uma mistura com brita nº 2. Esse mesmo solo “B” do solo natural foi utilizado como horizonte “B” no solo artificial. O Horizonte “A” foi executado com a camada superior (mais orgânica de coloração mais escura) do solo coletado em campo. Por fim, colocou-se uma camada de areia de forma a tornar o solo um pouco mais arenoso, facilitando a sucção dos contaminantes para o sistema de tratamento.



Figura 21: Imagem da área da Unisinos (Fonte: Google, 2011)

As características do solo utilizado estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Características físico-químicas do solo sintético

Parâmetro	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Metodologia de caracterização
Areia Grossa + Areia Fina (%)	58,0	49,0	59,0	Classificação Granulométrica
Silte (%)	23,0	40,0	16,0	
Argila (%)	1,21	1,28	1,78	
Capacidade de Troca Catiônica (mmolc/kg)	143	140	202	Instrução Normativa SDA n° 17, de 21 de maio de 2007 - MAPA
Fluoreto (mg kg <sup>-1</sup> )	ND	ND	ND	Colorimetria
Matéria Orgânica em Base Seca (%)	3,04	4,90	3,40	LANARV - Laboratório Nacional de Referência Vegetal - Métodos Oficiais Ministério da

Tabela 11: Características físico-químicas do solo sintético

Parâmetro	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Metodologia de caracterização
				Agricultura - Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 1988.
pH	6,39	6,85	6,84	Potenciometria
Cálcio (mg kg <sup>-1</sup> )	63,3	51,2	179	
Chumbo (mg kg <sup>-1</sup> )	7,86	8,95	6,53	
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	3,08	6,96	5,14	
Cromo (mg kg <sup>-1</sup> )	16,0	12,4	11,9	
Ferro (mg kg <sup>-1</sup> )	21.725	23.117	15.819	
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	42,6	41,9	85,7	
Magnésio (mg kg <sup>-1</sup> )	104	56,5	213	
Manganês (mg kg <sup>-1</sup> )	102	121	169	Em base seca a 65 °C: Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)
Mercúrio (mg kg <sup>-1</sup> )	ND	ND	ND	
Níquel (mg kg <sup>-1</sup> )	1,79	1,89	2,27	
Óxido de Silício (%SiO <sub>2</sub> )	20,0	20,3	20,5	
Potássio (mg kg <sup>-1</sup> )	101	99,6	200	
Prata (mg kg <sup>-1</sup> )	ND	ND	ND	
Selênio (mg kg <sup>-1</sup> )	ND	ND	ND	
Sódio (mg kg <sup>-1</sup> )	12,3	13,6	11,9	
Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )	10,9	11,3	13,9	
Permeabilidade do Solo (cm/s)		3,48 x 10 <sup>-4</sup>		ABNT NBR 15492 (2007) e ABNT NBR 13969 (1997).

**Legenda: ND (não detectável)**

Quanto à geologia local pode-se descrever que não há presença de afloramentos na área. No entanto, o solo local pode ser caracterizado como de origem Botucatu denominado como Latossolos.

Conforme STRECK et al (2002), os Latossolos são solos bem drenados, normalmente profundos a muito profundos, apresentando no perfil uma seqüência de horizontes A-B-C. Em alguns casos podem ser profundos e apresentar inclusões de Neossolos Litólicos. Esses solos têm pouco incremento de argila com a profundidade e apresentam transição difusa ou gradual entre os horizontes; por isso mostram um perfil muito homogêneo, em que é difícil diferenciar os horizontes. Por serem solos muito intemperizados, têm predomínio de caulinita e óxidos de ferro, o que lhes confere uma

baixa CTC (atividade da argila  $<17$  cmol /kg), acentuada acidez, uma baixa reserva de nutrientes e toxidez por alumínio para as plantas. Diante das suas propriedades físicas (profundos, bem drenados, muito porosos, friáveis, bem estruturados) e condições de relevo suave ondulado, os Latossolos possuem boa aptidão agrícola, desde que corrigida a fertilidade química.

Baseado nesta descrição e conforme verificação *in loco*, o solo local pode ser considerado por classificação táctil visual como um solo silte arenoso de cor avermelhada com presença de ferro +3 caracterizada pela coloração avermelhada e película de ferro presente na água. Verificado que a partir de 1,5m; o solo possui coloração mais amarelada, o que caracteriza a presença de ferro +2, sendo um solo mais arenoso e permeável.

#### 4.3.2 Caracterização da água subterrânea contaminada sintética

A água subterrânea contaminada sintética foi elaborada utilizando água da chuva a qual foi armazenada em um reservatório. Nesta água foram adicionadas proporções de gasolina e diesel de forma a obter concentrações de BTEX e TPH similares às aquelas obtidas na etapa de caracterização da água subterrânea. As características da água da chuva utilizada estão apresentadas na Tabela 12 (análises conforme metodologia APHA, 1995).

Tabela 12: Características da água de chuva

Parâmetro	Valor
Cor (mgPt/L)	5,0
Turbidez (NTU)	0,96
pH	7,25
Temperatura (°C)	20,5
Condutividade ( $\mu$ S)	80,3
DBO (mg/L)	0,8
DQO (mg/L)	$<5,0$
OD (mg/L)	4,0



Tabela 12: Características da água de chuva

Parâmetro	Valor
Nitrogênio Total (mg/L)	1,1
Alcalinidade Total (mg/L)	39,1
Fósforo (mg/L)	<0,2
Sólidos Totais (mg/L)	58,4
Sólidos Suspensos (mg/L)	1,5
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	55,2

De forma, a saber, a quantidade de gasolina e diesel a ser inserida na água, as quais promoveriam as concentrações de BTEX e TPH parecidas às encontradas na água subterrânea em escala real, executou-se um teste de laboratório. Em um bécker de 1 litro, inseriu-se água deionizada e incorporou-se diferentes proporções de gasolina. Fez-se 5 amostras, conforme a seguinte proporção: 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5% de gasolina em 1 litro de água. Estas amostras foram enviadas para laboratório terceirizado para ensaios dos parâmetros: BTEX e TPH. A Tabela 13 apresenta esta caracterização.

Tabela 13: Quantidade de BTEX e TPH em função das contaminações por gasolina

Amostra	% de gasolina	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH Total (µg/L)
1	0,1	2101	10298	2705	12618	78368
2	0,2	4263	12105	2773	11889	66435
3	0,3	1934	14918	3302	14305	112456
4	0,4	6841	16115	3402	14934	111921
5	0,5	3511	22848	4642	20189	318131

Percebe-se ao comparar a Tabela 14 em relação à caracterização da água subterrânea em diversos postos de combustíveis em Porto Alegre/RS, que com 0,1% de combustível em água já proporciona valores de BTEX e TPH similares aqueles encontrados no meio. Sendo assim, adotou-se a contaminação da água com 0,1% de gasolina e 0,1% de diesel. Posteriormente de forma a promover um aumento da concentração inicial, fez-se testes com 0,2% também.

Com a definição desta proporção, fez-se um pré-teste operacional da água subterrânea sintética. Em um reservatório de 5000 litros, misturou-se 5000 litros de

água da chuva e inseriu-se 2,5 litros de gasolina e 2,5 litros de diesel, ou seja, 0,1% de contaminantes, em volume. Foram coletadas 06 amostras do sistema, após mistura e uniformização. Para garantia da qualidade dos resultados, fez-se teste bilateral em dois laboratórios externos. Cada um destes recebeu 03 amostras coletadas. As metodologias utilizadas são a mesmas descritas anteriormente para os parâmetros BTEX e TPH.

O critério adotado para seleção e qualificação do laboratório foi a obrigatoriedade de certificação conforme os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025 para os escopo ensaio de BTEX e TPH, o que garante a qualidade dos resultados obtidos. Além disso, foi determinada mesma metodologia e a amostragem foi executada no mesmo momento e local.

### **4.3.3 Aparato experimental**

O experimento baseou-se em sua estrutura, nas instalações de remediação do Posto B, na mesma escala dos equipamentos instalados em escala real. No entanto, executou-se apenas um poço de sucção.

A instalação do aparato experimental foi realizada no Anexo II do Laboratório de Saneamento Ambiental localizado na Unisinos em São Leopoldo/RS. A Figura 22 apresenta o sistema ensaiado, sendo que a descrição de cada equipamento e/ou acessório está na sequencia do trabalho.

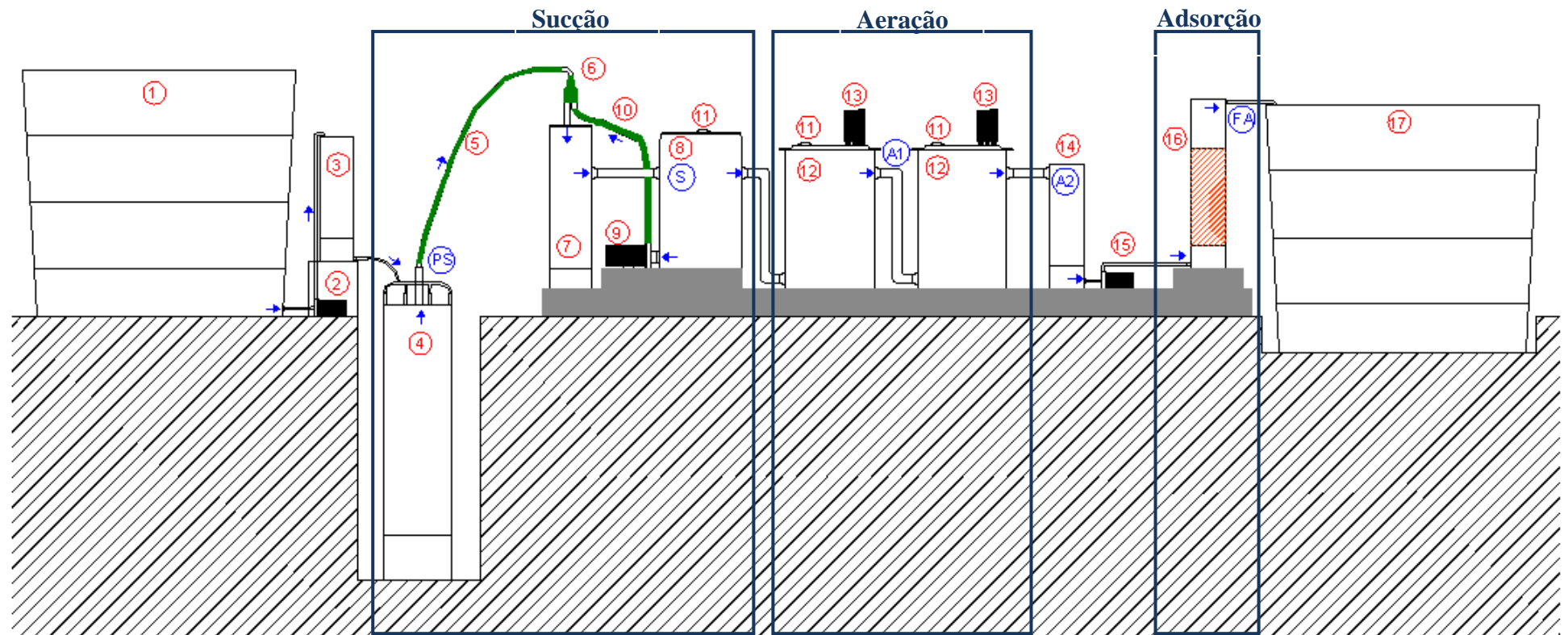


Figura 22: Corte esquemático do sistema de remediação piloto instalado na Unisinos

Observações: as setas representam o sentido do fluxo de água no sistema; números envoltos em círculos são os componentes do sistema descrito na sequência do trabalho e os códigos PS, S, A1, A2, FA envoltos em círculos são os pontos de amostragem.

Os números de 1 a 17 mostrados na Figura 22 representam os seguintes acessórios / equipamentos do sistema:

- **1 – Reservatório de água subterrânea contaminada sintética:** reservatório de fibra de vidro com capacidade de 5.000 litros destinado ao armazenamento da água subterrânea contaminada sintética utilizada no ensaio. Neste reservatório fez-se a mistura de água da chuva, gasolina e diesel. Para homogeneização utilizou-se a bomba de recalque 1;
- **2 - Bomba de recalque 1:** responsável pela sucção da água contaminada proveniente do reservatório de água subterrânea contaminada sintética e transporte desta água até o tanque de alimentação (Moto bomba Schneider, monobloco, modelo BCR 2000, ferro fundido com rotor em noryl de alta dureza, vedação por selo mecânico com flange incorporado, com motor elétrico de 1/3 CV, monofásico, 60Hz, 220V);
- **3 – Tanque de alimentação:** confeccionado em PVC e dimensões 0,25m de diâmetro e altura de 1,5m. Objetivou-se a garantia de alimentação, com água contaminada, do perfil de solo com vazão constante. Este tanque era dotado de sistema eletrônico que garantia mesma coluna de água no decorrer da alimentação do perfil de solo durante o ensaio;
- **4 – Perfil de Solo:** simulação de um solo contaminado por hidrocarbonetos. Constituído de tubulação de PVC com diâmetro de 0,5m e altura de 2,0m, preenchido por solo sintético em camadas (horizontes A, B, C). Instalou-se poço de sucção para execução do tratamento da água. Este perfil foi anteriormente detalhado;
- **5 – Entrada de água:** executada através de uma mangueira de borracha de alta pressão conectada ao poço de sucção e ao injetor. Este ponto representa a entrada de água subterrânea contaminada a qual é succionada, a partir do poço de sucção, pelo vácuo promovido pelo injetor (ver número 6);
- **6 – Equipamento Injetor tipo “venturi”:** equipamento com duas entradas. A 1ª refere-se a entrada de água subterrânea contaminada proveniente do poço de sucção e a 2ª é a entrada da água bobeada proveniente do fundo do tanque de equalização (ver número 8). A água ao entrar nesta 2ª provocava o arraste e,

consequentemente, o vácuo que promovia a entrada da água subterrânea pela 1ª entrada (Injetores modelo 12-36 1.1/2 x 1.1/4);

- **7 – Reservatório de água:** reservatório de PVC com dimensões 0,25m de diâmetro e 1,5m de altura. Responsável pelo recebimento de água proveniente dos poços de sucção e, por tubulação, transportava esta água para o Tanque de Equalização (ver número 8);
- **8 – Tanque de equalização:** bombona de plástico com dimensões 0,6m de diâmetro e altura de 0,98m. Utilizado para abatimento de água devido a grande presença de bolhas no sistema. A água armazenada neste tanque era bombeada para uma das entradas do injetor com o objetivo de formação do vácuo;
- **9 - Bomba de recalque 2:** responsável pelo bombeamento / recirculação da água do fundo do tanque de equalização para o injetor (Conjunto moto bomba Schneider, monobloco, modelo BC 92SHA, ferro fundido, conexão de sucção 1.1/2" (rosca tipo BSP), recalque 1.1/4" (BSP), motor alumínio, vedação selo mecânico, motor elétrico 1,5CV, 3550 RPM, monofásica, 60Hz, 220V, proteção IP2);
- **10 – Mangueira:** mangueira de borracha (cor verde oliva) que suportava alta pressão responsável pela circulação de água contaminada do tanque de equalização e reservatório de água;
- **11 - Dreno de gases:** saída localizada no topo dos equipamentos responsável pela retirada de gases voláteis proveniente do processo de tratamento por “stripping”. A partir dessa saída, os gases eram conduzidos por tubulação até sistema de adsorção;
- **12 – Tanque de aeração:** reservatório em estrutura de fibra de vidro com dimensões 0,65m de diâmetro e 1,02m de altura. Destinado a receber a água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos, com dreno de gases voláteis e tampa com motor e hélice de aeração;
- **13 – Conjunto de aeração por superfície:** conjunto composto por bomba (Motor voges 3/4 CV 4 pólos 110/220V c/ Flange FC 14), haste e hélice em aço inox responsável pela aeração do meio líquido e execução do processo de “stripping”. A haste era vazada e possuía furo na parte superior responsável pela captação e inserção de ar atmosférico no líquido a ser tratado. A hélice era

acoplada a haste e, esta hélice, possuía envolta, em tubo de PVC perfurado. O objetivo desta tubulação era promover um maior arraste no meio líquido por intermédio da hélice;

- **14 – Tanque após aeração:** tanque de PVC com dimensões 0,25m de diâmetro e 1,5m de altura, destinado a receber a água tratada pelos processos de aeração. Após este tanque, a água, por bombeamento, era enviada para a fase de polimento do tratamento (filtro de adsorção);
- **15 - Bomba de recalque 3:** responsável pelo bombeamento da água tratada nos processos de aeração para o filtro de adsorção (Moto bomba Schneider, monobloco, modelo BCR 2000, ferro fundido com rotor em noryl de alta dureza, vedação por selo mecânico com flange incorporado, com motor elétrico de 1/3 CV, monofásico, 60Hz, 220V);
- **16 – Filtro de Adsorção:** filtro confeccionado em PVC de dimensões 0,25m de diâmetro e 1,24m de altura. Meio filtrante constituído por camada (espessura de 0,71m) de mistura, em volume, de 50% carvão ativado e 50% cinza de casca de arroz. O objetivo deste tratamento era o polimento da água e garantia de remoção dos contaminantes;
- **17 – Reservatório de água subterrânea contaminada sintética tratada:** reservatório de fibra de vidro com capacidade de 5.000 litros destinada a armazenamento da água subterrânea contaminada sintética tratada pelo sistema de remediação.

O processo de tratamento deu-se da seguinte maneira:

- **Etapa de sucção (Figura 22 números de 4 a 11):** efetuou-se o processo de bombeamento por sucção da água subterrânea. O tratamento ocorre, em parte pela volatilização de compostos orgânicos pela pressão negativa proporcionada (- 700 mm Hg) e em parte por “air stripping” (sendo especialmente eficiente aos BTEX). A saída desses gases se dá pela parte número 11 do equipamento. A vazão de tratamento da água neste ponto era de cerca de 0,027 L/s.
- **Etapa de aeração (Figura 22 números de 11 a 13):** processo de aeração por ar difuso (aeradores por aspiração), aonde a hélice na extremidade inferior (imersa no líquido), ao girar, criava uma subpressão, succionando o ar atmosférico de

uma ranhura situada na parte superior (fora do líquido). O ar era difundido no meio líquido na forma de pequenas bolhas, responsáveis pela oxigenação e mistura da massa líquida. O processo de remoção dos VOC's, da mesma forma que a etapa de sucção, era por "air stripping", porém com ingresso apenas de oxigênio. A saída dos gases se dava pela parte número 11 do equipamento. A vazão de tratamento de água no aerador era de 0,026 L/s e do aerador 2 de 0,40 L/s. Mais detalhadamente, a Figura 23 apresenta um esquema do equipamento.

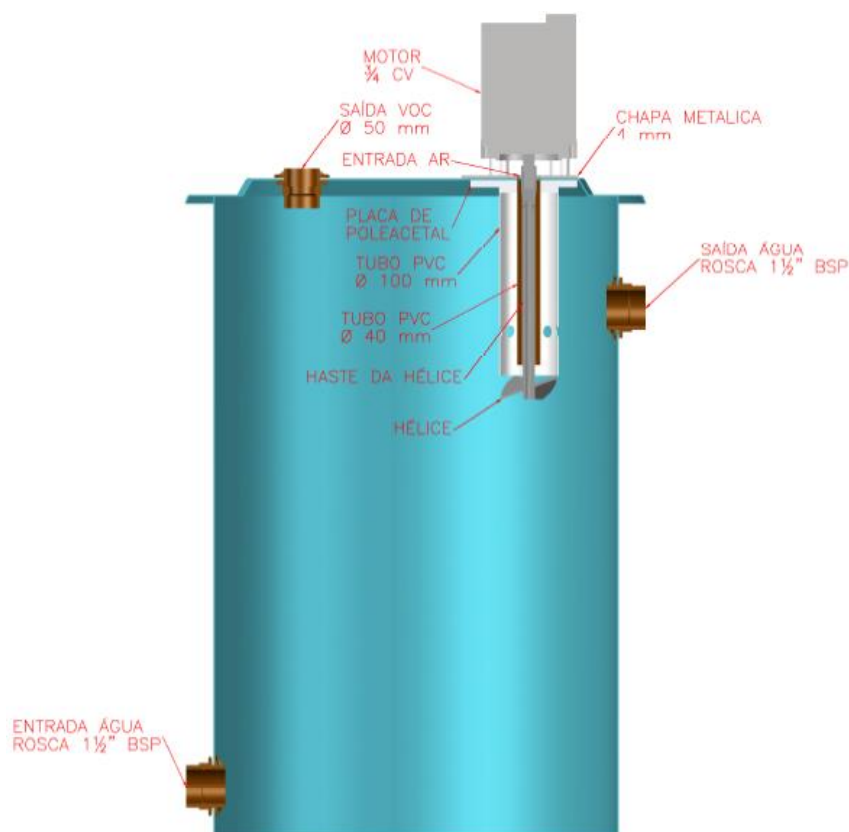


Figura 23: Corte do aerador (dimensões em milímetros)

- **Etapa de adsorção (Figura 22 número 16):** a água subterrânea fluía através da coluna mista (adsorventes: 50% carvão ativado e 50% cinza de casca de arroz). Neste processo os contaminantes remanescentes na água se separavam gradualmente sendo adsorvidos pelo recheio, purificando a água progressivamente até a saída do filtro. Nos experimentos realizados em escala piloto, utilizou-se a massa de adsorvente de 33,1 kg de cinza de casca de arroz e 29,6 kg de carvão ativado. Isso corresponde a um volume de recheio de 0,034

m<sup>3</sup>. Vazão de entrada de água igual a 0,04 L/s e velocidade de percolação de 0,08 cm/s.

#### 4.3.4 Testes hidráulicos do sistema de remediação

Com perfil de solo executado e equipamentos de remediação instalados, fez-se alguns teste hidráulicos do perfil de solo e do sistema de remediação. Executou-se os seguintes testes:

- **Ensaio de permeabilidade no perfil de solo:** os ensaios seguiram as recomendações de OLIVEIRA & CORRÊA FILHO (1996). Foram executados 6 testes com utilização de medidor de nível e cronômetro. As medições foram realizadas no poço de sucção construído (nº 4 da Figura 21). Foi obtido coeficiente de permeabilidade igual a  $7,0 \times 10^{-2}$  m/s. Se comparado ao solo natural ( $3,48 \times 10^{-6}$  m/s), apresentado anteriormente nesta pesquisa, percebe-se que o solo sintético é bem mais permeável. Isto é justificado pela necessidade de garantir uma permeabilidade adequada da água contaminada para ingresso no sistema de tratamento.
- **Medição de vazão do sistema de remediação:** com proveta e cronômetro foram executadas 05 medições de vazão nos seguintes pontos do sistema, conforme pode ser visualizado na Figura 21: Entrada do aerador 1 (nº 8); entrada do aerador 2 (nº 12); entrada do filtro de adsorção (nº 14) e saída do filtro de adsorção (nº 16). As medições demonstraram que o sistema funciona a uma vazão de 0,031 L/s, ou seja, para o tratamento da totalidade dos 5.000 litros de água subterrânea contaminada sintética, são necessárias, aproximadamente, 45 horas. Isto corresponde a um tempo de detecção hidráulico de 8 horas.



#### 4.3.5 Ensaios de eficiência do tratamento

A eficiência do sistema foi testada através de 06 ensaios realizados no experimento detalhado anteriormente. As características destes ensaios estão relatadas na Tabela 14. Os pontos de amostragens citados na Tabela 15 foram representados graficamente na Figura 14 anteriormente demonstrada.

Tabela 14: Características dos ensaios realizados em escala piloto

Ensaio	Concentração de Gasolina e Diesel	Tempo (minutos)	Local de Amostragem
1	5L (gasolina) + 5L (diesel)	0*, 60, 120, 180, 240*	PS, S, A1, A2, FA
2	5L (gasolina) + 5L (diesel)	0*, 60, 120, 180, 240*	PS, S, A1, A2, FA
3	5L (gasolina) + 5L (diesel)	0*, 60, 120, 180, 240*	PS, S, A1, A2, FA
4	10L (gasolina) + 10L (diesel)	0*, 60, 120, 180, 240*	PS, S, A1, A2, FA
5	10L (gasolina) + 10L (diesel)	0*, 60, 120, 180, 240*	PS, S, A1, A2, FA
6	10L (gasolina) + 10L (diesel)	0*, 60, 120, 180, 240*	PS, S, A1, A2, FA

Legenda: PS (poço de sucção), S (sucção), A1 (aerador 1), A2 (aerador 2) e FA (Filtro de Adsorção).

\* Período de tempo aonde houve coleta do PS e execução de coleta e análise dos parâmetros: cor, turbidez e sólidos suspensos.

Nos ensaios foram medidos os parâmetros:

- BTEX (EPA 8260) – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno;
- TPH DRO (EPA 3510 c/ EPA 8015 D) – C10-C28 – faixa do diesel;
- TPH GRO (EPA 8015) – C6-C10 – faixa da gasolina;
- TPH Total (EPA 3510 c/ EPA 8015 D – C8-C40).

Além desses, ainda Temperatura, Sólidos Suspensos, Cor Aparente e Verdadeira, Turbidez e pH (APHA, 1995). Para os dois últimos ensaios (ensaio 5 e 6) realizou-se, ainda, o ensaio de alcalinidade para os tempos 0 e 240 minutos, conforme APHA (1995). As análises dos parâmetros BTEX e TPH, foram executadas por laboratório terceirizado anteriormente avaliado no ensaio bilateral.

#### 4.4 ENSAIOS EM ESCALA REAL

Também realizou-se testes do equipamento em escala real. O estudo de caso foi executado no Posto B o qual estava em remediação ativa.

Devido a ser uma instalação em escala real, não foi possível executar avaliações de água subterrânea entre os aeradores conforme no experimento em escala piloto. Também não foi possível a instalação do filtro de adsorção.

Assim, a Figura 24 apresenta um esquema do sistema instalado no Posto B. Os pontos de amostragem para verificação da eficiência do tratamento dos ensaios realizados foram: S (entrada do tanque de equalização – número 6) e A (saída do 2º aerador – número 9).

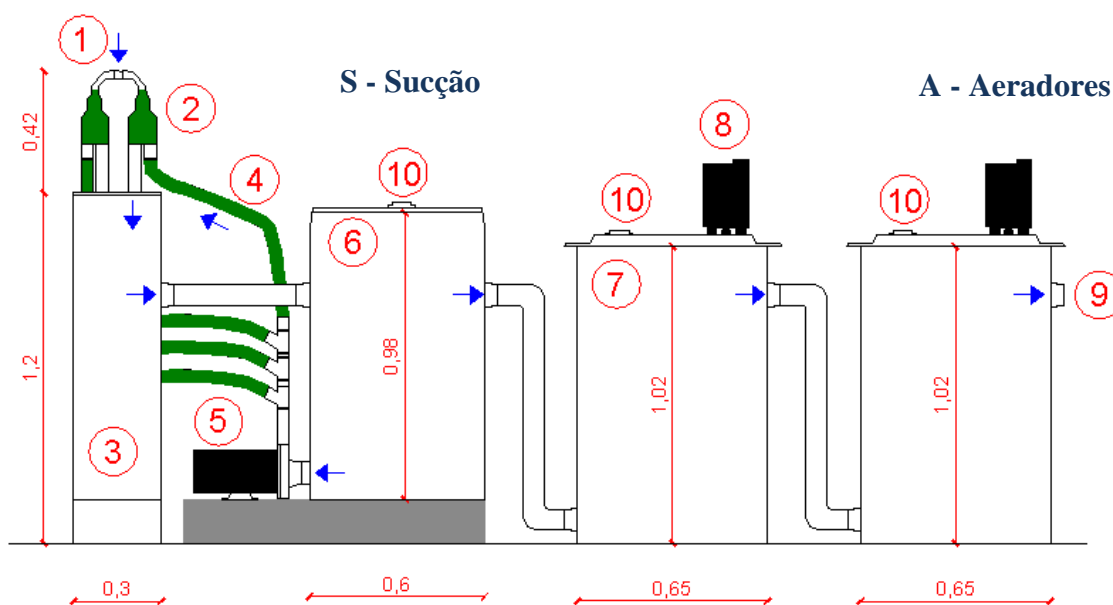


Figura 24: Corte esquemático do sistema de remediação instalado no Posto B (medidas em metros)

Observação: as setas representam o sentido do fluxo de água no sistema

Os números de 1 a 10 mostrados na Figura 24 representam os seguintes acessórios / equipamentos do sistema:

- **1 – Entrada de água:** este ponto representava a entrada de água subterrânea contaminada a qual era succionada, a partir dos poços de sucção, pelo vácuo promovido pelo injetor (ver número 2);

- **2 – Equipamento Injetor tipo “venturi”:** equipamento com duas entradas. A 1ª refere-se a entrada de água subterrânea contaminada proveniente de poços de sucção e/ou monitoramento e a 2ª é a entrada da água bobeada proveniente do fundo do tanque de equalização (ver número 6). A água que entrava nesta 2ª provocava o arraste e, conseqüentemente, o vácuo que promovia a entrada da água subterrânea pela 1ª entrada (Injetores modelo 12-36 1.1/2 x 1.1/4);
- **3 – Reservatório de água:** reservatório de PVC responsável pelo recebimento de água proveniente dos poços de sucção e, pela tubulação superior, transportava esta água para o Tanque de Equalização (ver número 6);
- **4 – Mangueira:** mangueira de borracha (cor verde oliva) que suporta alta pressão responsável pela circulação de água contaminada do tanque de equalização e reservatório de água;
- **5 - Bomba de recalque:** responsável pelo bombeamento / recirculação da água do fundo do tanque de equalização para o injetor (Conjunto moto bomba Schneider, monobloco, modelo BC 92SHA, ferro fundido, conexão de sucção 1.1/2" (rosca tipo BSP), recalque 1.1/4" (BSP), motor alumínio, vedação selo mecânico, motor elétrico 1,5CV, 3550 RPM, monofásica, 60Hz, 220V, proteção IP2);
- **6 – Tanque de equalização:** bombona de plástico que servia como abatimento de água devido a grande presença de bolhas no sistema. A água que era armazenada neste tanque era bombeada para uma das entradas do injetor com o objetivo de formação do vácuo;
- **7 – Tanque de aeração:** reservatório em estrutura de fibra de vidro destinado a receber água/efluentes contaminados por hidrocarbonetos. Incluía: dreno de gases voláteis e tampa com motor e hélice de aeração;
- **8 – Conjunto de aeração por superfície:** conjunto composto por bomba (Motor voges 3/4 CV 4 pólos 110/220V c/ Flange FC 14), haste e hélice em aço inox responsável pela aeração do meio líquido e execução do processo de “stripping”. A haste era vazada e possuía furo na parte superior responsável pela captação e inserção de ar atmosférico no líquido a ser tratado. A hélice era acoplada a haste e, esta hélice, possuía envolta, em tubo de PVC perfurado. O objetivo desta

tubulação era promover um maior arraste no meio líquido por intermédio da hélice;

- **9 – Saída de água tratada:** saída localizada de forma oposta a entrada, responsável pelo transporte da água já tratada para parte externa do tanque;
- **10 - Dreno de gases:** saída localizada no topo dos equipamentos responsável pela retirada de gases voláteis proveniente do processo de tratamento por “stripping”. A partir dessa saída, os gases eram transportados por tubulação até sistema de adsorção;

As especificações dos equipamentos, bem como os processos envolvidos no tratamento são os mesmos descritos anteriormente na apresentação dos ensaios em escala piloto, com exceção do tratamento de adsorção que não foi utilizado neste teste. O experimento levou em consideração 5 ensaios (Tabela 15).

Tabela 15: Características dos ensaios realizados em escala real (Posto B)

Ensaio	Tempo (minutos)	Local de Amostragem
1	0, 240	PS1, PS2, PS7
	0, 60, 120, 180, 240	S, A
2	0, 240	PS1, PS2, PS7
	0, 60, 120, 180, 240	S, A
3	0, 240	PS1, PS2, PS7
	0, 60, 120, 180, 240	S, A
4	0, 240	PS1, PS2, PS7
	0, 60, 120, 180, 240	S, A
5	0, 240	PS1, PS2, PS7
	0, 60, 120, 180, 240	S, A

**Legenda: PS (Poço de Sucção), S (Sucção), A (Aeração)**

Em todos os ensaios foram medidos os parâmetros BTEX (EPA 8260), TPH C8-C40 (EPA 3510 e EPA 8015), TPH GRO (EPA 8015), Temperatura e pH (APHA, 1995). As análises dos parâmetros BTEX e TPH, foram executadas por laboratório terceirizado.

#### 4.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente utilizando o software SPSS versão 22 para Windows. Em alguns casos, quando possível, foi realizado o teste ANOVA e teste de TUKEY de forma a verificar a variabilidade e significância dos resultados obtidos. A Tabela 16 apresenta um resumo das análises realizadas.

Tabela 16: Resumo das análises estatísticas realizadas.

<b>Análise Estatística</b>	<b>Objetivo</b>
Dados obtidos da concentração inicial nos poços de sucção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar se existiu similaridade da concentração inicial nos diferentes ensaios realizados;</li> </ul>
Resultados obtidos nos ensaios do poço, sucção, aeração e adsorção (Decréscimo de BTEX, TPH, Turbidez, Cor e Sólidos Suspensos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar se existiu diferença significativa entre os resultados obtidos no poço de sucção e etapas do tratamento (sucção, aeração e adsorção);</li> <li>• Confirmar a eficiência do equipamento;</li> <li>• Verificar a necessidade de utilização de todas etapas do tratamento;</li> </ul>
Resultados obtidos nos ensaios do poço, sucção, aeração e adsorção (Decréscimo de BTEX, TPH, Turbidez, Cor e Sólidos Suspensos em relação ao tempo de monitoramento).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar a influência do tempo de monitoramento no tratamento executado;</li> </ul>
Resultados obtidos nos ensaios do poço, sucção, aeração e adsorção (Decréscimo de BTEX e TPH em relação a temperatura e pH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar a influência dos parâmetros temperatura e pH no tratamento da água contaminada por BTEX e TPH;</li> </ul>

Como tratamento dos dados, suprimiu-se 4% destas para obtenção de um melhor coeficiente de variação. Utilizou-se intervalo de confiança de 95%, sendo que diferenças significativas foram apresentadas nos resultados com valores abaixo de 0,05.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequencia apresentada na metodologia, o capítulo a seguir traz os resultados acerca do trabalho desenvolvido. São divididos em 3 subcapítulos: 5.1 – Caracterização da água subterrânea; 5.2 – Ensaio em Escala Piloto; 5.3 – Ensaio em Escala Real.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A Tabela 17 apresenta os resultados de caracterização de água subterrânea em 03 postos de combustíveis de Porto Alegre/RS. Verifica-se que compostos como BTEX e TPH estão presentes, contaminando as águas subterrâneas. Além disso, pode-se observar que o nível de benzeno excede o valor de investigação previsto na Resolução CONAMA nº 420 de 2009 em quase todas as amostragens efetuadas. Em algumas situações os níveis ficam extremamente críticos, como na 4ª amostragem do Posto B, quando os níveis de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno ultrapassam a concentração de investigação.

A importância desta caracterização está relacionada a definição das concentrações de contaminantes a serem testadas no equipamento desenvolvido por esta pesquisa. Percebe-se, observado a Tabela 17, muita variabilidade dos resultados em todos os parâmetros. Benzeno por exemplo, têm-se medições que variam de 1,7 até 3072,3 µg/L.

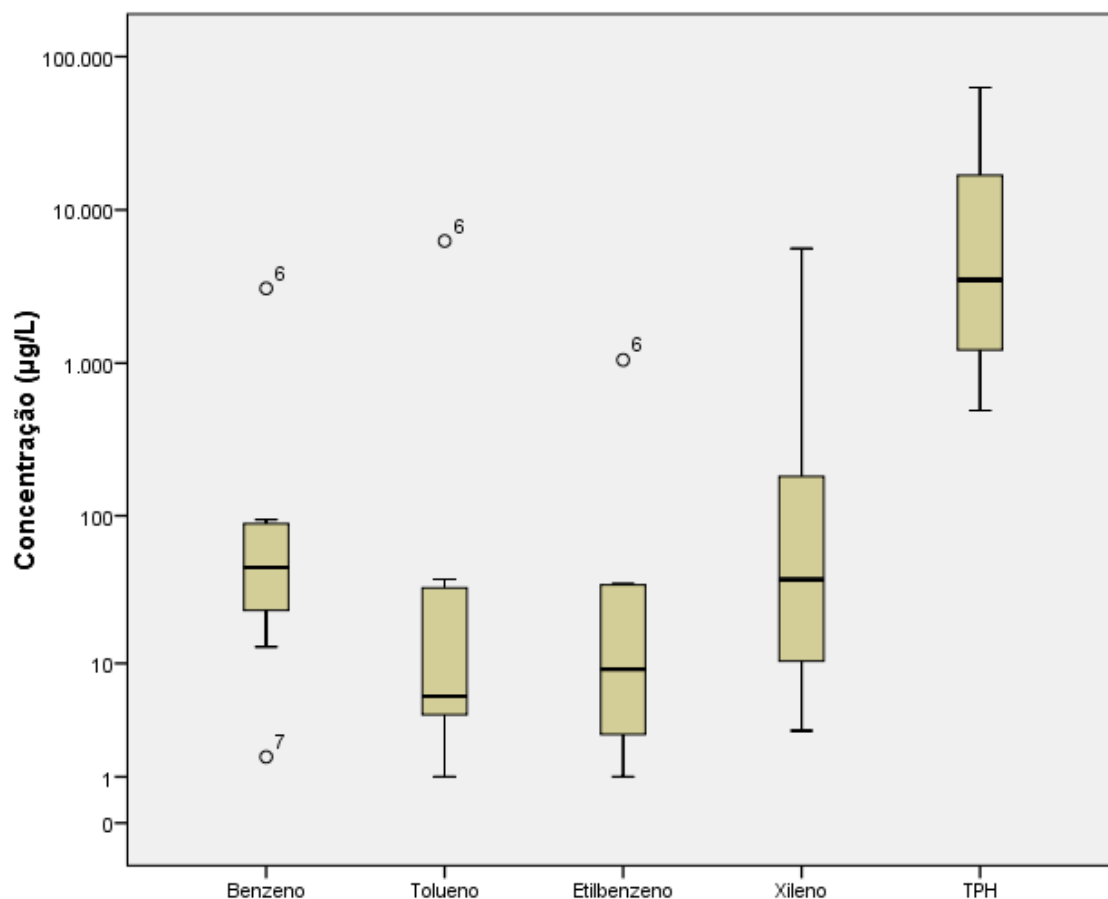
Tabela 17: Concentrações de BTEX e TPH da água subterrânea próximo a 3 postos de combustíveis no município de Porto Alegre.

Posto	Coleta	Concentração água Subterrânea (µg/L)				
		Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno	TPH
A	28/02/2011	41,3	37,9	34,4	179	12617
	14/04/2011	45,4	5,71	35,2	183	22391
B	16/06/2011	13,1	4,1	2	6,7	490
	26/10/2011	83,3	29,1	9,07	37,8	631,5
	26/10/2011	94,4	4,07	3,79	15,8	2348,5
	26/10/2011	3072,3	6267,7	1049,2	5596,4	62833,8
C	18/07/2011	1,7	<1	<1	<3	3500
<b>Máximo</b>		<b>3072,3</b>	<b>6267,7</b>	<b>1049,2</b>	<b>5596,4</b>	<b>62833,8</b>
<b>Mínimo</b>		<b>1,7</b>	<b>4,1</b>	<b>2,0</b>	<b>6,7</b>	<b>490,0</b>
<b>Nível de Investigação</b>		<b>5</b>	<b>700</b>	<b>300</b>	<b>500</b>	<b>-</b>
<b>CONAMA nº</b>						
<b>420/2009</b>						

Estas variabilidades e altas taxas de contaminantes também é uma realidade em outras cidades brasileiras e a nível mundial. EPA (1997b), por exemplo, demonstra no estudo realizado nos Estados Unidos, concentrações iniciais de BTEX variando entre 6 e 24 mg/L. Para o parâmetro benzeno, esta variação é de 3 a 600 mg/L. BASS *et al.* (2000) a partir de um levantamento de dados de 49 estudos de casos de áreas contaminadas nos Estados Unidos, verificou concentrações iniciais de contaminação por BTEX variando entre 24 até 198.000 µg/L. Para TPH os autores encontraram concentrações iniciais de 240 até 34.000 µg/L. No nordeste da Alemanha, o estudo de AFFERDEN *et al.* (2011) apresentou concentrações iniciais (pós acidente ocorrido em 2007) de benzeno variando entre 13.046 até 18.625 µg/L; tolueno de 6,7 até 8,0 µg/L; etilbenzeno de 31,0 até 50,0 µg/L; Xileno de 63,7 até 82,5 µg/L. Na Áustria, o trabalho de WIRTHENSOHN *et al.* (2009) mostrou contaminantes na água subterrânea variando entre 295 - 806 µg/L para BTEX e 247 - 547 µg/L para Benzeno. Em Taiwan, CHEN *et al.* (2010) apresenta concentrações iniciais de BTEX variando entre 39 - 2838 µg/L (Benzeno = 15 - 743 µg/L; Tolueno = 2 - 712 µg/L; Etilbenzeno = 6 - 419 µg/L; Xileno

= 16 - 964  $\mu\text{g/L}$ ). Já Brasil, os dados relacionados a contaminação do aquífero freático da Refinaria Duque de Caxias no Rio de Janeiro apresentados por ABDANUR & NOLASCO (2005), demonstram concentrações iniciais de BTEX variando entre 9,748 mg/L até 65,883 mg/L. Para benzeno a variação era de 0,747 mg/L até 11,433 mg/L MARIANO *et al.* (2007) relata concentrações iniciais de contaminantes em Santa Bárbara d'Oeste (São Paulo) variando entre 56,1 até 4702  $\mu\text{g/L}$  de BTEX (Benzeno: 4,0 - 57,0  $\mu\text{g/L}$ ; Tolueno: 4,0 - 69,0  $\mu\text{g/L}$ ; Etilbenzeno: 4,0 - 4330  $\mu\text{g/L}$ ; Xileno: 4,0 - 372  $\mu\text{g/L}$ ).

A Figura 25 além de demonstrar a alta concentração dos compostos BTEX e TPH na água subterrânea dos 3 postos de combustíveis avaliados, deixa evidente a grande variabilidade das concentrações.



**Figura 25: Variabilidade das concentrações de BTEX e TPH na água subterrânea dos 3 postos de combustíveis avaliados**



Para a coleta do Posto A do dia 28 de fevereiro de 2011, fez-se também uma verificação de outros parâmetros físico-químicos, os quais estão apresentados na Tabela 18. Os resultados apresentados na Tabela 19 demonstram a presença, além de TPH e BTEX, de outros contaminantes, como coliformes, fósforo e nitrogênio. Percebe-se que estes compostos não estão relacionados a operação e/ou vazamento de combustível do local. Na realidade, indicam a contaminação por outras fontes, provavelmente esgoto doméstico.

Tabela 18: Características físico-químicas da água subterrânea do Posto A.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Turbidez	NTU	54
pH	-	6,89
Condutividade	uS/cm	697
DBO	mg/L O <sub>2</sub>	172
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	197,4
OD	mg/L O <sub>2</sub>	0,404
COT	mg/L	230,7
Nitrogênio Total	mg/L N*	2,92
Nitrogênio Amoniacal	mg/L N	3,01
Nitrogênio Orgânico	mg/L N	0,4
Alcalinidade Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	67,3
Alcalinidade Parcial	mg/L CaCO <sub>3</sub>	0
Fósforo	mg/L PO <sub>4</sub>	0,673
Sólidos Totais	mg/L	534
Sólidos Suspensos	mg/L	79
Sólidos Dissolvidos	mg/L	524
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	12
Coliformes Totais	NMP/100mL	> 23

## 5.2 ENSAIOS EM ESCALA PILOTO

Na sequência estão apresentados e discutidos os resultados referente aos ensaios executados em escala piloto, conforme detalhado anteriormente na metodologia. Os resultados completos (de todos os ensaios) do monitoramento do poço de sucção e do tratamento para os diferentes equipamentos testados por esta pesquisa estão apresentados no Apêndice I.

Comparando os laudos físico-químicos de cada ensaio, percebe-se que para cada parâmetro há uma quantificação aonde o valor mínimo depende do limite de detecção do equipamento. Benzeno (limite de detecção do equipamento igual a 0,44 µg/L); Tolueno (limite de detecção do equipamento igual a 0,43 µg/L); Etilbenzeno (limite de detecção do equipamento igual a 0,42 µg/L); Xileno (limite de detecção do equipamento igual a 1,28 µg/L); TPH GRO (limite de detecção do equipamento igual a 0,35 µg/L); TPH DRO e Total (limite de detecção do equipamento igual a 1,00 µg/L). Assim, para análise dos dados, adotou-se este resultado como o valor mínimo. Assim, quando no laudo aparece, por exemplo, benzeno < 0,44 µg/L; adotou-se o resultado benzeno = 0,44 µg/L.

### 5.2.1 Resultados da água subterrânea contaminada usada nos ensaios piloto

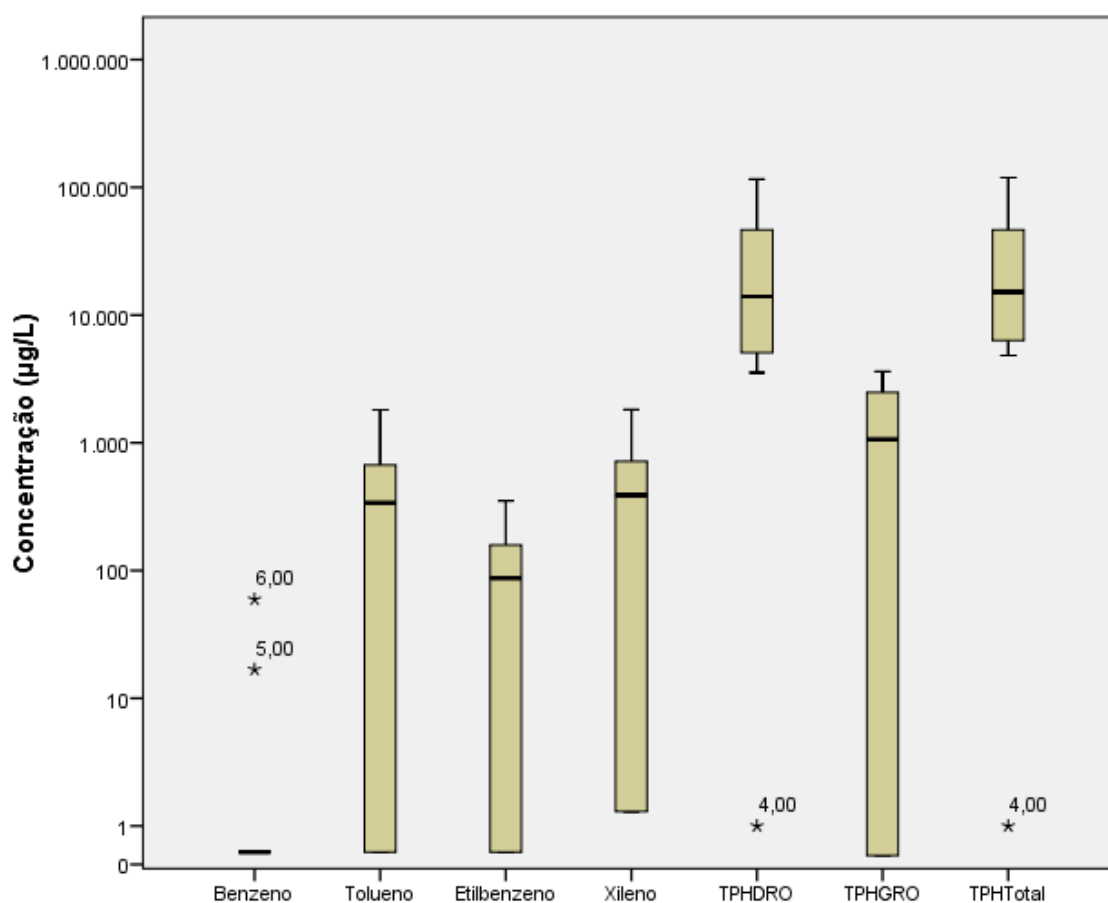
Como controle dos ensaios fez-se a coleta e análise do poço de sucção instalado. As coletas foram realizadas no início e no fim da operação em batelada com 240 minutos.

Duas observações são importantes de serem especificadas a respeito deste ensaio: 1) na grande maioria dos ensaios, o parâmetro benzeno não foi identificado; 2) quando inseridos 0,2% de diesel e 0,2% de gasolina, a concentração dos contaminantes não aumentaram, conforme o esperado.

O primeiro caso pode ser justificado pela velocidade de volatilidade do benzeno. Estima-se que ao fazer a mistura dos contaminantes com água, já houve perda destas

concentrações. No segundo caso, percebeu-se dificuldades em dissolver o diesel e a gasolina na água devido as grandes proporções de volume, diferentemente, daqueles utilizado para os testes de laboratório. Notou-se presença de fase livre no reservatório, o que confirma esta hipótese.

A Figura 26 ilustra todos os resultados do poço de monitoramento da água subterrânea utilizada no experimento em escala piloto para os parâmetros BTEX e TPH.



**Figura 26: Gráfico demonstrando a variabilidade dos parâmetros BTEX e TPH para água subterrânea contaminada sintética.**

Para verificar a variabilidade dos dados do monitoramento do poço de sucção em todos os ensaios, fez-se um teste ANOVA utilizando o software SPSS como ferramenta de análise. A Tabela 19 demonstra os parâmetros e índice de significância conforme teste ANOVA.

Tabela 19: Teste ANOVA para os resultados de água subterrânea contaminada (Poço de Sucção), considerando todos os ensaios.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Significância</b>
Benzeno	µg/L	6,7	17,3	59,5	0,4	0,538
Tolueno	µg/L	449,6	513,3	1813,0	0,4	0,122
Etilbenzeno	µg/L	112,2	122,0	352,0	0,4	0,829
Xileno	µg/L	548,8	644,0	1819,0	1,3	0,831
TPH DRO	µg/L	30123,8	36578,1	115682,0	1,0	0,419
TPH GRO	µg/L	1415,9	1421,5	3611,0	0,3	0,769
TPH Total	µg/L	31534,6	37186,6	119293	1,0	0,449
Temperatura	°C	24,5	2,7	29,0	20,0	0,155
VOC's	ppm	490,0	714,3	2380,0	0,0	0,142
Cor	mg/L	2517,7	2785,3	10147,6	304,1	0,678
Aparente	Pt/Co					
Cor	mg/L	105,2	107,8	318,0	0,0	0,008*
Verdadeira	Pt/Co					
pH	pH	6,2	0,2	6,5	5,8	0,025*
Turbidez	NTU	353,6	228,7	914,0	109,0	0,782
Sólidos	mg/L	2385,8	2636,0	10194,0	371,0	0,585
Suspensos						

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados

Este teste ANOVA realizado mostra que não houve diferenças significativas, comparando as concentrações iniciais de contaminantes da água subterrânea sintética na entrada do sistema em todos os ensaios. Diferença significativas apenas foram obtidas para cor verdadeira e pH (resultados marcados com asterisco na Tabela).

O resultado obtido significa dizer que os 06 ensaios realizados no experimento em escala piloto, montado na Unisinos, foram similares entre si. Assim não houve variância entre as concentrações iniciais dos parâmetros BTEX e TPH no poço de sucção.

## 5.2.2 Resultados do tratamento ao longo do experimento

Avaliando os tipos de tratamento em função dos tempos de monitoramento utilizados nos ensaios, obteve-se o comportamento de cada parâmetro analisado. Os resultados na íntegra estão apresentados no Apêndice I.

### 5.2.2.1 Parâmetros: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno

As Figuras 27 até 30, demonstram o comportamento dos parâmetros benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, respectivamente, e a comparação com o valor de investigação para água subterrânea prevista pela CONAMA 420 (2009). Cabe ressaltar conforme anteriormente relatado, a dificuldade na obtenção do parâmetro benzeno nos ensaios realizados.

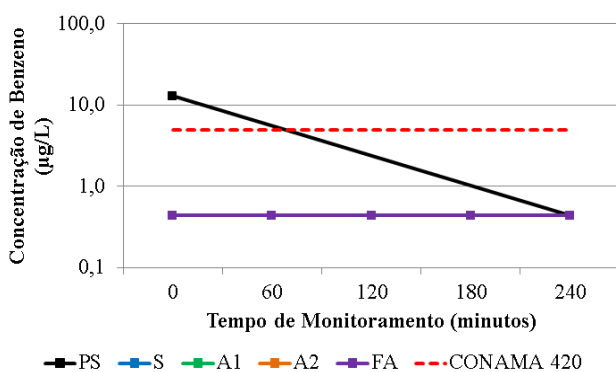


Figura 27: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Benzeno ao longo do experimento.

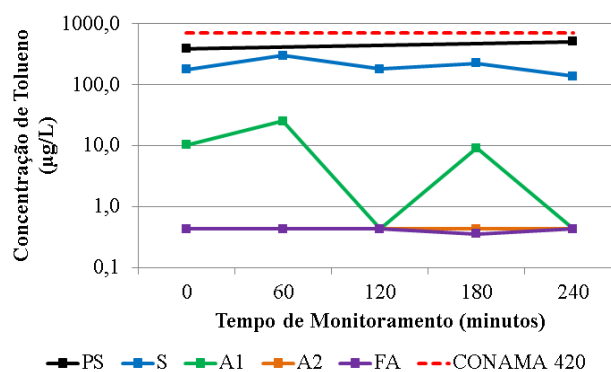
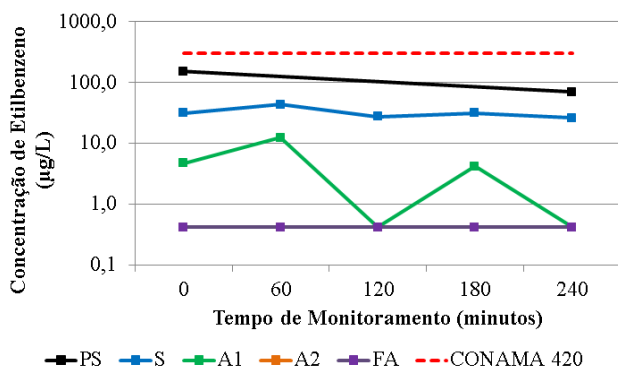
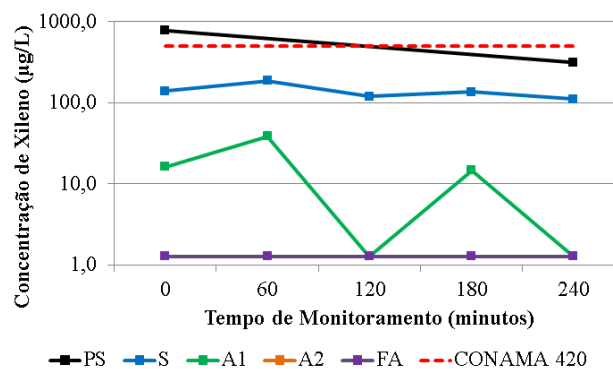


Figura 28: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Tolueno ao longo do experimento.



**Figura 29: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Etilbenzeno ao longo do experimento.**



**Figura 30: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Xileno ao longo do experimento.**

O teste ANOVA demonstra a diferença significativa entre os resultados das concentrações de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno comparando o poço de sucção, sucção, aeradores e filtro de adsorção, o que confirma a eficiência do equipamento.

Porém, na análise de Tuckey (Tabela 20), percebe-se que as diferenças significativas estão relacionadas aos resultados comparando o Poço de Sucção em relação à Sucção (para todos os parâmetros analisados). Há diferenças significativas também para o tolueno e etilbenzeno se comparar os resultados de sucção com o aerador 2 e filtro de adsorção. Comparando os dois aeradores entre si e, os aeradores em relação ao filtro de adsorção, não há diferenças significativas nos resultados obtidos. Pode-se afirmar que, para os parâmetros BTEX, há necessidade apenas do equipamento de sucção, não necessitando dos outros equipamentos estudados (A1, A2 e FA).

Tabela 20: Teste de Tuckey comparando os resultados de BTEX do poço de sucção com o equipamento (sucção, aeradores e filtro de adsorção).

Tratamento	Faixa	Significância	Significância	Significância	Significância
		Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
PS	S	0,004*	0,004*	0,000*	0,000*
	A1	0,004*	0,000*	0,000*	0,000*
	A2	0,004*	0,000*	0,000*	0,000*
	FA	0,004*	0,000*	0,000*	0,000*
S	A1	1,000	0,002*	0,074	0,146
	A2	1,000	0,001*	0,027*	0,084
	FA	1,000	0,001*	0,029*	0,088
A1	A2	1,000	1,000	0,996	0,999
	FA	1,000	1,000	0,996	0,999
A2	FA	1,000	1,000	1,000	1,000

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados

Para verificar a influência do tempo de monitoramento no decréscimo do BTEX e TPH, fez uma análise ANOVA e Tuckey. A Tabela 21 mostra os resultados desta análise estatística.

Tabela 21: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para BTEX.

Local	Significância	Significância	Significância	Significância
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
Poço de Sucção	0,223	0,711	0,257	0,226
Sucção	1,000	0,886	0,952	0,960
Aerador 1	1,000	0,351	0,329	0,355
Aerador 2	1,000	**	1,000	**
Filtro de Adsorção	1,000	0,426	1,000	**

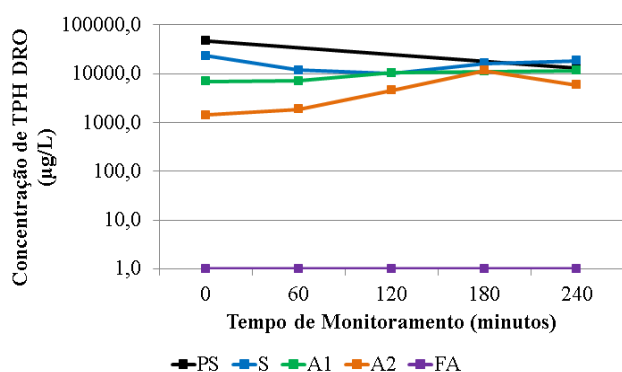
OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados / \*\* Sem possibilidade de execução do teste devido aos resultados serem iguais na comparação entre os tempos.

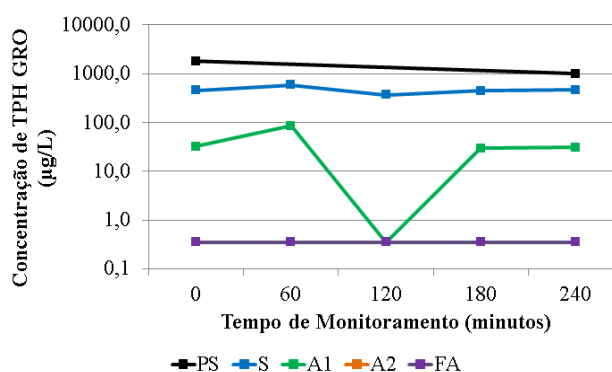
A Tabela 21 demonstra que o tempo de monitoramento não interferiu significativamente para o decréscimo dos compostos estudados.

### 5.2.2.2 Parâmetros: TPH DRO, TPH GRO e TPH Total

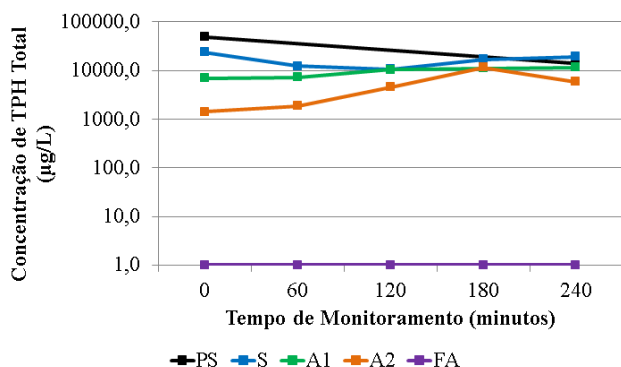
Em relação ao TPH, as Figuras 31 até 33 demonstram os resultados obtidos nos ensaios em função do tempo de monitoramento. Percebe-se para o TPH GRO um comportamento similar aos gráficos apresentados relativos à BTEX. Isto, logicamente, está relacionado à quantidade de carbonos existente nos parâmetros enquadrados nesta faixa.



**Figura 31:** Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH DRO ao longo do experimento.



**Figura 32:** Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH GRO ao longo do experimento.



**Figura 33:** Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH Total ao longo do experimento.



O teste ANOVA demonstra a diferença significativa entre os resultados das concentrações de TPH DRO, TPH GRO e TPH Total comparando o poço de sucção, sucção, aeradores e filtro de adsorção, o que confirma a eficiência do equipamento.

Porém, na análise de Tuckey (Tabela 22), percebe-se que as diferenças significativas estão relacionadas aos resultados comparando o Poço de Sucção em relação a Sucção (para todos os parâmetros analisados). Há diferenças significativas também entre a sucção e o aerador 2 e sucção e o filtro de adsorção. Avaliando os resultados entre os aeradores e entre os aeradores e o filtro de adsorção, não há diferenças significativas. Estes dados permite optar pela exclusão dos aeradores do sistema de tratamento, optando por manter apenas a sucção seguida do filtro de adsorção.

Tabela 22: Teste de Tuckey comparando os resultados de TPH do poço de sucção com o equipamento (sucção, aeradores e filtro de adsorção).

Tratamento	Faixa	Significância	Significância	Significância
		TPH DRO	TPH GRO	TPH Total
PS	S	0,040*	0,000*	0,025*
	A1	0,000*	0,000*	0,000*
	A2	0,000*	0,000*	0,000*
	FA	0,000*	0,000*	0,000*
S	A1	0,377	0,010*	0,319
	A2	0,027*	0,004*	0,020*
	FA	0,000*	0,005*	0,000*
A1	A2	0,759	0,999	0,759
	FA	0,091	0,999	0,098
A2	FA	0,660	1,000	0,673

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados

Avaliando a influência no tempo de monitoramento nos resultados obtidos no poço de sucção, sucção, aeradores e filtro de adsorção; para os parâmetros TPH, os testes ANOVA e Tuckey demonstram que o tempo de monitoramento não interfere

significativamente para o decréscimo dos compostos estudados. A Tabela 23 mostra os resultados desta análise estatística.

Tabela 23: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para TPH

Local	Significância	Significância	Significância
	TPH DRO	TPH GRO	TPH Total
Poço de Sucção	0,108	0,344	0,105
Sucção	0,576	0,978	0,547
Aerador 1	0,906	0,552	0,908
Aerador 2	0,133	1,000	0,133
Filtro de Adsorção	**	1,000	**

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados / \*\* Sem possibilidade de execução do teste devido aos resultados serem iguais na comparação entre os tempos.

### 5.2.2.3 Parâmetros: cor aparente, turbidez e sólidos suspensos

As Figuras 34 até 36 demonstram o monitoramento e a cinética do tratamento para os parâmetros cor aparente, turbidez e sólidos suspensos respectivamente.

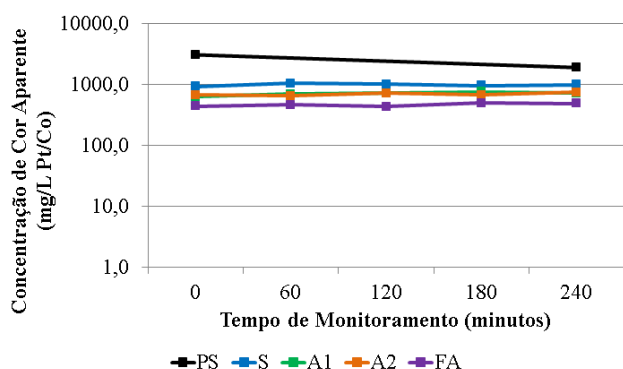


Figura 34: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Cor Aparente ao longo do experimento.

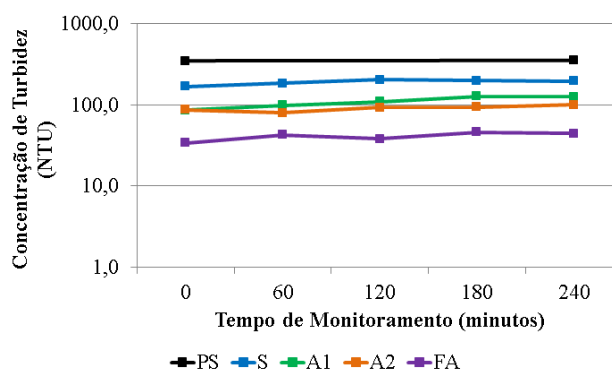
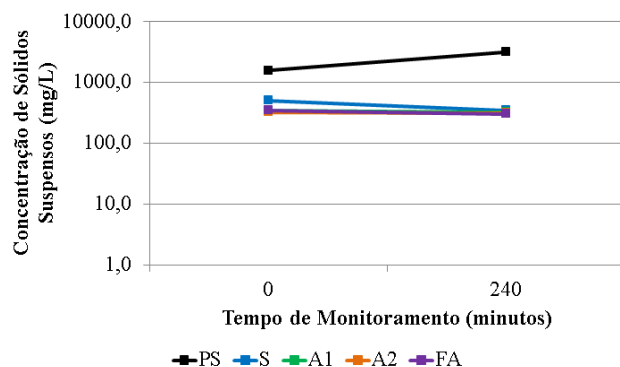


Figura 35: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Turbidez ao longo do experimento.



**Figura 36: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Sólidos Suspensos ao longo do experimento.**

Similar ao encontrado nos outros parâmetros, o teste ANOVA demonstra a diferença significativa entre os resultados das concentrações de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos comparando o poço de sucção, sucção, aeradores e filtro de adsorção. A Tabela 24 mostra os resultados da análise de Tuckey.

Tabela 24: Teste de Tuckey comparando os resultados de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos do poço de sucção com o equipamento (sucção, aeradores e filtro de adsorção).

Tratamento	Faixa	Significância	Significância	Significância
		Cor Aparente	Turbidez	Sólidos Suspensos
PS	S	0,000*	0,000*	0,005*
	A1	0,000*	0,000*	0,003*
	A2	0,000*	0,000*	0,003*
	FA	0,000*	0,000*	0,003*
S	A1	0,704	0,001*	1,000
	A2	0,667	0,000*	1,000
	FA	0,128	0,000*	1,000
A1	A2	1,000	0,888	1,000
	FA	0,808	0,009)	1,000
A2	FA	0,838	0,109	1,000

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados

Na análise de Tuckey (Tabela 25), percebe-se que as diferenças significativas estão relacionadas aos resultados comparando o Poço de Sucção em relação a Sucção (para todos os parâmetros analisados). Há diferenças significativas também entre a sucção em relação a aerador 1, aerador 2 e filtro de adsorção.

Já avaliando a influência no tempo de monitoramento nos resultados obtidos no poço de sucção, sucção, aeradores e filtro de adsorção; para os parâmetros cor aparente, turbidez e sólidos suspensos, os testes ANOVA demonstram que o tempo de monitoramento interfere significativamente no decréscimo apenas do parâmetro turbidez (poço de sucção) e sólidos suspensos (aeradores e filtro de adsorção). Contudo, pode-se perceber que para estes parâmetros que apresentam significância os dados analisados correspondem somente aos tempos 0 e 240 minutos, não existindo resultados para os tempos 60, 120 e 180. A Tabela 25 mostra os resultados desta análise estatística.

Tabela 25: Teste ANOVA comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para cor aparente, turbidez e sólidos suspensos.

Local	Significância	Significância	Significância
	Cor Aparente	Turbidez	Sólidos Suspensos
Poço de Sucção	0,528	0,001*	1,096
Sucção	0,087	0,226	0,139
Aerador 1	0,165	2,007	0,003*
Aerador 2	0,236	0,262	0,000*
Filtro de Adsorção	0,151	0,554	0,013*

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados / \*\* Sem possibilidade de execução do teste devido aos resultados serem iguais na comparação entre os tempos.

### 5.2.3 Resultados de eficiência do tratamento

O Apêndice II desta pesquisa mostra os dados completos da análise de eficiência do sistema de remediação estudado. A Tabela 26 a seguir mostra os decréscimos obtidos

para cada parâmetro analisado comparando cada equipamento estudado (S – Sucção; A1 – Aerador; A2 – Aerador 2; FA – Filtro de Adsorção).

Tabela 26: Decréscimo médio dos parâmetros BTEX e TPH para o sistema de remediação estudado.

Parâmetro	Média da Concentração Inicial (µg/L)	Decréscimo Médio em %			
		Sucção	Aerador 1	Aerador 2	Filtro de Adsorção
Benzeno	6,7	96,71	96,71	96,71	96,71
Tolueno	449,6	71,43	98,03	99,86	99,86
Etilbenzeno	112,2	69,14	94,66	99,66	99,68
Xileno	548,8	69,73	96,25	99,78	99,79
TPH DRO	30123,8	58,47	71,03	82,53	99,99
TPH GRO	1415,9	67,36	96,71	99,98	99,98
TPH Total	31534,6	57,69	73,43	84,34	99,99

O sistema de sucção à vácuo e injeção de ar demonstrou decréscimos médios variando entre 67,36% até 96,71% para BTEX e TPH GRO. Com a inclusão dos aeradores, obteve-se melhora da eficiência com variação entre 96,25% até 99,98%.

Para os parâmetros TPH DRO e TPH Total, esta parte do equipamento, apresenta decréscimos variando entre 57,69% até 58,47%. Com os aeradores, estes decréscimos variaram entre 71,03% até 84,34%.

Resultados similares também foram obtidos por outros pesquisadores avaliando remoções de BTEX e TPH utilizando sistemas de aeração (tecnologias de biorremediação, injeção de ar, “air stripping” e “air sparging”). Estes demonstram decréscimos de: 59,00% - 99,88% para benzeno e 68,33% - 95,24% para BTEX (EPA, 1997b); 99,997% para BTEX (BASS *et al.*, 2000); 99,8% - 99,9% para BTEX (KHAN *et al.*, 2004); 30,3% para benzeno e 52,8% para BTEX (ABDANUR & NOLASCO, 2005); 100% para BTEX (RAHBEH & MOHTAR, 2007); 30% - 100% para BTEX (JUNEAU JR, *et al.*, 2007); 95% - 100% para BTEX (WIRTHENSOHN *et al.*, 2009); 83,7% - 99,3% para benzeno, 89,3% - 99,8% para tolueno, 85,8% - 99,6% para etilbenzeno e 80% - 99,4% para xileno (CHEN *et al.*, 2010); 80,74% - 100% para

BTEX e 45,32% - 100% para TPH total (KIELING *et al.*, 2010); 78% - 92% para benzeno (SOARES *et al.*, 2010); 97% - 100% para BTEX (AFFERDEN *et al.*, 2011).

Em relação ao sistema de tratamento por adsorção utilizando recheio misto de 50% cinza de casca de arroz e 50% de carvão ativado, obteve-se faixa de decréscimo variando entre 96,71% até 99,99% para BTEX e TPH. Estes resultados também são similares ao obtido por AYOTAMUNO *et al.* (2006) em seu estudo com carvão ativado objetivando a utilização em tratamento de água subterrânea contaminada por óleo cru e produtos de refino de petróleo na Nigéria. Os autores obtiveram resultados de remoção de TPH igual a 99,9% (concentração inicial de 9.304,70 mg/L). WIRTHENSOHN *et al.* (2009) também obteve remoções 100% utilizando filtro de adsorção com carvão ativado como polimento a tratamento físico-químico de água subterrânea contaminada com hidrocarbonetos em planta de gás em Viana (Áustria). Mesma remoção utilizando carvão ativado, posterior a tratamento por “air stripping” e biorreator, foi obtida por JUNEAU *et al.* (2007) em seus estudo em escala real para remoções de BTEX em água subterrânea em um posto de combustíveis New Hampshire (EUA).

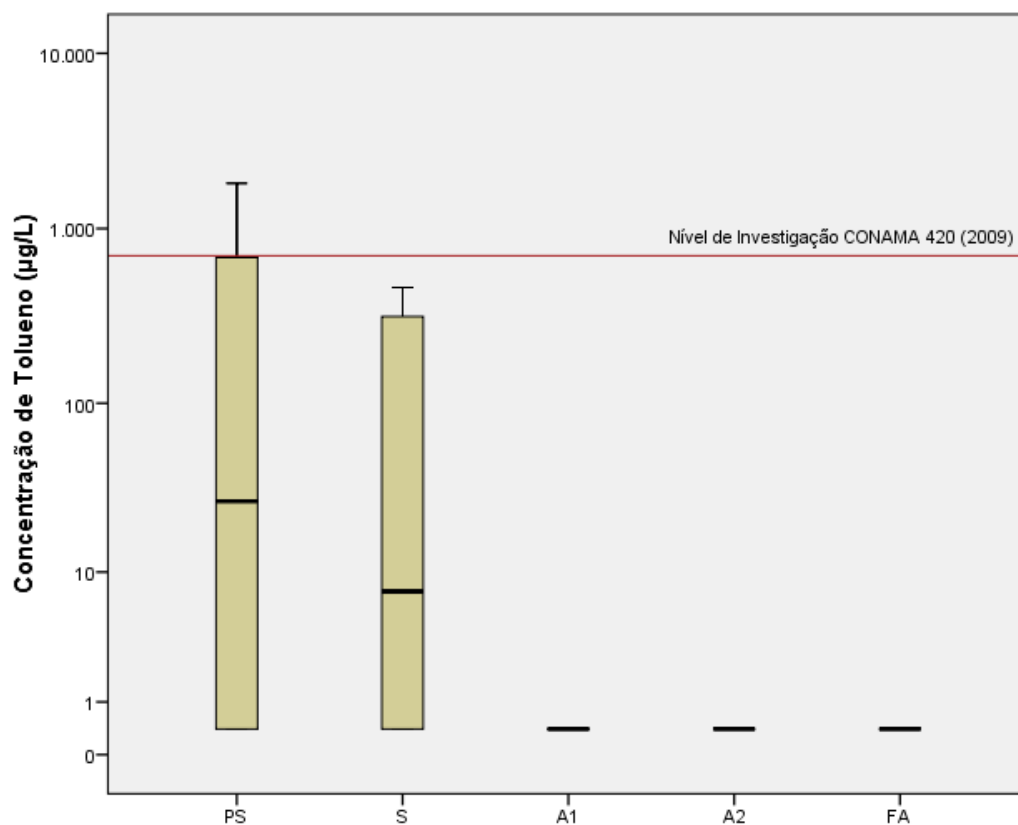
#### **5.2.4 Resultados do tratamento em escala piloto para o tempo de monitoramento igual a 240 minutos**

A opção por analisar os dados em um tempo determinado leva em consideração: a) que a análise estatística demonstra que o tempo de monitoramento não influencia no tratamento; b) manutenção de uma menor variabilidade dos dados considerando as médias dos resultados obtidos. Já a escolha do tempo igual a 240 minutos deve-se ao fato de ser um tempo em que há resultados em todos os parâmetros (inclusive o poço de sucção) e em função de que é o último tempo de ensaio.

Com isso, fez-se uma análise do comportamento de cada parâmetro considerando os diferentes tipos de tratamento testados utilizando-se os resultados obtidos pelo monitoramento do tempo 240 minutos. As Figuras 37 até 39 apresentam está análise para os parâmetros Tolueno, Etilbenzeno e Xileno. Para Benzeno, todos os valores foram iguais a 0,44 µg/L (nível de investigação da CONAMA 420/2009 igual a

5 µg/L), inclusive o poço de sucção, não sendo possível e necessário esta representação gráfica.

Percebe-se para todos os parâmetros analisados um alto decréscimo conforme o tipo de tratamento testado demonstrando a eficiência do equipamento.



**Figura 37: Resultados de decréscimo de Tolueno para o Tempo 240 minutos**

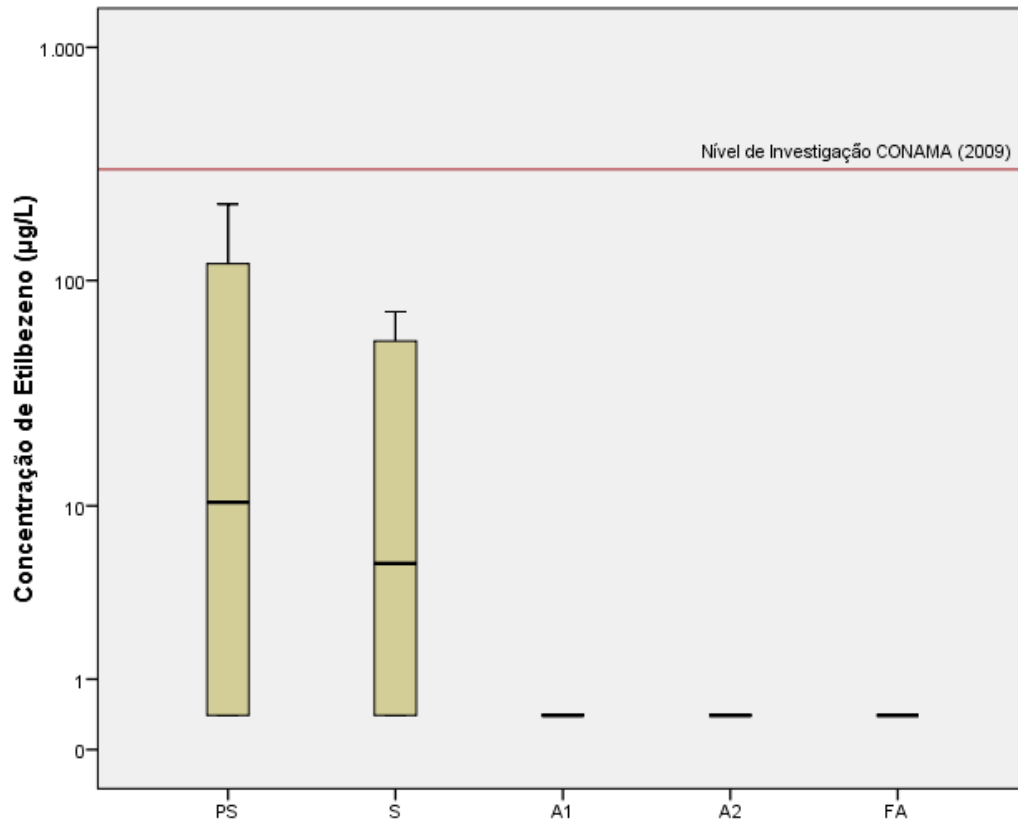


Figura 38: Resultados de decréscimo de Etilbenzeno para o Tempo 240 minutos

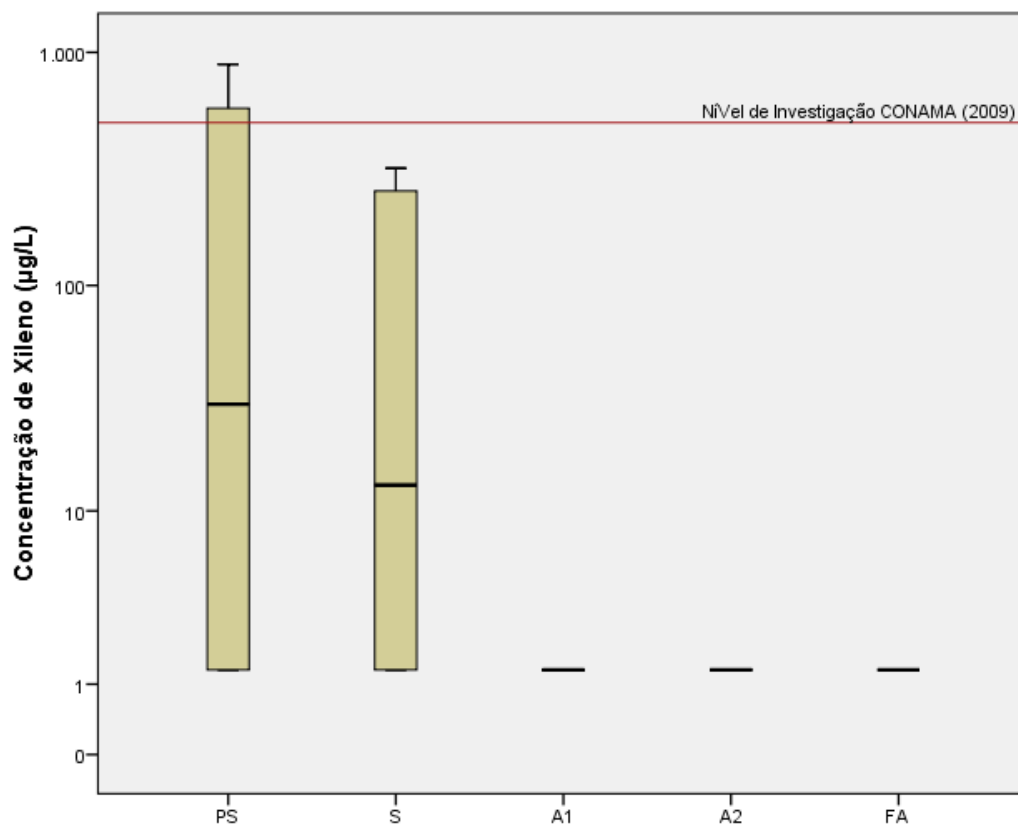


Figura 39: Resultados de decréscimo de Xileno para o Tempo 240 minutos



A mesma análise também foi realizada para os parâmetros TPH. As Figuras 40 até 42 mostram os resultado gráficos destes parâmetros. Da mesma forma que os parâmetros BTEX, percebe-se forte decréscimo das concentrações conforme os tipos de tratamento testados. O destaque refere-se ao nível de concentração final de cada parâmetro posterior o tratamento por filtro de adsorção. Isto denota a grande importância deste tratamento/equipamento para garantia da eficiência do processo.

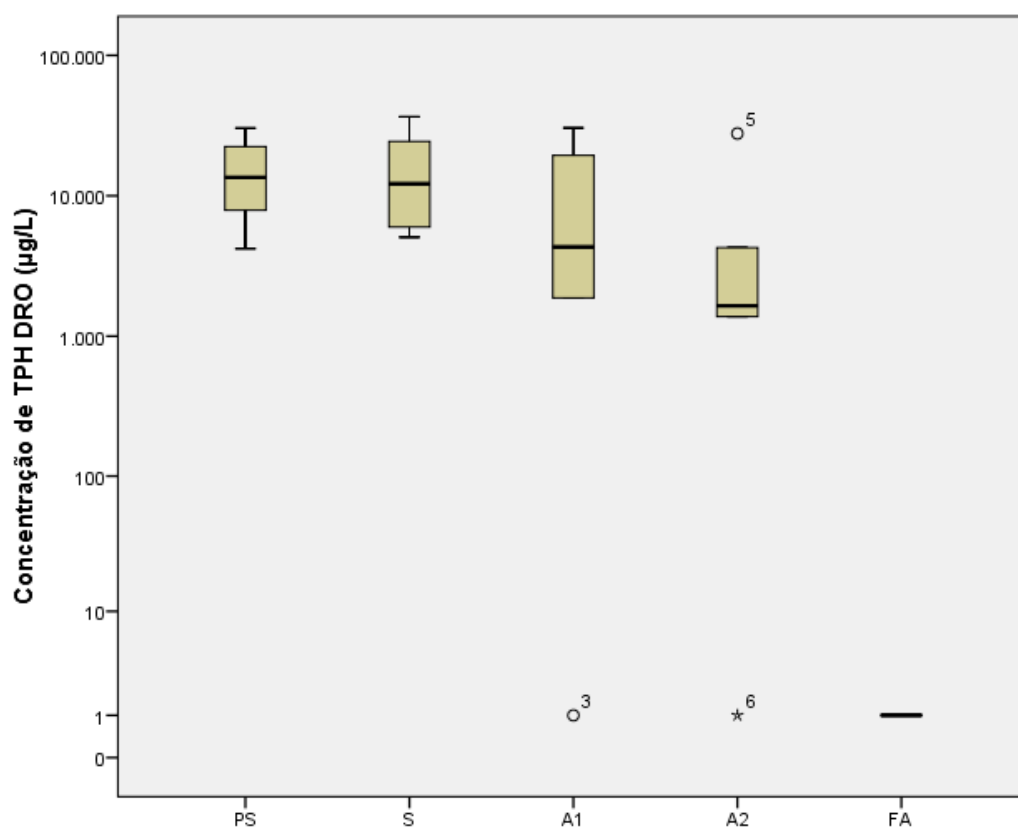


Figura 40: Resultados de decréscimo do TPH DRO para o Tempo 240 minutos

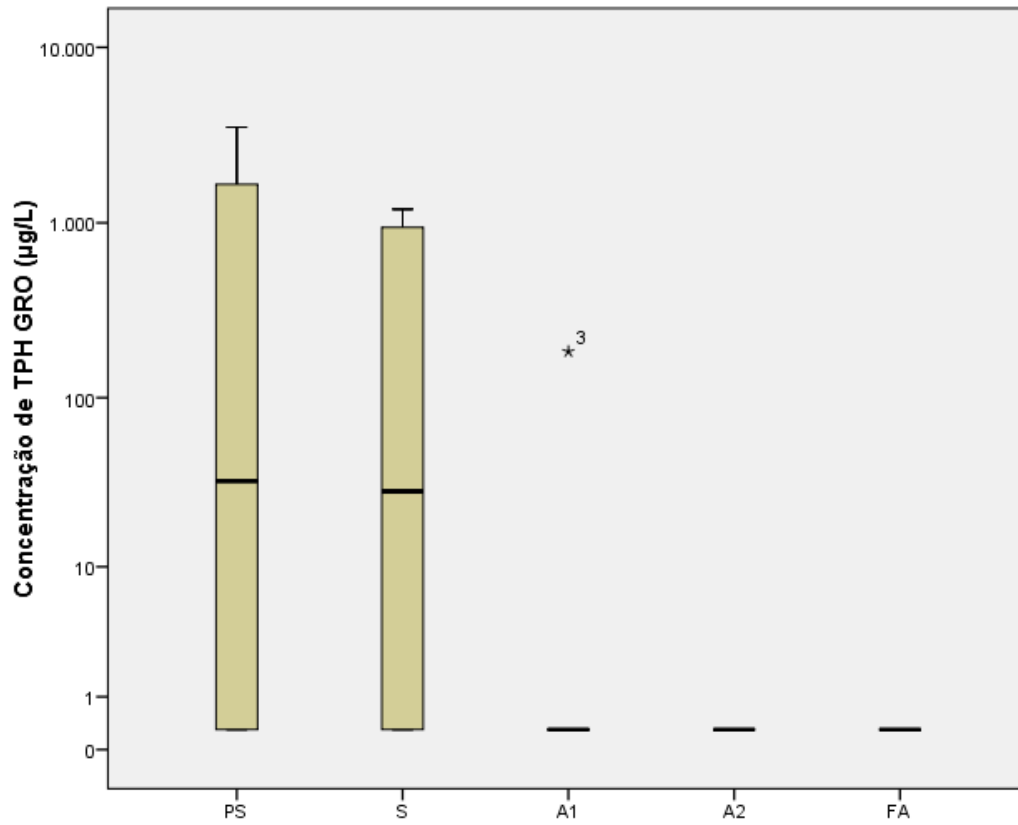


Figura 41: Resultados de decréscimo do TPH GRO para o Tempo 240 minutos

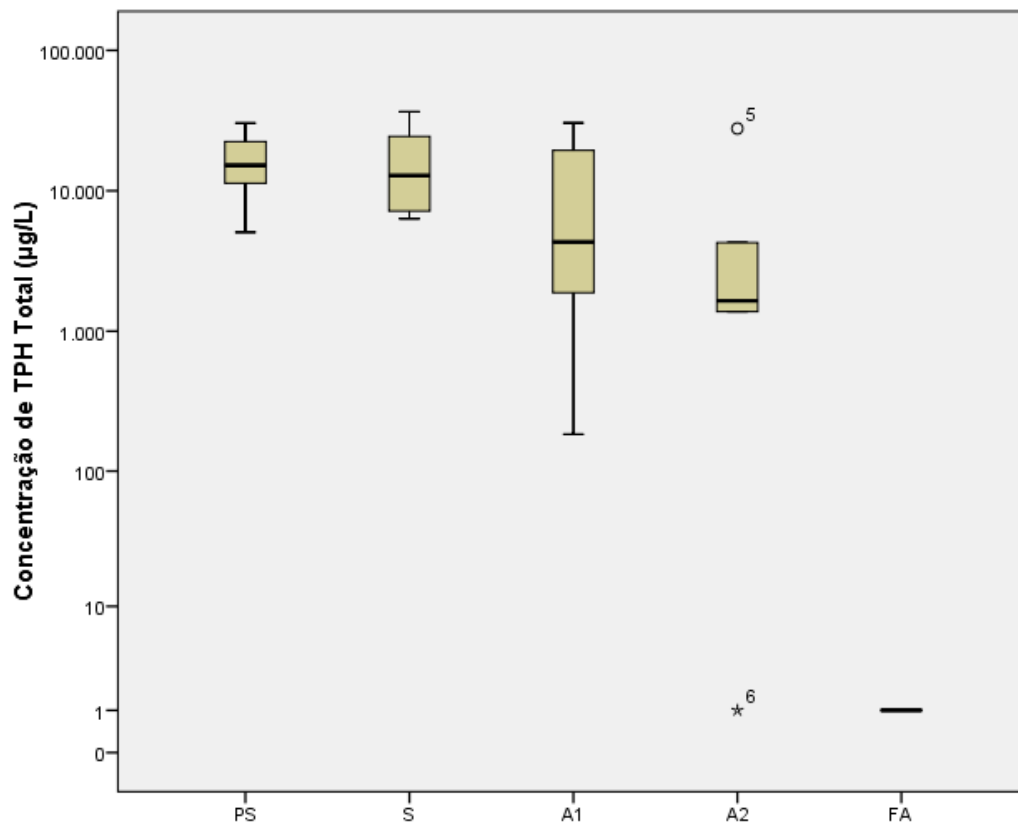


Figura 42: Resultados de decréscimo do TPH Total para o Tempo 240 minutos

Por fim, também se fez esta análise para os parâmetros cor aparente, turbidez e sólidos suspensos. As Figuras 43 até 45 mostram os gráficos relativo a estes parâmetros. Os resultados demonstram comportamento similar comparando com BTEX e TPH, porém os decréscimos não são tão discrepantes.

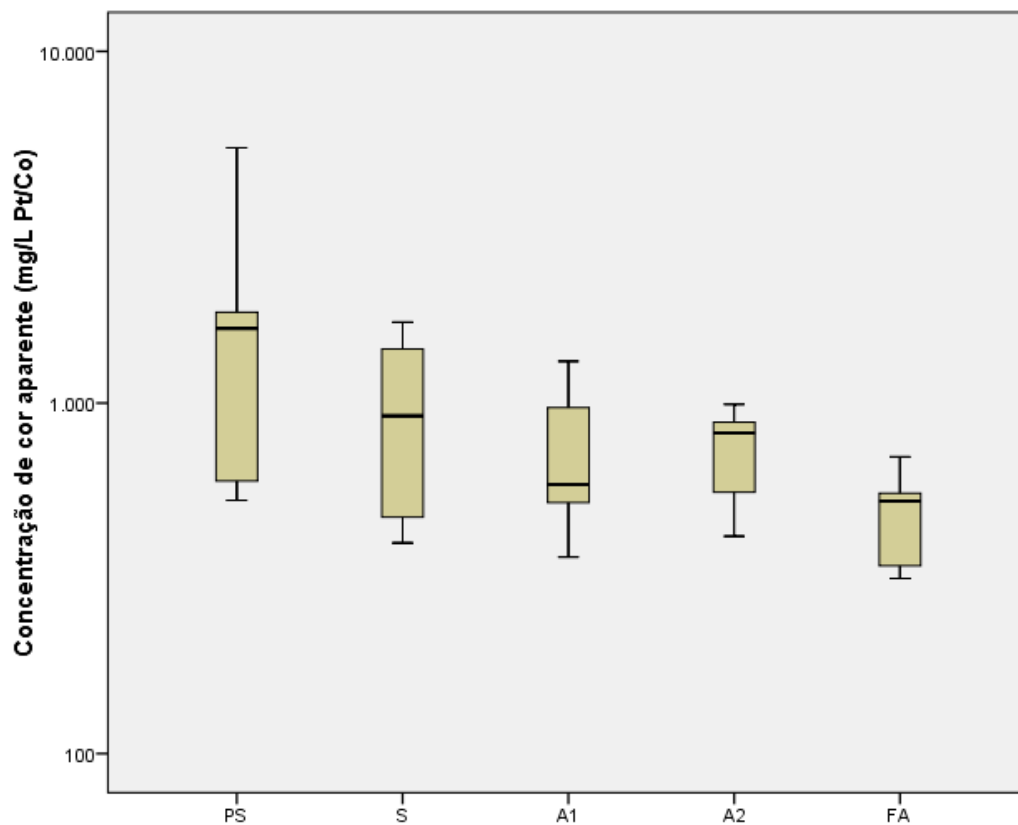


Figura 43: Resultados de decréscimo da Cor Aparente para o Tempo 240 minutos

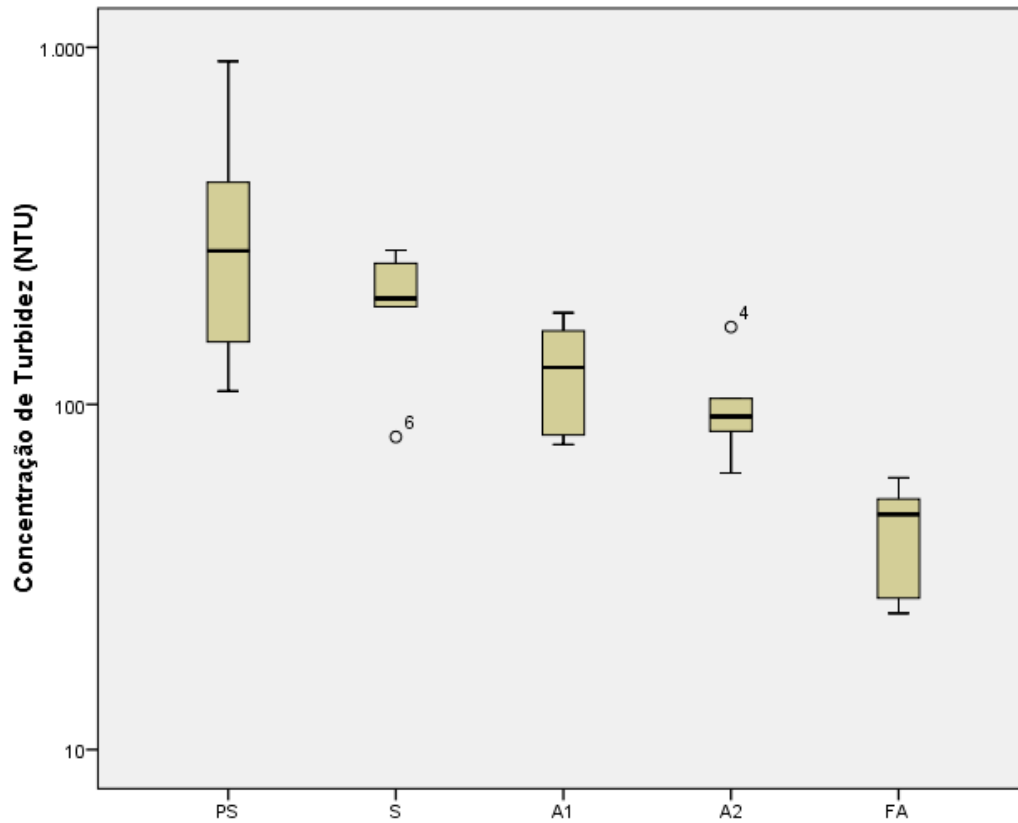


Figura 44: Resultados de decréscimo da Turbidez para o Tempo 240 minutos

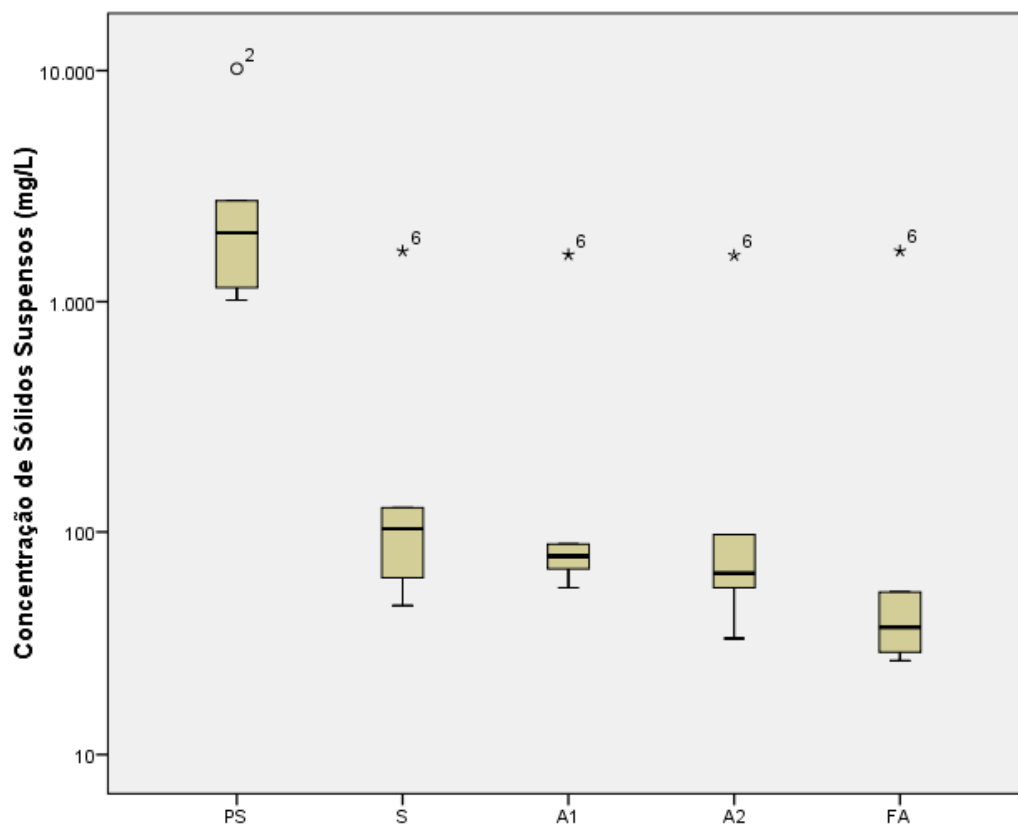


Figura 45: Resultados de decréscimo dos Sólidos Suspensos para o Tempo 240 minutos

### 5.2.5 Influência da temperatura, pH e Alcalinidade no tratamento

Analisando os outros parâmetros medidos nos ensaios (temperatura, pH e Alcalinidade), percebe-se, para todos os testes realizados, um aumento da temperatura e do pH e uma redução da alcalinidade, se comparado a água subterrânea bruta com o tratamento por sucção. Já, no processo de aeração, há um decréscimo da temperatura e da alcalinidade, no entanto, com um aumento do pH. No filtro de adsorção o que se percebe é um aumento da temperatura e da alcalinidade com uma redução do pH.

O Apêndice III apresenta os resultados das médias, por ensaio, dos parâmetros temperatura, pH e alcalinidade. As Figuras 46, 47 e 48 apresentam estes resultados compilados.

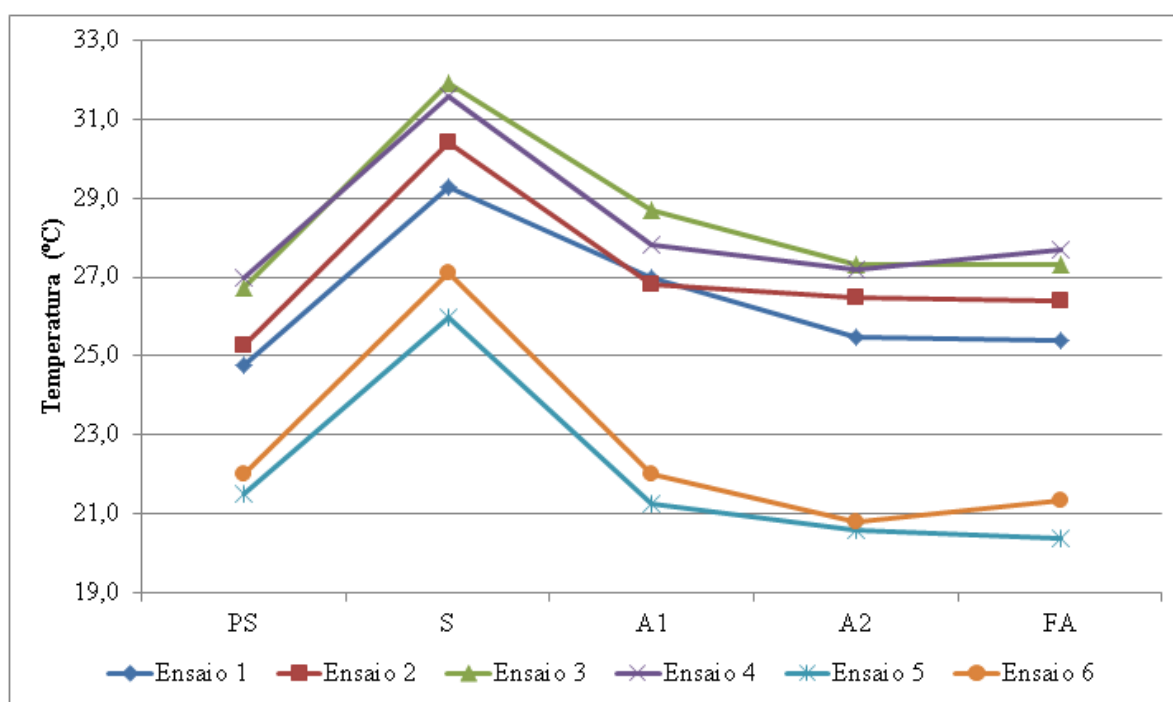
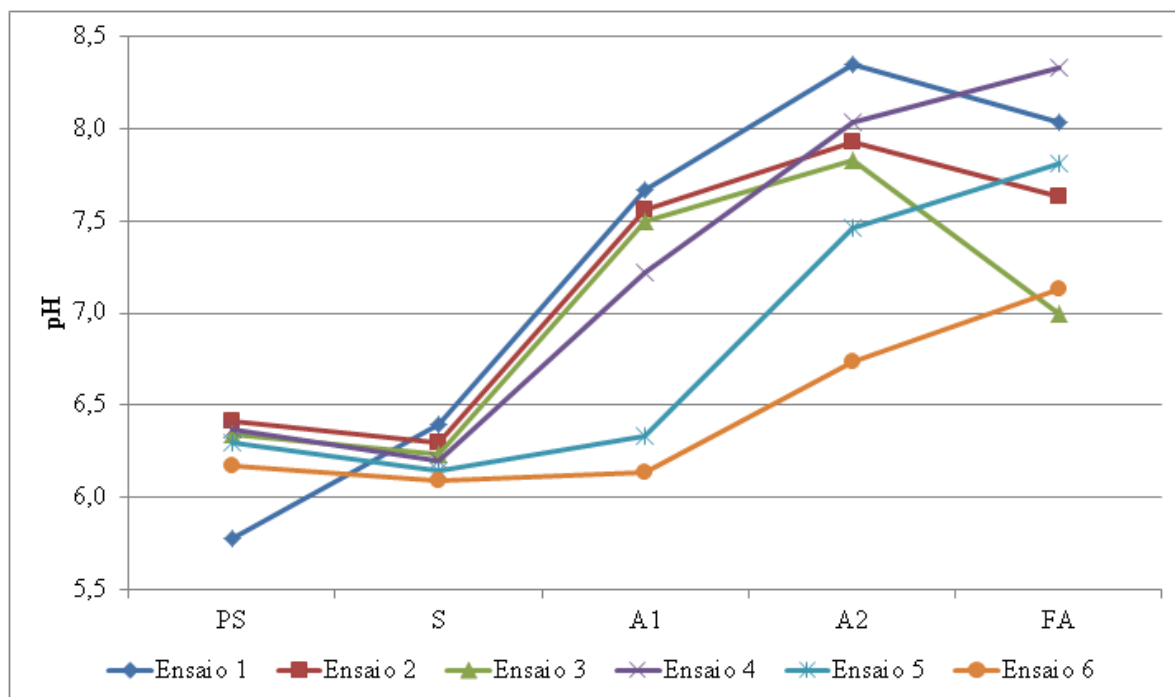
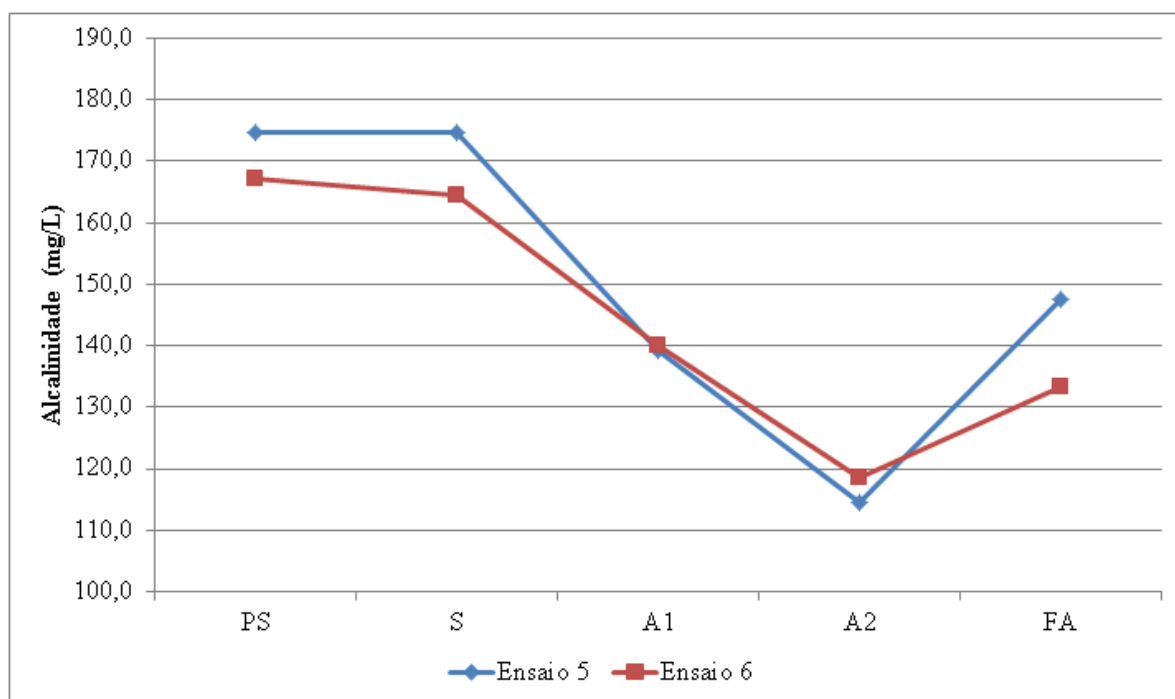


Figura 46:- Comportamento do parâmetro temperatura nos ensaios realizados



**Figura 47: Comportamento do parâmetro pH nos ensaios realizados**



**Figura 48: Comportamento do parâmetro alcalinidade nos ensaios realizados**

De forma a verificar a influência da temperatura no decréscimo dos contaminantes BTEX e TPH, dividiu-se os ensaios em duas faixas de temperatura determinados visualmente a partir da Figura 46. Assim, a faixa 1 (intervalo de

temperatura inicial no PS entre 23,5°C até 29,0°C) era composta pelos ensaios de 1 a 4 enquanto a faixa 2 (entre 20°C e 23°C) era composta pelos ensaios 5 e 6. As Tabelas 27 e 28 demonstram as faixas de temperatura em função dos decréscimos dos parâmetros BTEX e TPH, respectivamente.

Tabela 27: Decréscimo médio dos parâmetros BTEX em função das faixas de temperatura.

Faixa	Benzeno (%)				Tolueno (%)				Etilbenzeno (%)				Xileno (%)			
	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA
1	-	-	-	-	51,2	96,8	99,9	99,9	47,2	91,2	99,6	99,6	48,2	93,8	99,7	99,7
2	96,7	96,7	96,7	96,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,8	99,8	99,8	99,8

Tabela 28: Decréscimo médio dos parâmetros TPH em função das faixas de temperatura.

Faixa	TPH DRO (%)				TPH GRO (%)				TPH Total (%)				
	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	
1		56,4	75,6	80,8	99,9	44,0	94,5	99,9	99,9	54,4	78,6	83,3	99,9
2		61,6	61,8	85,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	62,7	63,0	86,2	99,9

A análise das tabelas demonstra que para a faixa com as menores temperaturas, os decréscimos de BTEX e TPH são maiores. Efeito também relatado por POULOPOULOS *et al.* (2005). A pesquisa dos autores verificou o potencial de purificação de efluente oleoso proveniente da produção de lubrificantes usando processo de “stripping”. Os resultados destes demonstraram: 1) que o aumento da temperatura de 295K para 337K interferiu significativamente na remoção de DQO do efluente estudado; 2) que a relação coeficiente massa-transferência também cresceu com a temperatura; 3) que para temperaturas a partir de 330K a remoção de poluentes decresce com o tempo. Esta ocorrência, segundo os autores, pode ser explicada em função de que em elevadas temperaturas a taxa de evaporação do solvente (presente na água) é mais alta do que a taxa de “stripping” dos componentes orgânicos; 4) o melhor resultado obtido foi de 35% de remoção com temperatura de 337K, tempo de monitoramento de 200 minutos e aeração de 150 L (nitrogênio líquido) / L (efluente).h. Os autores

concluíram que a temperatura é essencial para o processo de “stripping” relacionado ao efluente estudado.

Com o teste ANOVA realizado foi possível verificar diferença significativa para a sucção para todos os parâmetros, exceto o benzeno, ou seja, a temperatura influencia no tratamento por sucção. Houve diferença significativa também nos tratamentos por aeração para os parâmetros TPH DRO e TPH Total. Isto confirma que para menores temperaturas há melhorias nos decréscimos dos parâmetros estudados. A Tabela 29 mostra estes resultados.

Tabela 29: Teste ANOVA para verificação da influência da temperatura no decréscimo do BTEX e TPH.

Parâmetro	Significância			
	S	A1	A2	FA
Benzeno	1,000	1,000	1,000	1,000
Tolueno	0,002*	0,153	1,000	0,489
Etilbenzeno	0,001*	0,161	1,000	1,000
Xileno	0,001*	0,153	1,000	1,000
TPH DRO	0,006*	0,000*	0,025*	**
TPH GRO	0,001*	0,104	1,000	1,000
TPH Total	0,007*	0,000*	0,025*	**

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados / \*\* Sem possibilidade de execução do teste devido aos resultados serem iguais na comparação entre os tempos.

Embora estatisticamente foi possível observar esta influência, este tema deverá ser melhor aprimorado de forma a confirmar estes resultados. São poucos trabalhos que executam esta relação e, as justificativas atribuídas ao aumento de temperatura devem ser melhor explicadas.

Em relação ao pH, percebe-se um aumento de pH do poço até o filtro de adsorção. No filtro, isto pode ser justificado devido a ativação do carvão utilizando KOH.



### 5.3 ENSAIOS EM ESCALA REAL

Os resultados do monitoramento em escala real estão apresentados neste subcapítulo. Os resultados completos (de todos os ensaios) do monitoramento do poço de sucção e do tratamento para os diferentes equipamentos testados por esta pesquisa estão apresentados no Apêndice IV.

Comparando os laudos físico-químicos de cada ensaio, percebe-se que para cada parâmetro há uma quantificação aonde o valor mínimo depende do limite de detecção do equipamento. Benzeno (limite de detecção do equipamento igual a 1,0 µg/L); Tolueno (limite de detecção do equipamento igual a 1,0 µg/L); Etilbenzeno (limite de detecção do equipamento igual a 1,0 µg/L); Xileno (limite de detecção do equipamento igual a 3,0 µg/L); TPH C8-C40 (limite de detecção do equipamento igual a 200,0 µg/L); TPH GRO C6-C10 (limite de detecção do equipamento igual a 50,0 µg/L). Assim, para análise dos dados, adotou-se este resultado como o valor mínimo. Assim, quando no laudo aparece, por exemplo, benzeno < 1,0 µg/L; adotou-se o resultado benzeno = 1,0 µg/L.

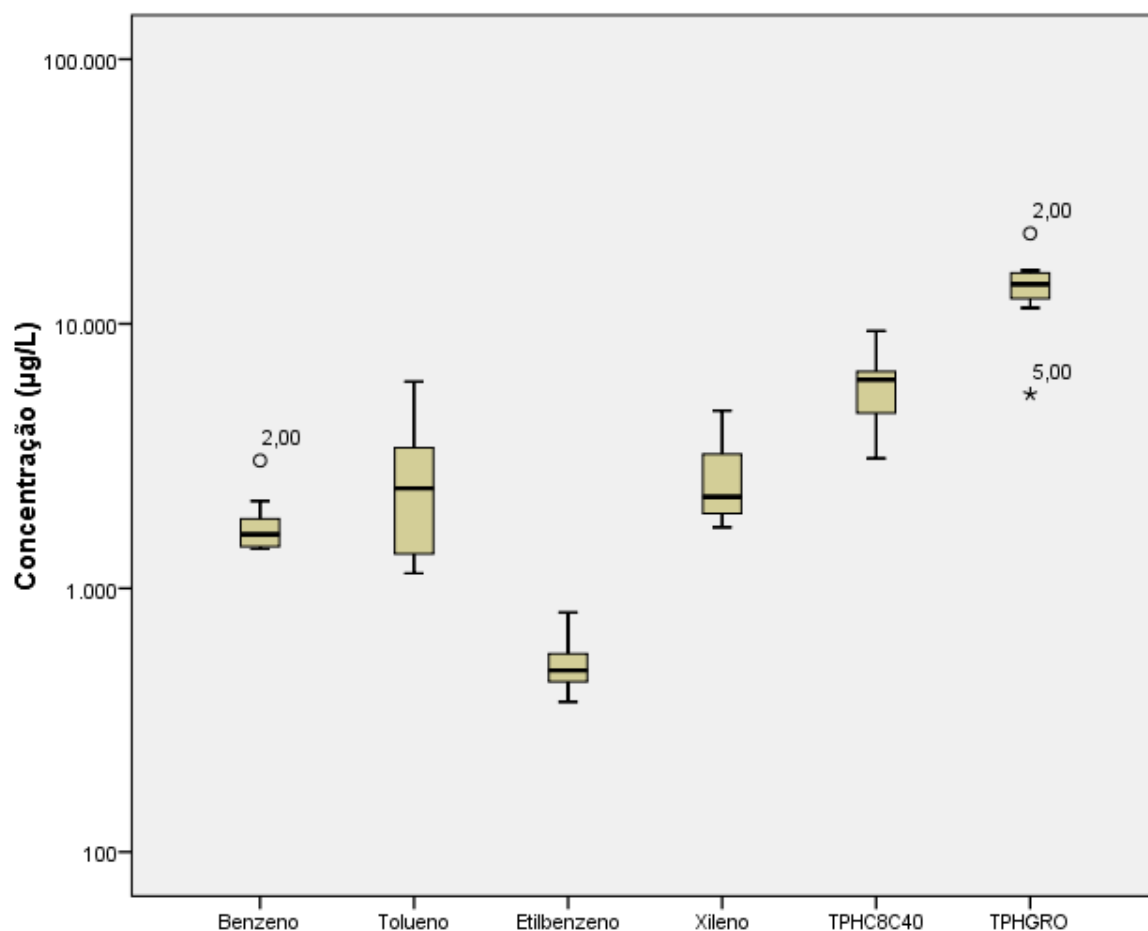
#### 5.3.1 Resultados da água subterrânea contaminada usada nos ensaios em escala real

Como controle dos ensaios e verificação do nível de remoção promovido pelo sistema de sucção e aeração, fez-se a coleta e análise dos poços de sucção 1, 2 e 7 instalados no Posto B. Os resultados mostraram que em todos os ensaios os resultados de TPH e BTEX para os poços 1 e 2 foram inferiores ao limite de quantificação da amostra, ou seja, muito próximo a concentração igual a zero. Por outro lado, o poço de sucção com maior contaminação da área estudada foi coletado e monitorado nestes ensaios (poço 07).

O Posto de Combustíveis em estudo possuía 8 poços de sucção operando simultaneamente. Destes, 7 possuíam contaminações nos níveis dos poços 1 e 2

monitorados. Isto significa dizer que, na realidade, a água contaminada que entra no sistema pode estar diluindo as concentrações de TPH e BTEX, o que poderá ter influenciado nos resultados de eficiência do equipamento.

No entanto, por convenção adotou-se os valores de concentrações do poço 07 para executar todas as análises de dados dos ensaios em escala real. A Figura 49 ilustra todos os resultados do poço de sucção (PS 07) da água subterrânea utilizada no experimento em escala real para os parâmetros BTEX e TPH.



**Figura 49: Gráfico demonstrando a variabilidade dos parâmetros BTEX e TPH para água subterrânea contaminada do Posto B.**

Para verificar a variabilidade dos dados do monitoramento do poço de sucção em todos os ensaios, fez-se um teste ANOVA utilizando o software SPSS como ferramenta de análise. A Tabela 30 demonstra os parâmetros e índice de significância conforme teste ANOVA.

Tabela 30: Teste ANOVA para os resultados de água subterrânea contaminada (Poço de Sucção), considerando todos os ensaios.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Significância</b>
Benzeno	µg/L	1770,0	501,9	3040,0	1410,0	0,051
Tolueno	µg/L	2695,0	1486,6	6050,0	1140,0	0,028*
Etilbenzeno	µg/L	515,5	128,5	811,0	372,0	0,347
Xileno	µg/L	2657,4	943,0	4690,0	1700,0	0,049*
TPH C8-C40	µg/L	6100,0	1924,7	31000,0	9400,0	0,111
TPH GRO C6-C10	µg/L	13908,2	4185,8	21956,3	5427,6	0,168
Temperatura	°C	23,1	1,2	25,0	21,0	0,001*
pH	pH	6,3	0,4	6,7	5,3	0,335

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados

O teste estatístico realizado mostra que houve diferenças significativas, comparando as concentrações iniciais de contaminantes da água subterrânea na entrada do sistema em todos os ensaios, para os seguintes parâmetros: Temperatura, Tolueno e Xileno. Isto significa dizer que, para estes parâmetros, os ensaios realizados e as concentrações das amostras de entrada do sistema de tratamento não foram similares entre si.

A análise de Tuckey demonstrou diferenças significativas para o parâmetro Tolueno entre os ensaios 2 e 4 e ensaios 2 e 5. Para o Xileno, a análise de Tuckey não apresenta diferença significativa entre os ensaios, embora o teste ANOVA tenha apresentado resultados diferentes.

Por outro lado, para os parâmetros pH, Benzeno, Etilbenzeno, TPH C8-C40 e TPH GRO C6-C10, o teste ANOVA mostrou que não há diferenças significativas se comparar os resultados de entrada do sistema, ou seja, os ensaios foram similares.

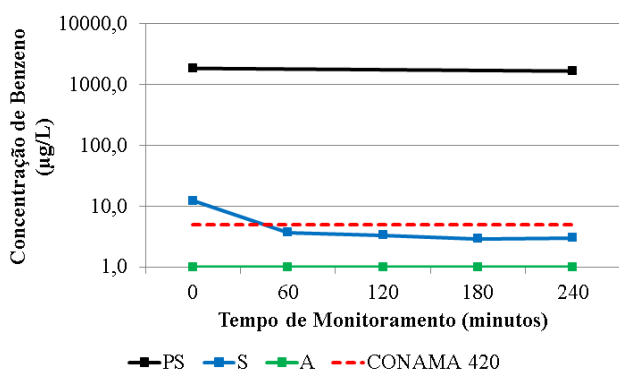
A partir disso, optou-se pela não divisão do tratamento em faixas de concentração considerando as concentrações iniciais dos contaminantes similares. Assim, os 05 ensaios foram considerados similares entre si.

### 5.3.2 Resultados do tratamento ao longo do experimento

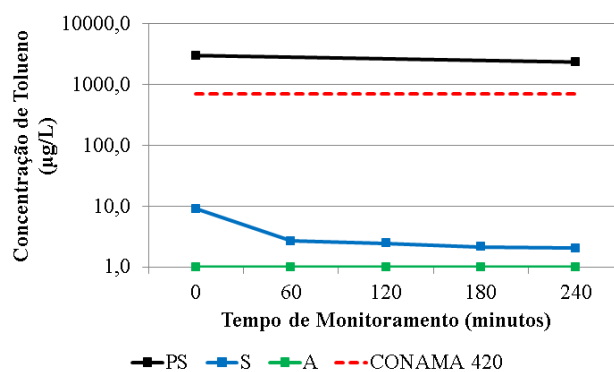
Avaliando os tipos de tratamento em função dos tempos de monitoramento utilizados nos ensaios, obteve-se o comportamento de cada parâmetro analisado. Os resultados na íntegra, estão apresentados no Apêndice IV.

#### 5.3.2.1 Parâmetros: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno

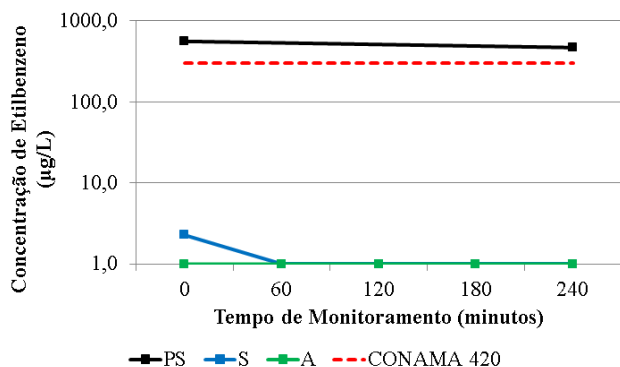
As Figuras 50 até 53, demonstram o comportamento dos parâmetros benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, respectivamente, e a comparação com o valor de investigação para água subterrânea prevista pela CONAMA 420 (2009).



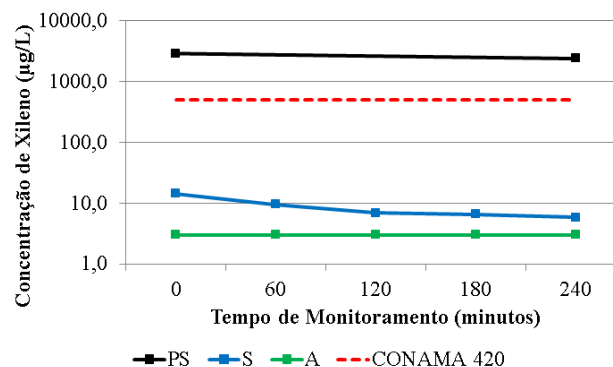
**Figura 50:** Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Benzeno ao longo do experimento.



**Figura 51:** Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Tolueno ao longo do experimento.



**Figura 52: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Etilbenzeno ao longo do experimento.**



**Figura 53: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro Xileno ao longo do experimento.**

Três observações são importantes a partir da análise das figuras anteriores: 1) as concentrações de BTEX da água subterrânea estão acima dos limites estabelecidos pela CONAMA 420 em todos os casos; 2) após o tratamento de sucção, percebe-se drástica redução das contaminações; 3) Após tratamento por aeração, há remoções de 100% das concentrações de BTEX.

Em relação à análise estatística, o teste ANOVA demonstra a diferença significativa entre os resultados das concentrações de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno comparando o poço de sucção, sucção e aeradores, o que confirma a eficiência do equipamento (Significância igual a 0,000 para todos os parâmetros).

Porém, na análise de Tuckey (Tabela 31), percebe-se que as diferenças significativas estão relacionadas aos resultados comparando o Poço de Sucção em relação a Sucção (para todos os parâmetros analisados) e Poço de Sucção em relação a Aeração (para todos os parâmetros analisados). Comparando os tratamentos por Sucção e Aeração, não há diferenças significativas entre os resultados. Com este resultado pode-se estimar que, para os parâmetros BTEX, há necessidade apenas do equipamento de sucção, não necessitando do equipamento de aeração.

Tabela 31: Teste de Tuckey comparando os resultados de BTEX do poço de sucção com o equipamento (sucção e aeradores).

Tratamento	Faixa	Significância	Significância	Significância	Significância
		Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
PS	S	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
	A	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
S	A	0,997	1,000	1,000	0,998

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados

Avaliando a influência no tempo de monitoramento nos resultados obtidos no poço de sucção, sucção e aeradores; os testes ANOVA e Tuckey demonstram que, para Tolueno, Etilbenzeno e Xileno, o tempo de monitoramento não interfere significativamente para o decréscimo dos compostos estudados. No entanto para Benzeno, o teste ANOVA demonstrou que o tempo de monitoramento influencia nas remoções (significância igual a 0,025). A análise de Tuckey demonstrou que os tempos com significância são o “0 min.” comparado ao “180 min.” (significância 0,043) e “0 min.” comparado com “240 min.” (significância 0,046). A Tabela 32 mostra os resultados desta análise estatística.

Tabela 32: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para BTEX.

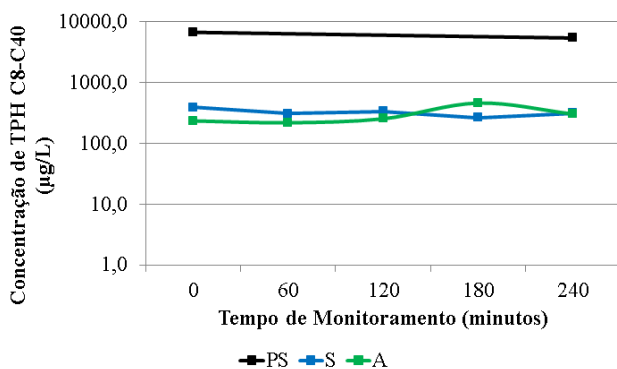
Local	Significância	Significância	Significância	Significância
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
Poço de Sucção	0,593	0,511	0,286	0,422
Sucção	0,025*	0,446	0,292	0,836
Aeração	**	**	**	**

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

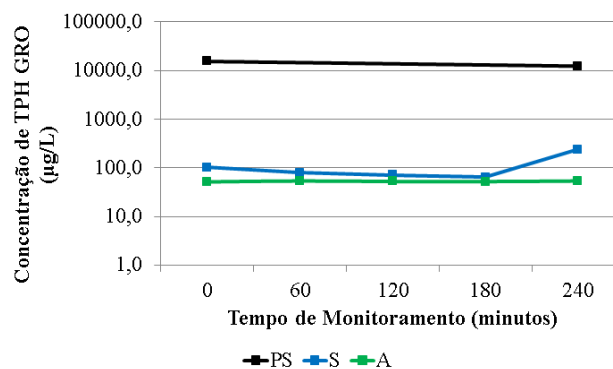
\* Representa diferenças significativas nos resultados / \*\* Sem possibilidade de execução do teste devido aos resultados serem iguais na comparação entre os tempos.

### 5.3.2.2 Parâmetros: TPH C8–C40 e TPH GRO C6–C10

As Figuras 54 e 55 demonstram o comportamento dos parâmetros TPH C8-C40 e TPH C6-C10, respectivamente.



**Figura 54: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH C8-C40 ao longo do experimento.**



**Figura 55: Resultado dos valores médios do tratamento para o parâmetro TPH C6-C10 ao longo do experimento.**

Em relação à análise estatística, o teste ANOVA demonstra a diferença significativa entre os resultados das concentrações de TPH comparando o poço de sucção, sucção e aeradores, o que confirma a eficiência do equipamento (Significância igual a 0,000 para todos os parâmetros), similar a análise para BTEX.

E, da mesma forma que os ensaios de BTEX, na análise de Tuckey (Tabela 33), percebe-se que as diferenças significativas estão relacionadas aos resultados comparando o Poço de Sucção em relação a Sucção (para todos os parâmetros analisados) e Poço de Sucção em relação a Aeração (para todos os parâmetros analisados). Comparando os tratamentos por Sucção e Aeração, não há diferenças significativas entre os resultados. Com este resultado pode-se estimar que, para os parâmetros TPH, há necessidade apenas do equipamento de sucção, não necessitando do equipamento de aeração.

Tabela 33: Teste de Tuckey comparando os resultados de TPH do poço de sucção com o equipamento (sucção e aeradores).

Tratamento	Faixa	Significância	Significância
		TPH C8-C40	TPH GRO
PS	S	0,000*	0,000*
	A	0,000*	0,000*
S	A	0,991	0,992

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados

Avaliando a influência no tempo de monitoramento nos resultados obtidos no poço de sucção, sucção e aeradores; os testes ANOVA e Tuckey demonstram que, para os parâmetros TPH, o tempo de monitoramento não interfere significativamente para o decréscimo dos compostos estudados. A Tabela 34 mostra os resultados desta análise estatística.

Tabela 34: Teste ANOVA e Tuckey comparando os resultados dos diferentes tempos de monitoramento para TPH.

Local	Significância	Significância
	TPH C8-C40	TPH GRO
Poço de Sucção	0,305	0,260
Sucção	0,800	0,530
Aeração	0,545	0,976

OBS.: Resultados abaixo de 0,05 (95% de intervalo de confiança) representam diferenças significativas

\* Representa diferenças significativas nos resultados / \*\* Sem possibilidade de execução do teste devido aos resultados serem iguais na comparação entre os tempos.

### 5.3.3 Resultados de eficiência do tratamento

O Apêndice V desta pesquisa mostra os dados completos da análise de eficiência do sistema de remediação estudado. A Tabela 35 a seguir mostra os decréscimos obtidos



para cada parâmetro analisado comparando cada equipamento estudado (S – Sucção e A – Aeradores).

Tabela 35: Decréscimo médio dos parâmetros BTEX e TPH para o sistema de remediação estudado.

Parâmetro	Média da Concentração	Decréscimo Médio em %	
	Inicial (µg/L)	Sucção	Aeração
Benzeno	1770,0	99,70	99,94
Tolueno	2695,0	99,87	99,95
Etilbenzeno	515,5	99,75	99,80
Xileno	2657,4	99,71	99,88
TPH C8-C40	6100,0	93,66	95,08
TPH GRO	13908,2	99,27	99,60

O sistema de sucção a vácuo e injeção de ar demonstrou decréscimos médios variando entre 93,66% até 99,87% para BTEX e TPH. Com a inclusão dos aeradores, obteve-se melhora da eficiência com variação entre 95,08% até 99,95%.

Em escala real, observa-se melhora dos resultados de decréscimos, principalmente em relação ao TPH. Isto pode ser justificado em função da diluição da concentração dos contaminantes devido à existência de diversos poços de sucção, existentes no posto estudado, sem contaminação, conforme anteriormente explicado. Outro motivo pode estar relacionado às concentrações iniciais, as quais são maiores em relação ao testado em escala piloto.

No entanto, os resultados dos decréscimos finais estão similares ao obtido em escala piloto e os diversos estudos na área conforme já detalhado anteriormente (por exemplo: EPA, 1997b; BASS *et al.*, 2000; KHAN *et al.*, 2004; entre outros). Percebe-se também a necessidade de um polimento do sistema para garantir redução de 100% das concentrações. Para este tratamento pode ser utilizado o filtro misto testado em escala piloto.

### 5.3.4 Resultados do tratamento em escala real para o tempo de monitoramento igual a 240 minutos

Da mesma forma que a análise dos dados em escala piloto, fez-se uma avaliação dos resultados em escala real para o tempo 240 minutos. As Figuras 56 até 61 apresentam esta análise para os parâmetros BTEX e TPH. Percebe-se para todos os parâmetros analisados um alto decréscimo conforme o tipo de tratamento testado demonstrando a eficiência do equipamento.

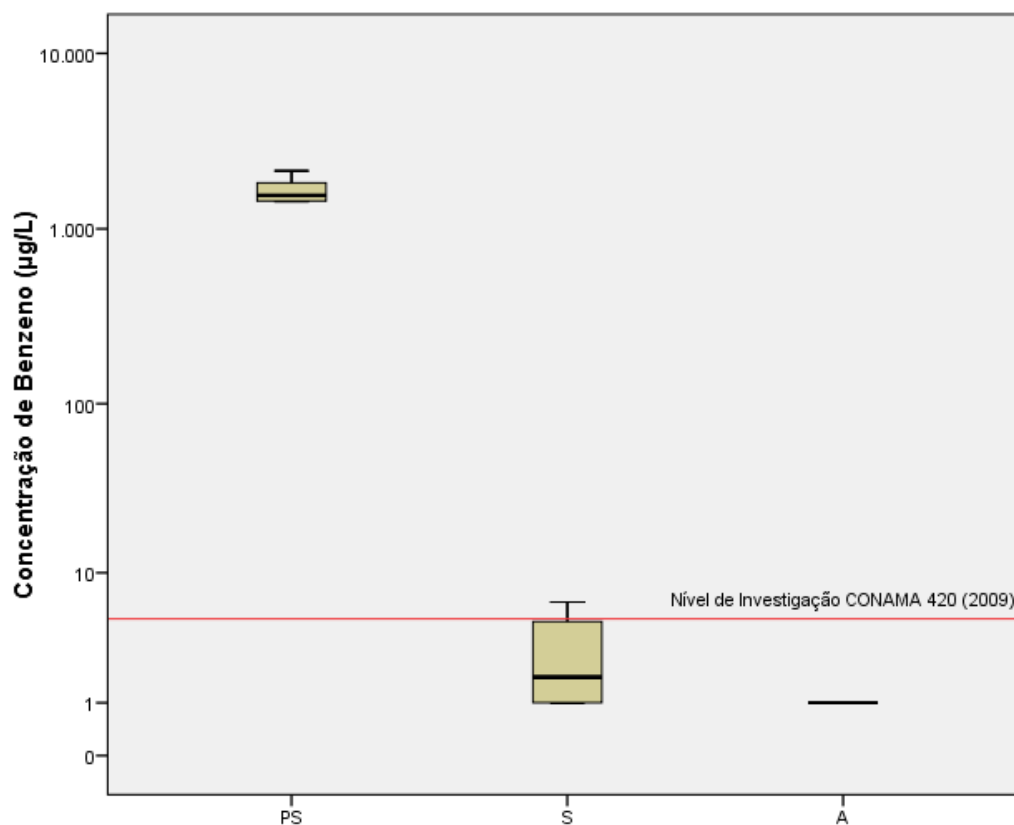


Figura 56: Resultados de decréscimo de Benzeno para o Tempo 240 minutos

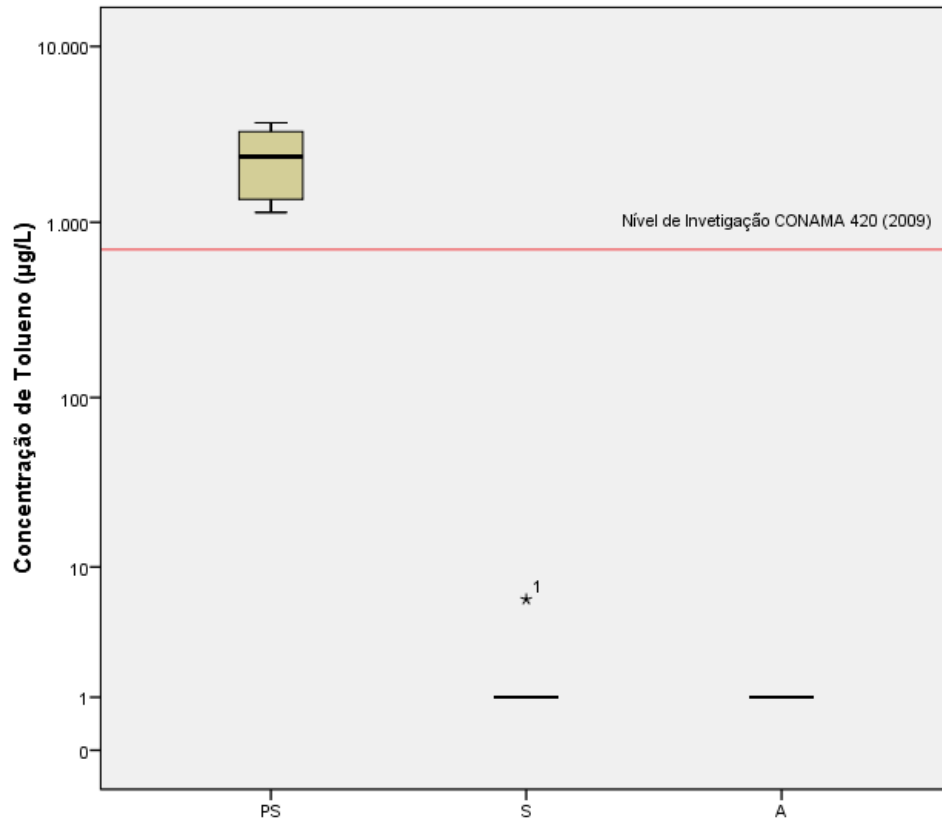


Figura 57: Resultados de decréscimo de Tolueno para o Tempo 240 minutos

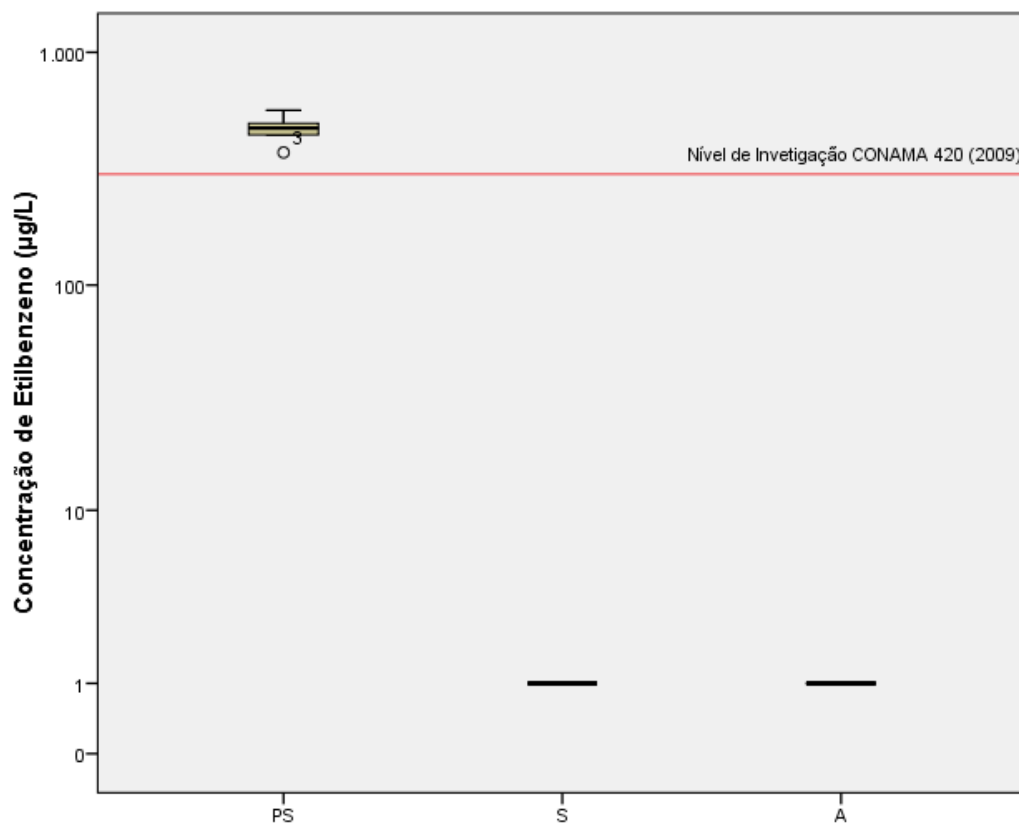


Figura 58: Resultados de decréscimo de Etilbenzeno para o Tempo 240 minutos

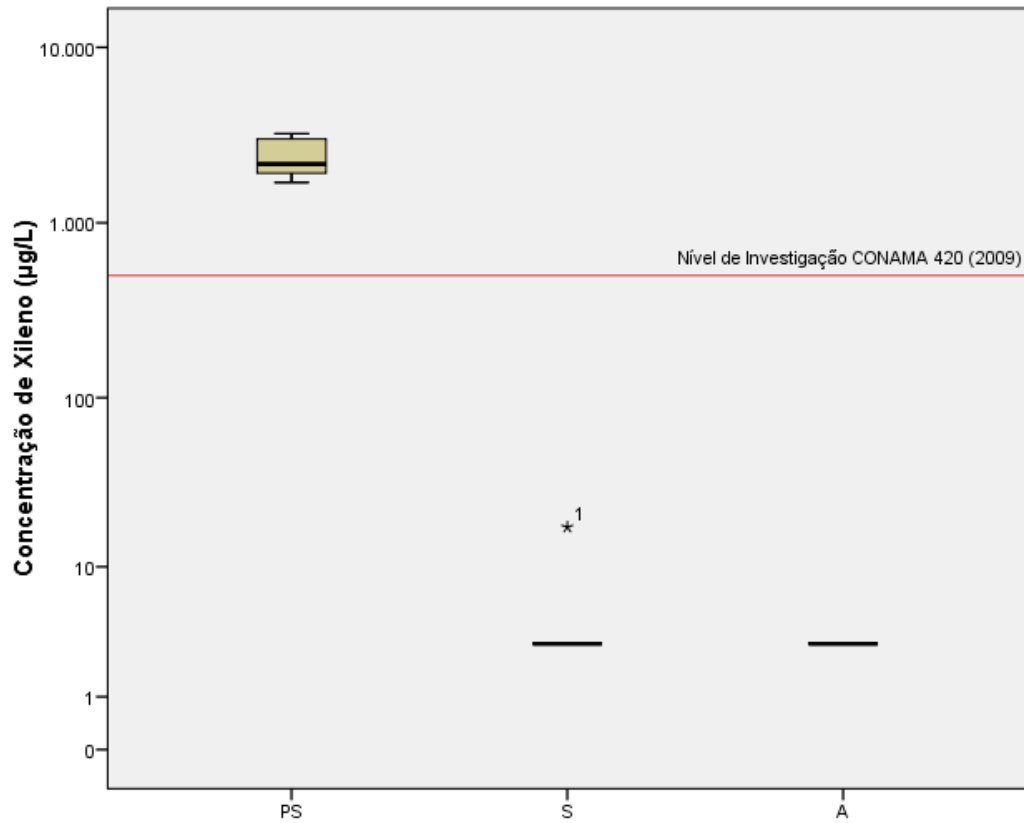


Figura 59: Resultados de decréscimo de Xileno para o Tempo 240 minutos

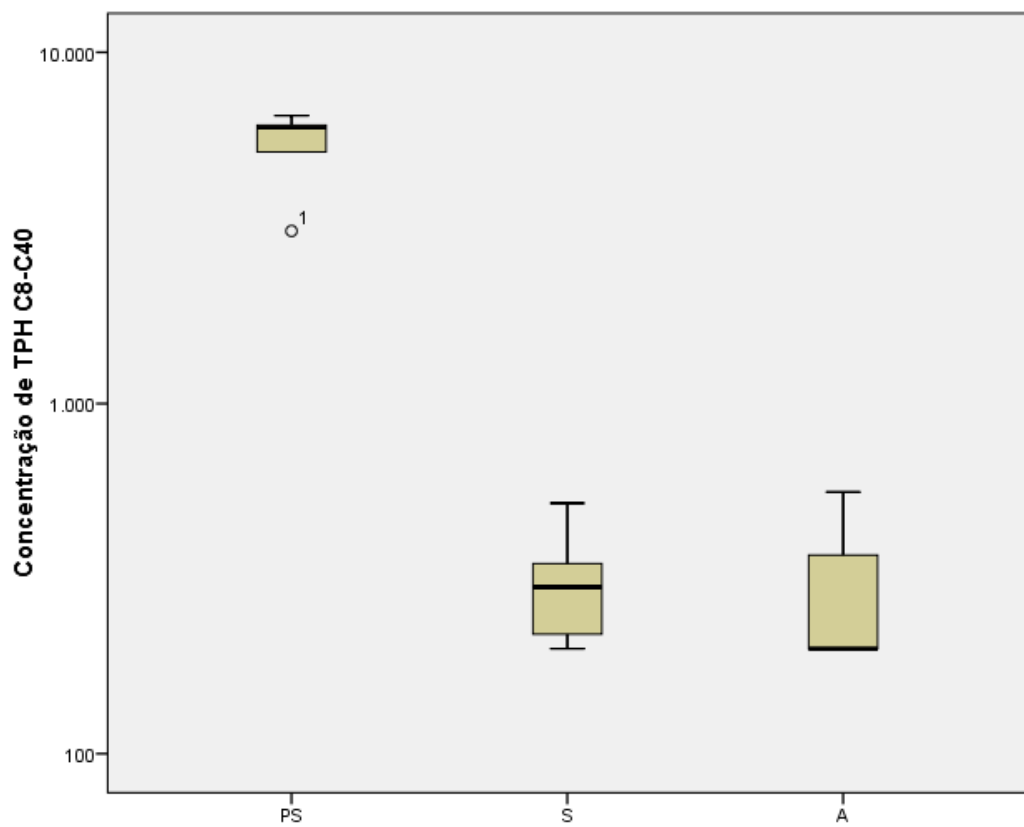


Figura 60: Resultados de decréscimo de TPH C8-C40 para o Tempo 240 minutos

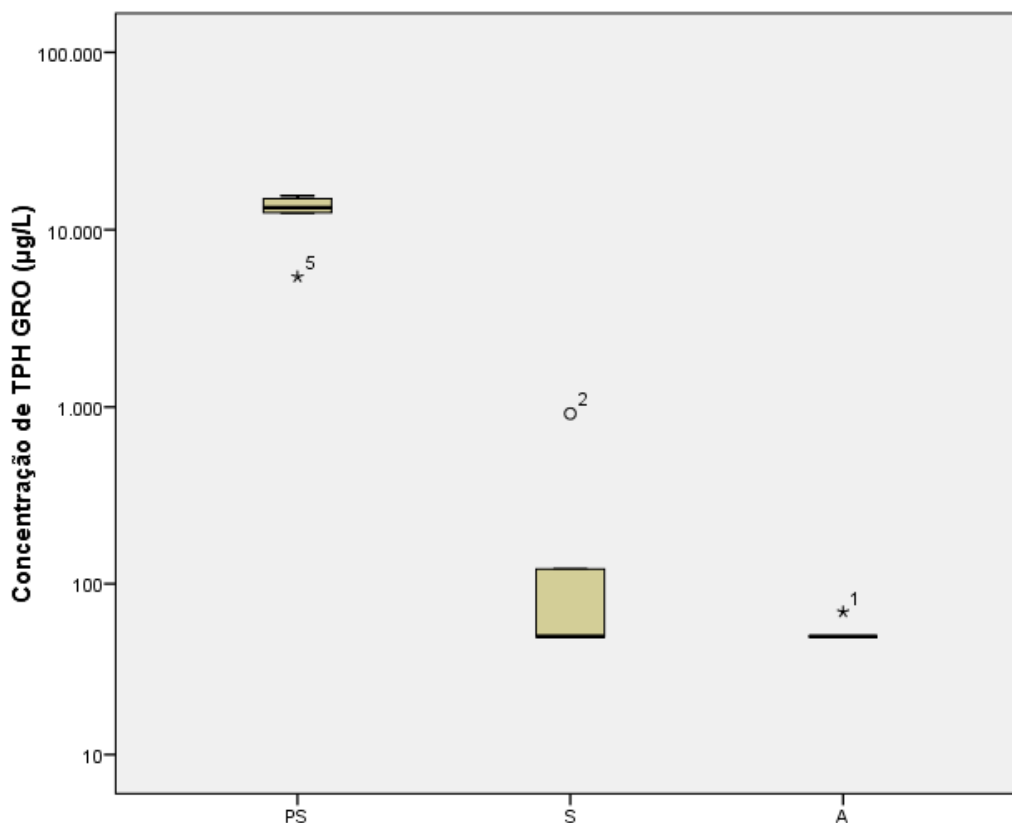


Figura 61: Resultados de decréscimo de TPH GRO para o Tempo 240 minutos

### 5.3.5 Influência da temperatura e pH no tratamento

Analisando os outros parâmetros medidos nos ensaios (temperatura e pH), percebe-se, para todos os testes realizados, um aumento da temperatura e do pH, se comparado a água subterrânea bruta com o tratamento por sucção. Já, no processo de aeração, há um decréscimo da temperatura e um aumento do pH. Estes resultados são similares ao obtido no monitoramento em escala piloto.

O Apêndice VI apresenta os resultados das médias, por ensaio, dos parâmetros temperatura e pH. As Figuras 62 e 63 apresentam estes resultados compilados.

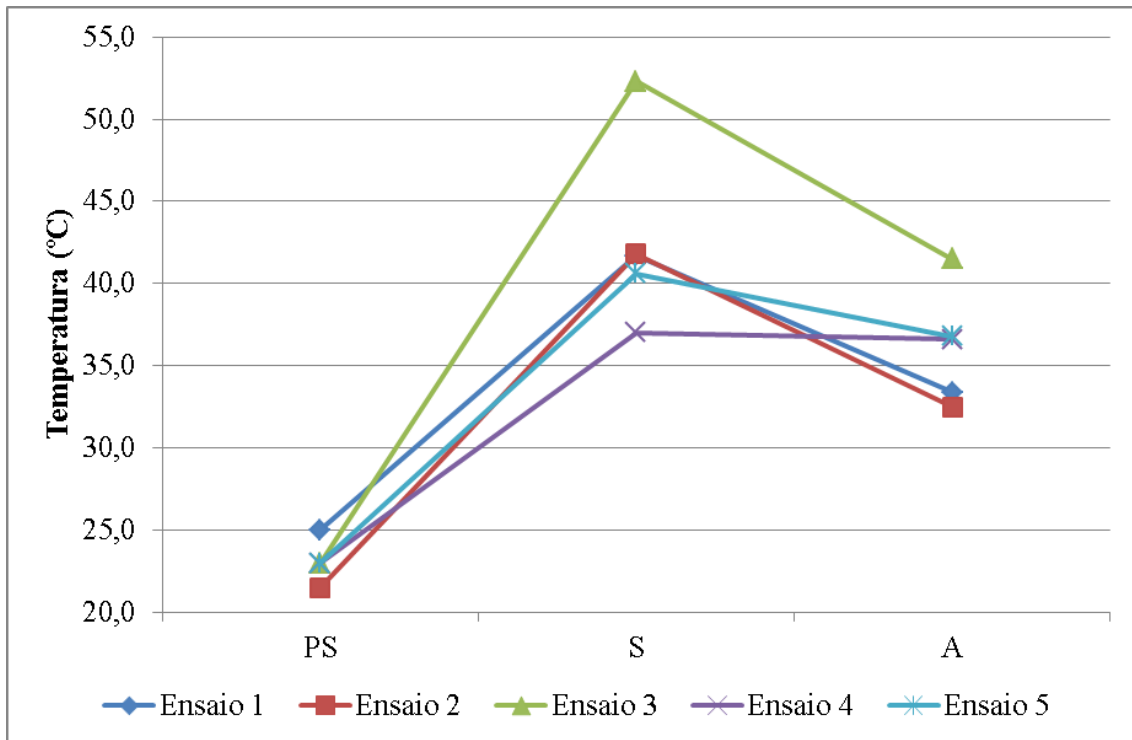


Figura 62: Comportamento do parâmetro temperatura nos ensaios realizados

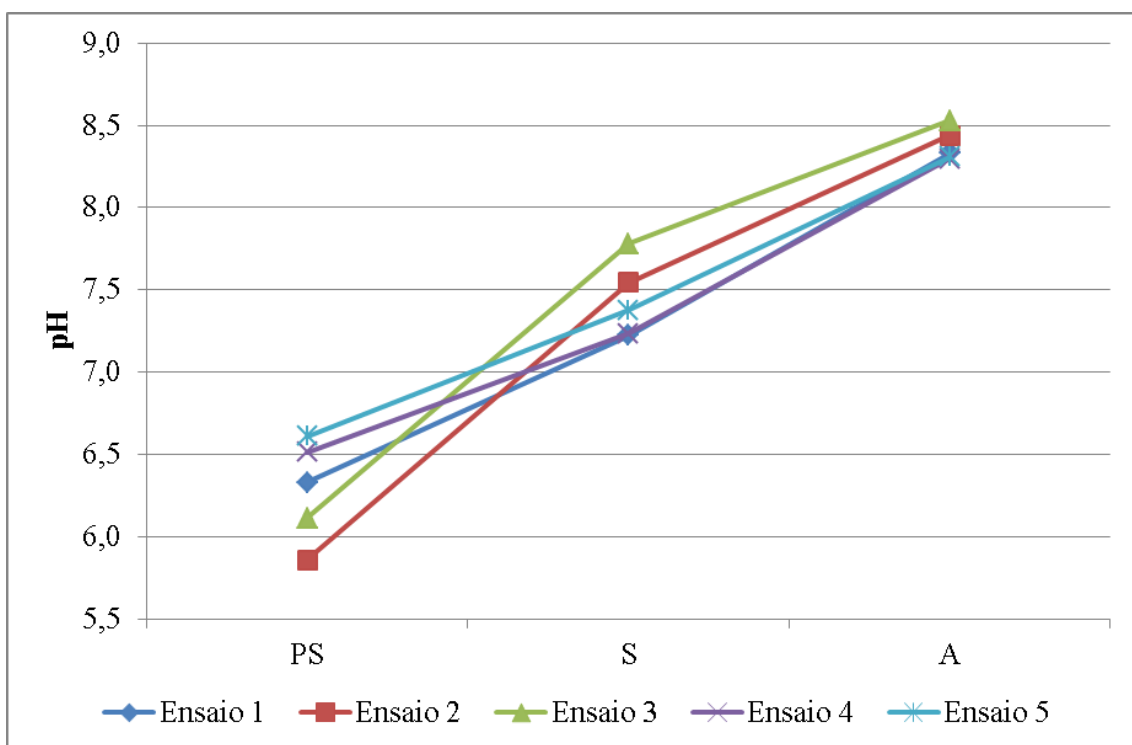


Figura 63: Comportamento do parâmetro pH nos ensaios realizados

## 6 CONCLUSÕES

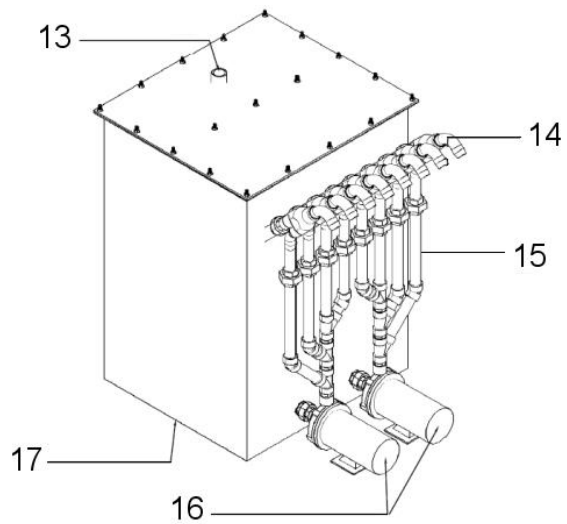
As principais conclusões do presente trabalho foram:

- A caracterização da água subterrânea contaminada nos locais estudados demonstrou que as concentrações médias de BTEX e TPH são bem superiores ao nível de investigação estabelecidos pela legislação nacional. Para benzeno, por exemplo, a concentração variou entre 1,7µg/L até 3072,3µg/L; sendo que o nível de intervenção da CONAMA 420 (2009) e de 5,0µg/L. Outra característica importante está relacionada à grande variabilidade destas concentrações presentes na água subterrânea podendo ser justificada, entre outras, pela sazonalidade e localização da pluma de contaminação. Esta realidade encontrada em Porto Alegre/RS é relatada de forma similar em diversos outros países.
- Para o tratamento da água subterrânea contaminada, desenvolveu-se um equipamento compacto composto por: a) Etapa de sucção - processo de bombeamento por sucção à vácuo da água subterrânea e, adicionalmente, o tratamento de água. O mecanismo de tratamento, neste caso, ocorreu de forma mista por volatilização, devido à pressão negativa a qual foi medida no vacuômetro instalado no injetor em -700 mmHg. A baixa pressão e o acréscimo de temperatura (média de 24,5°C para 29,4°C) proporciona a volatilização dos VOC's (no caso os BTEX), transferindo-os para a fase gasosa; e Por gás "stripping", pois no processo de sucção há entrada de ar; b) Etapa de aeração - processo de aeração por ar difuso (aeradores por aspiração) e remoção de VOC's por "air stripping"; c) Etapa de adsorção - composto por coluna mista com adsorventes de 50% carvão ativado e 50% cinza de casca de arroz.
- Os resultados obtidos em escala piloto demonstraram a eficácia do equipamento. Obtiveram-se eficiências de tratamento variando de 96,7% até 99,9% para BTEX e TPH. Demonstrou-se, inclusive, que seria possível excluir os aeradores do sistema. A unidade de sucção seguido da etapa de

adsorção são suficientes para proporcionar uma alta eficiência no processo de tratamento. Isto significa redução de custos e espaço ocupado pelo equipamento na área de tratamento.

- Os resultados obtidos em escala real comprovaram a boa operacionalidade do equipamento. O equipamento instalado promoveu uma eficiência de tratamento dos parâmetros BTEX e TPH que variou entre 95,1% até 99,9%, mesmo sem a etapa de polimento (filtro de adsorção).
- O equipamento desenvolvido foi eficiente na remoção de compostos de BTEX e TPH originados de águas subterrâneas contaminadas. As análises efetuadas demonstraram que a água tratada alcança valores que atendem aos critérios de lançamento estabelecidos pela legislação nacional vigente. Ainda, apresenta as seguintes inovações e vantagens em relação aos equipamentos tradicionais: (a) equipamento compacto com sistema de sucção a vácuo com injetores que possibilitam, além do bombeamento da água subterrânea contaminada, alta eficiência na remoção de VOC's (maior que 95%) por processo misto de tratamento “volatilização” e “stripping”, substituindo os processos convencionais com diferentes unidades, bombeamento e posterior tratamento; (b) filtro de adsorção alternativo composto por recheio misto de resíduo de cinza de casca de arroz e carvão ativado, altamente eficiente para polimento do tratamento, principalmente em relação à remoção de TPH. Substituição dos sistemas convencionais utilizando apenas carvão ativado.
- Por fim, a Figuras 64 apresenta uma imagem e a Figura 65 uma fotografia do equipamento agora comercializado a partir dos resultados deste trabalho.





**Figura 64: Projeto do equipamento (evolução)**  
**Legenda: 13 (saída dos VOC's), 14 (injetores), 15 (tubulação de ferro), 16 (bombas de recalque), 17 (estrutura metálica do equipamento).**



**Figura 65: Equipamento a ser comercializado, instalado em uma área contaminada.**

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, esta pesquisa ainda permite ampliar a capacidade de conhecimento a respeito do equipamento desenvolvido. A seguir breve lista de trabalhos que podem ser abordados:

- Estudo de toxicidade, posterior ao tratamento, de forma a se ter mais uma garantia da redução desses contaminantes na água subterrânea tratada;
- Estudo acerca do tempo necessário para remoção de 100% dos contaminantes adsorvidos no solo da área contaminada a partir da devolução da água subterrânea tratada para o local de origem;
- Uso do sistema de sucção e tratamento por vácuo e aeração como unidade de coagulação / floculação. Observa-se grande formação de bolhas no tanque, o que pode significar potencial de utilização em tratamentos de efluentes por flotação;
- Ampliar e confirmar os estudos acerca da influência do pH e temperatura para tratamento de águas subterrâneas contaminadas por BTEX e TPH.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR 10.004 – Resíduos Sólidos: Classificação, 2004. 63p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR 6508 – Grãos de Solos que passm na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. 1984.

AFFERDEN, Manfred van; RAHMAN, Khaja Z.; MOSIG, Peter; BIASE, Cecilia De; THULLNER, Martin; OSWALD, Sascha E.; MÜLLER, Roland A. Remediation of groundwater contaminated with MTBE and benzene: The potential of vertical-flow soil filter systems. *Water Research*. 45, 5063-5074, 2011.

ASTM. D850. Test Method for specific gravity of solids by water pycnometer. 2002.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. Standard For The Examination of Water And Wastewater. 19 ed. Washington, D.C., 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. CEMP (Comissão de Estudos de Matérias Primas) n° 081 Materiais para Fundição: Determinação da Distribuição Granulométrica. ABIFA, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. CEMP (Comissão de Estudos de Matérias Primas) n° 120: Materiais para Fundição – Determinação da Perda ao Fogo. ABIFA, 2003b.

ABDANUR, Adriano; NOLASCO, Marcelo Antunes. Remediação de águas subterrânea contaminada com hidrocarbonetos em uma refinaria de petróleo. *Rev. Acad. Curitiba*. v. 3, n. 2, p. 47-53. abr/jun, 2005.

ALBERGARIA, José Tomás; ALVIM-FERRAZ, Maria da Conceição M.; DELERUE-MATOS, Cristina. Remediation of sandy soils contaminated with hydrocarbons and halogenated hydrocarbons by soil vapour extraction. *Journal of Environmental Management*, 104, 195 – 201, 2012.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. AWWA Standard for Granular Activated Carbon. 1974. 19p.

AYOTAMUNO, M. J.; KOGBARA, R.B.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Petroleum contaminated ground-water: Remediation using activated carbon. *Applied Energy*. 83, 1258-1264, 2006.

BASS, David H.; HASTINGS, Nicholas A; BROW, Richard A. Performance of air sparging systems: a review of case studies. *Journal of Hazardous Materials*. 72, 101–119, 2000.

BERGER, Thomas Michael. Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos totais de petróleo – enfoque na aplicação do processo terraferm. Tese de Doutorado (Doutor em Ecologia) – Programa de Pós Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 99f.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria MS nº 2914 de 12 de dezembro de 2011. 26p.

BROWN, Richard A.; HINCHEE, Robert E.; NORRIS, Robert D.; WILSON, John T. Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons: A Flexible, Variable Speed Technology. *Remediation*. 95-109, 1996.

CAETANO, Marcelo Oliveira; RESCHKE, Karina S. dos S; MORAES, Carlos Alberto Mendes; GOMES, Luciana Paulo Gomes. Estudo de aspectos e impactos ambientais do sistema de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos provenientes de postos de combustíveis. Anais do XII Engema – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. São Paulo, SP. 2010. 14p.

CHARBENEAU, Randall J.; BEDIENT, Philip B.; LOEHR, Raymond C. Grounwater Remediation. Technomic Publishing Company, Inc: Lancaster, Pennsylvania, USA. 1 ed. v. 8. 1992. 185p.

CHAVES, Thiago Faheina; QUEIROZ, Zilvanir Fernandes de; SOUZA, Diana Nara Ribeiro de; GIRÃO, José Hélio Saraiva. Uso da Cinza de Casca de Arroz (CCA) obtida da geração de energia térmica como adsorvente de Zn (II) em soluções aquosas. *Quim. Nova*. Vol. 32, Nº 6, 1378-1383, 2009.

CHEN, Ku-Fan; KAO, Chih-Ming; CHEN, Chiu-Wen; SURAMPALLI, Rao Y.; LEE, Mu-Sheng. Control of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater by intrinsic and enhanced bioremediation. *Journal of Environmental Sciences*. 22(6), 864–871, 2010.

CHIU, H.Y.; HONG, A.; LIN, S.L.; SURAMPALLI, R.Y.; KAO, C.M. Application of natural attenuation for the control of petroleum hydrocarbon plume: Mechanisms and effectiveness evaluation. *Journal of Hydrology*. 505, 126–137, 2013.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Decisão de Diretoria nº 195-2005-E de 23 de novembro de 2005. 4p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB, GTZ Investigação para Remediação - Capítulo X. São Paulo: CETESB, 2007, p. 77.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução Nº 020 de 18 de junho de 1986. 17 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução Nº 357 de 17 de março de 2005. 23 p.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – CONSEMA. Resolução N° 128 de 2006. 9p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução N° 430 de 13 de maio de 2011. 8p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução N° 420 de 30 de dezembro de 2009. 21p.

CORSEUIL, Henry Xavier; MONTENEGRO, Martha de Almeida Prado; MARTINS, Marcos Dal Molin. Biorremediação passiva de águas subterrâneas contaminadas com derrames de gasolina. Anais dos 11° Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Rio de Janeiro, RJ. 1996. p. 1442-1447. b

CORSEUIL, Henry Xavier; SANTOS, Rui Ferreira dos; FERNANDES, Marilda. Contaminação de Aquíferos por derramamentos de gasolina e álcool. Anais do 19° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçu, PR. 1997. 5p.

CORSEUIL, Henry X.; KAIPPER, Beatriz I. A.; FERNANDES, Marilda. Cosolvency effect in subsurface systems contaminated with petroleum hydrocarbons and ethanol. *Water Research*. 38, 1449-1456, 2004.

COSTA, Ana Hilda Romero; NUNES, Cristina Cardoso; CORSEUIL, Henry Xavier. Biorremediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina e etanol com o uso de nitrato. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. N°. 2. Vol. 14, 265-274, abr/jun 2009.

CUNHA, Patrícia Österreicher; JÚNIOR, Eurípedes do Amaral Vargas; GUIMARÃES, Jean Rémy Davée; CAMPOS, Tácio Mauro Pereira; NUNES, Cassiane Maria Ferreira; COSTA, Arioaldo; ANTUNES, Franklin dos Santos; SILVA, Maria Isabel Pais da; MANO, Denise Maria. Evolution of bioventing on a gasoline-ethanol contaminated undisturbed residual soil. *Journal of Hazardous Materials*. 110, 63-76, 2004.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. Métodos e técnicas de tratamento de água. São Carlos: RiMa, 2005. 2 v. 792p.

EL-NAAS, Muftah H.; ACIO, Janice A; TELIB, Ayat E. El. Aerobic biodegradation of BTEX: Progresses and Prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1104–1122, 2014.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. Presumptive Remedy: Supplemental Bulletin Multi-Phase Extration (MPE) Technology for VOCs in Soil and Groundwater. Directive n° 9355.0-68FS / EPA 540-F-97-004 / PB97-963501. April, 1997a. 11p.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extration. EPA-542-R-97-007. September, 1997b. 246p.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. Guía Del Ciudadano para La Extracción de Vapores de los Suelos y la Aeración. EPA 542-F-01-006S. December, 2001a. 2p.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. A Citizen´s Guide to Pump and Treat. EPA 542-F-01-025. December, 2001b. 2p.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. A Citizen´s Guide to Activated Carbon Treatment. EPA 542-F-01-020. December, 2001c. 2p.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. A Citizen´s Guide to Air Stripping. EPA 542-F-01-016. December, 2001d. 2p.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. Method 8015d: Nonhalogenated Organics Using GC/FID. Revision 4. June 2003.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. Method 3510c: Separatory Funnel Liquid-liquid Extraction. Revision 3. December 1996.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. Method 8260b: Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). Revision 2. December 1996.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTONS AGENCY. Method 8015b: Nonhalogenated Organics Using GC/FID. Revision 2. December 1996.

FAN, W.; YANG, Y.S.; LU, Y. DU, X.Q.; ZHANG, G.X. Hydrogeo-chemical impacts of air sparging remediation on a semi-confined aquifer: Evidences from field monitoring and modeling. *Chemosphere*, 90, 1419–1426, 2013.

FERRARESE, Elisa; ANDREOTTOLA, Gianni; OPREA, Irina Aura. Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation. 152, 128-139, 2008.

FINOTTI, Alexandra R.; CAICEDO, Nelson O. Luna; RODRIGUEZ, Maria Teresa Raya. Contaminações Subterrâneas com Combustíveis Derivados de Petróleo: Toxicidade e a Legislação Brasileira. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Nº 2. Vol. 6, 29-46, abr/jun 2001.

FRANCO, M.; CHAIREZ, I.; POZNYAKA, T.; POZNYAKA, A. BTEX decomposition by ozone in gaseous phase. *Journal of Environmental Management*, 95, S55 - S60, 2012.

GALANTE, Giovana Cristina Setti. Plumas de Contaminação por hidrocarbonetos em diferentes cenários hidrogeológicos paulistas. Dissertação (Mestre em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade de São Paulo, 2008. 150f.

GOES, Roberto Charles. Toxicologia Industrial: Um Guia Prático para Prevenção e Primeiros Socorros. 1 ed. Rio de Janeiro/RJ: Revinter, 1997. 250p.

IMHOFF, Karl; IMHOFF, Klaus R. Manual de tratamento de águas residuárias. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1986. 301 p.

JUNEAU JR, Armand A.; MOYER, Ellen, O'CONNELL, Joseph E. Case Study of Ex Situ Remediation and Conversion to a Combined In Situ/Ex Situ Bioremediation Approach at an Oxygenated Gasoline Release Site. *Remediation*. Spring, 19-37, 2007.

KHAN, Faisal I.; HUSAIN, Tahir. Evaluation of a petroleum hydrocarbon contaminated site for natural attenuation using 'RBMNA' methodology. *Environmental Modelling & Software*. 18, 179-194, 2003.

KHAN, Faisal I.; HUSAIN, Tahir; HEJAZI, Ramzi. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*. 71. 95-122, 2004.

KIELING, Amanda Gonçalves; CAETANO, Marcelo Oliveira; SCHNEIDER, Joice Brochier; BREHM, Feliciane Andrade. Avaliação de Operações do processo de remediação aplicadas em áreas contaminadas por hidrocarbonetos provenientes de postos de combustíveis. Anais do XII Engema – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. São Paulo, SP. 2010. 14p.

KIELING, Amanda Gonçalves. Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2009. 131f.

LEITE, Valderi Duarte; FERNANDES, Fernando; JUCÁ, José Fernando Thomé; GOMES, Luciana Paulo Gomes; LOPES, Wilton Silva; SOUSA, José Tavares de; SILVA, Fabrícia Maria Santana; CAETANO, Marcelo Oliveira. Estudo do Processo de Stripping de Amônia de Lixiviado de Aterro Sanitário. In: GOMES, Luciana Paulo. Resíduos Sólidos: Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras. São Leopoldo/RS: ABES, 2009. p. 60 – 96.

LIANG, S.H.; KAO, C.M.; KUO, Y.C.; CHEN, K.F.; YANG, B.M. In situ oxidation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using passive ISCO system. *Water Research*, 45, 2496 - 2506, 2011.

MAIR, J.; SCHINNER; F.; MARGESIN R. A feasibility study on the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site: Effects of temperature and biostimulation. *Cold Regions Science and Technology*. 96, 122–128, 2013.

MARIANO, Adriano Pinto; ANGELIS, Dejanira de Franceschi de; BONOTTO, Daniel Marcos. Biodegradação em área contaminada com óleo diesel. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 12, Nº 13, p. 296-304, 2007.

MALAMUD, Erico de Souza Teixeira; AMORIM JÚNIOR, Carlos José de; ROSÁRIO, Mário do; CORSEUIL, Henry Xavier. Avaliação da atenuação natural dos contaminantes BTEX e etanol em um derrame controlado de gasolina através do balanço de massa. In: Anais do 23º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, MS. 2005, 7p.

METCALF & EDDY INC. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Ed. 4. New York, EUA. McGraw-Hill Companies. 2003, 1824p.

MIRANDA, Matheus Lopes da Silva; PONTES, Patrícia Procópio. Estudo do Potencial de Biorremediação de óleos lubrificantes em solos contaminados. In: Anais do 26º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, RS. 2011, 8p

MOREIRA, César Augusto; DOURADO, João Carlos. Monitoramento da atenuação natural de pluma de contaminação pelo Método de Radar de Penetração no Solo (GPR). *Revista Brasileira de Geofísica*. 25(4), 389-398, 2007.

NG CHILTON *et. al.* Physical and chemical properties of selected agricultural byproduct-based activated carbons and their ability to adsorb geosmin. *Bioresource Technology*. 84, p 177-185, 2002.

NUNES, Cristina Cardoso; CORSEUIL, Henry Xavier. A importância da biodegradação anaeróbia em aquíferos impactados por gasolina e etanol. Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. In: Anais do 23º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, MS. 2005, 7p.

ODENCRANTZ, Joseph E.; JOHNSON, Jeffrey G.; KOENIGSBERG, Stephen S. Bioremediation of Hydrocarbons Using an Oxygen-Releasing Compound. *Remediation*. 99-114, 1996.

OGA, Seizi; CAMARGO, Márcia Maria de Almeida; BATISTUZZO, José Antônio de Oliveira. Fundamentos de Toxicologia. 3 ed. São Paulo: Atheneu Editora, 2008. 677p.

OLIVEIRA, Antônio Manoel dos Santos & CORRÊA FILHO, Diogo (Coordenação). Ensaio de Permeabilidade em solos – orientações para sua execução. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo. 3ª edição revisada. 1996 – Boletim nº 04.

PATNAIK, Pradyot. A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances. 2 ed. New York/United States of America: John Wiley & Sons, 1999. 984p.

PAYNE, Fred C.; QUINNAN, Joseph A.; POTTER, Scott T. Remediation hydraulics. Boca Raton: CRC Press, 2008. 408 p.

POULOPOULOSA, S.G.; VOUTSASB, E.C.; GRIGOROPOULOUA, H.P.; PHILIPPOPOULOSA, C.J. Stripping as a pretreatment process of industrial oily wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. B117, 135–139, 2005.



PROJECONSULT. Relatório de instalação de poços de monitoramento e amostragem. 03 de julho de 2007a. 17p.

PROJECONSULT. Relatório de instalação de poços de monitoramento e amostragem. 26 de novembro de 2007b. 17p.

RAHBEH, M.E; MOHTAR, R.H. Application of multiphase transport models to field remediation by air sparging and soil vapor extraction. *Journal of Hazardous Materials* 143, 156–170, 2007.

RAMALHO, Rubens Sette. *Tratamento de Aguas Residuales*. Ed. 1. Barcelona, Espanha. Editorial Reverté S.A. 1993, 705p.

SCHNEIDER, Márcio Roberto; SILVEIRA, Orlei Damásio; CORSEUIL, Henry Xavier. Intemperismo da gasolina com etanol em sistemas subsuperficiais. Anais do 23º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, MS. 2005, 9p.

SILVA, N.; JUNQUEIRA, V. C. A.; SILVEIRA, N. F. A.. Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos. São Paulo: Varela, 1997. 31-39p.

SILVA, Selma Cristina da e RIBEIRO, Márcia Maria Rios. Enquadramento dos corpos d'água e cobrança pelo uso da água na Bacia do Rio Pirapama – PE. Engenharia Sanitária e Ambiental. 11 (4): 371-379, 2006.

SIMANTIRAKI, F.; KOLLIAS, C.G.; MARATOS, D.; HAHLADAKIS, J.; GIDARAKOS, E. Qualitative determination and application of sewage sludge and municipal solid waste compost for BTEX removal from groundwater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1, 9–17, 2013.

SMITH, J.L; REIBLE, D.D, Reible; KOO; Y.S; CHEAH, E.P.S. Vacuum extraction of a nonaqueous phase residual in a heterogeneous vadose zone. *Journal of Hazardous Materials*. 49, 247-265, 1996.

SPIRA, Yvonne; HENSTOCK, John; NATHANAIL, Paul; MÜLLER, Dietmar; EDWARDS, David. A European Approach to Increase Innovative Soil and Groundwater Remediation Technology Applications. Remediation. Publicado online em Wiley Interscience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/rem.20103. 2006.

SUTHERSAN, Suthan S.; PAYNE, Fred C. In Situ Remediation Engineering. CRC Press: Boca Raton, Florida, USA. 2005. 511p.

SOARES, António Alves; ALBERGARIA, José Tomás; DOMINGUES, Valentina Fernandes; ALVIM-FERRAZ, Maria da Conceição M.; DELERUE-MATOS, Cristina. Remediation of soils combining soil vapor extraction and bioremediation: Benzene. *Chemosphere*. 80, 823–828, 2010.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D. et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Emater/RS – UFRGS, 2002. 126 p.

TEXEIRA, Aline Schneider. Isolamento e caracterização de bactérias degradadoras de gasolina comercial. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. 95f.

TIBURTIUS, Elaine Regina Lopes; ZAMORA, Patrício Peralta. Contaminação de águas por BTXS e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. *Química Nova*. Vol. 27, Nº 3, p.441-446, 2004.

TIBURTIUS, Elaine Regina Lopes; ZAMORA, Patrício Peralta; EMMEL, Alexandre, LEAL, Elenise Sauer. Degradação de BTXS via processos oxidativos avançados. *Quim. Nova*. Vol. 28, Nº 1, p. 61-64, 2005a.

TIBURTIUS, Elaine Regina Lopes; ZAMORA, Patrício Peralta; EMMEL. Treatment of gasoline-contaminated waters by advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*. B126, 86-90, 2005b.

SPERLING, Marcos von. Princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 211 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

WATTS, Richard J.; HALLER, Daniel R.; JONES, Alexander P.; TEEL, Amy L. A foundation for the risk-based treatment of gasoline-contaminated soils using modified Fenton's reactions. *Journal of Hazardous Materials*. B76, 73-89, 2000.

WIRTHENSOHNA, T.; SCHOEBERL, P.; GHOSH, U.; FUCHSA, W. Pilot plant experiences using physical and biological treatment steps for the remediation of groundwater from a former MGP site. *Journal of Hazardous Materials*. 163, 43-52, 2009.

YONG, Raymond N.; MULLIGAN, Catherine N. Natural attenuation of contaminants in soil. Boca Raton: Lewis, 2004. 319 p

## APÊNDICE I – Resultados do Monitoramento em Escala Piloto

Tabela 36: Resultados do monitoramento para o poço de sucção em escala piloto.

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
1	0	0,4	660,0	82,8	354,0	3543,0	1289,0	4832,0	23,5	80,0	1208,5	167,7	5,8	304,0	3395,5	-
1	240	0,4	1813,0	213,0	888,0	7892,0	3508,0	11340,0	26,0	300,0	1698,2	248,5	5,8	249,0	2736,5	-
2	0	0,4	289,0	55,0	219,0	14443,0	809,0	15251,0	23,5	40,0	1420,4	318,0	6,5	216,0	840,0	-
2	240	0,4	683,0	118,0	576,0	13498,0	1659,0	15158,0	27,0	0,0	5318,4	205,4	6,3	914,0	10194,0	-
3	0	0,4	718,0	116,0	535,0	6133,0	1780,0	7913,0	25,5	0,0	1915,3	141,9	6,5	278,0	548,0	-
3	240	0,4	553,0	91,6	428,0	4197,0	879,0	5075,0	28,0	20,0	1812,5	51,9	6,2	420,0	1952,0	-
4	0	0,4	0,4	0,4	1,3	71752,0	0,3	71752,0	25,0	1340,0	304,1	0,0	6,3	209,0	371,0	-
4	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	29,0	680,0	528,6	0,0	6,5	150,0	1151,5	-
5	0	16,8	352,0	352,0	1762,0	115682,0	3611,0	119293,0	20,0	2380,0	10147,6	37,9	6,2	638,0	1606,0	200,2
5	240	0,4	0,4	0,4	1,3	30285,0	0,3	30285,0	23,0	620,0	599,9	13,8	6,4	109,0	1015,0	149,1
6	0	59,5	326,0	316,0	1819,0	71673,0	3454,0	75128,0	21,0	200,0	3695,0	42,5	6,2	464,0	2794,5	196,0
6	240	0,4	0,4	0,4	1,3	22387,0	0,3	22387,0	23,0	220,0	1564,0	34,4	6,2	292,0	2025,5	138,5
<b>Média</b>		<b>5,5</b>	<b>368,6</b>	<b>116,4</b>	<b>565,9</b>	<b>46386,6</b>	<b>1512,6</b>	<b>47895,3</b>	<b>24,9</b>	<b>570,7</b>	<b>2271,8</b>	<b>94,4</b>	<b>6,2</b>	<b>379,3</b>	<b>1920,4</b>	<b>170,9</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>15,5</b>	<b>467,3</b>	<b>125,0</b>	<b>640,7</b>	<b>51140,2</b>	<b>1574,6</b>	<b>52000,3</b>	<b>2,6</b>	<b>661,8</b>	<b>2433,6</b>	<b>103,6</b>	<b>0,2</b>	<b>215,7</b>	<b>2419,7</b>	<b>31,7</b>
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		<b>284,0</b>	<b>126,8</b>	<b>107,3</b>	<b>113,2</b>	<b>110,2</b>	<b>104,1</b>	<b>108,6</b>	<b>10,2</b>	<b>116,0</b>	<b>107,1</b>	<b>109,7</b>	<b>3,7</b>	<b>56,9</b>	<b>126,0</b>	<b>18,5</b>

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Benzeno (µg/L)</b>	<b>Tolueno (µg/L)</b>	<b>Etilbenzeno (µg/L)</b>	<b>Xileno (µg/L)</b>	<b>TPH DRO (µg/L)</b>	<b>TPH GRO (µg/L)</b>	<b>TPH Total (µg/L)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>VOC's (ppm)</b>	<b>Cor Aparente (mg/L Pt/Co)</b>	<b>Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)</b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Sólidos Suspensos (mg/L)</b>	<b>Alcalinidade (mg/L)</b>
<b>Máximo</b>		<b>59,5</b>	<b>1813,0</b>	<b>352,0</b>	<b>1819,0</b>	<b>168178,0</b>	<b>4476,0</b>	<b>172654,0</b>	<b>29,0</b>	<b>2380,0</b>	<b>10147,6</b>	<b>318,0</b>	<b>6,5</b>	<b>914,0</b>	<b>10194,0</b>	<b>200,2</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>20,0</b>	<b>0,0</b>	<b>304,1</b>	<b>0,0</b>	<b>5,8</b>	<b>109,0</b>	<b>44,5</b>	<b>138,5</b>
<b>CONAMA 420</b>																
<b>(2009)</b>		<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Não</b>																
<b>Conformidade</b>		<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>5,0</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: TPH DRO (C10-C28) – faixa do diesel; TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; TPH Total (C8–C40); Vapores Orgânicos Voláteis (VOCs).

Tabela 37: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando a sucção em escala piloto.

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
1	0	0,4	190,0	46,6	206,0	10419,0	505,0	10924,0	27,5	40,0	1091,8	199,1	6,6	115,0	127,0	-
1	60	0,4	552,0	76,0	304,0	3542,0	1042,0	4584,0	29,0	180,0	984,3	-	6,6	108,0	-	-
1	120	0,4	585,0	78,9	325,0	3655,0	1102,0	4757,0	31,5	380,0	871,0	-	6,4	102,0	-	-
1	180	0,4	833,0	103,0	410,0	1741,0	1540,0	3282,0	32,5	340,0	863,0	-	6,6	94,0	-	-
1	240	0,4	461,0	73,3	319,0	5071,0	943,0	6313,0	26,0	400,0	1698,2	199,4	5,8	249,0	47,5	-
2	0	0,4	377,0	59,2	260,0	1,0	1121,0	1121,0	26,0	180,0	1457,6	91,5	6,4	234,0	171,0	-
2	60	0,4	740,0	101,0	416,0	1422,0	1389,0	2811,0	29,0	140,0	1008,2	-	6,3	209,0	-	-
2	120	0,4	0,4	0,4	1,3	3537,0	0,3	3537,0	31,0	200,0	1195,4	-	6,3	213,0	-	-
2	180	0,4	0,4	0,4	1,3	6373,0	0,3	6373,0	32,0	180,0	1201,9	-	6,3	182,0	-	-
2	240	0,4	314,0	54,6	255,0	12166,0	674,0	12840,0	34,0	120,0	1342,3	101,1	6,3	188,0	86,0	-
3	0	0,4	505,0	83,2	372,0	1,0	1080,0	1080,0	29,0	80,0	1347,6	10,3	6,3	210,0	88,0	-
3	60	0,4	520,0	84,6	396,0	509,0	1130,0	1638,0	30,0	100,0	1477,5	-	6,3	251,0	-	-
3	120	0,4	498,0	83,8	394,0	6582,0	1101,0	7683,0	32,0	80,0	1524,8	-	6,2	226,0	-	-
3	180	0,4	515,0	85,1	403,0	7561,0	1125,0	8686,0	33,5	100,0	1581,1	-	6,2	255,0	-	-
3	240	0,4	51,0	26,8	86,5	5985,0	1196,0	7182,0	35,0	260,0	1425,4	66,4	6,1	194,0	63,0	-
4	0	0,4	0,4	0,4	1,3	41681,0	0,3	41681,0	25,0	1340,0	569,9	0,0	6,2	197,0	153,0	-
4	60	0,4	0,4	0,4	1,3	21147,0	0,3	21147,0	30,0	7320,0	661,5	0,0	6,2	233,0	-	-
4	120	0,4	0,4	0,4	1,3	18525,0	0,3	18525,0	33,0	5420,0	876,8	0,0	6,2	258,0	-	-

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
4	180	0,4	0,4	0,4	1,3	43661,0	0,3	43661,0	34,0	5360,0	609,0	0,0	6,2	199,0	-	-
4	240	0,4	0,4	0,4	1,3	27229,0	0,3	27229,0	36,0	4800,0	473,8	0,0	6,2	203,0	127,5	-
5	0	0,4	0,4	0,4	1,3	29802,0	0,3	29802,0	22,0	4980,0	604,9	0,0	6,3	160,0	394,0	202,4
5	60	0,4	0,4	0,4	1,3	23164,0	0,3	23164,0	25,0	5740,0	1292,9	-	6,2	182,0	-	168,3
5	120	0,4	0,4	0,4	1,3	20441,0	0,3	20441,0	27,0	2980,0	1122,1	-	6,1	332,0	-	161,9
5	180	0,4	0,4	0,4	1,3	17284,0	0,3	17284,0	27,0	620,0	823,7	-	6,1	342,0	-	178,9
5	240	0,4	0,4	0,4	1,3	24343,0	0,3	24343,0	29,0	3740,0	629,1	0,0	6,1	271,0	124,0	161,9
6	0	0,4	0,4	0,4	1,3	59539,0	0,3	59539,0	22,0	1000,0	563,6	0,0	6,1	101,0	2098,0	159,8
6	60	0,4	0,4	0,4	1,3	21374,0	0,3	21374,0	25,0	4640,0	938,9	-	6,1	121,0	-	168,3
6	120	0,4	0,4	0,4	1,3	8803,0	0,3	8803,0	28,5	3580,0	544,7	-	6,1	100,0	-	174,7
6	180	0,4	0,4	0,4	1,3	21606,0	0,3	21606,0	29,0	9460,0	682,7	-	6,1	120,0	-	170,4
6	240	0,4	0,4	0,4	1,3	36604,0	0,3	36604,0	31,0	3160,0	399,7	3,9	6,1	81,0	1655,5	149,1
<b>Média</b>		<b>0,4</b>	<b>204,9</b>	<b>32,1</b>	<b>138,9</b>	<b>16125,6</b>	<b>465,1</b>	<b>16600,5</b>	<b>29,4</b>	<b>2230,7</b>	<b>995,5</b>	<b>44,8</b>	<b>6,2</b>	<b>191,0</b>	<b>427,9</b>	<b>169,5</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,0</b>	<b>272,8</b>	<b>39,4</b>	<b>171,9</b>	<b>14967,8</b>	<b>566,8</b>	<b>14572,7</b>	<b>3,7</b>	<b>2650,7</b>	<b>376,5</b>	<b>71,9</b>	<b>0,2</b>	<b>69,6</b>	<b>689,0</b>	<b>14,2</b>
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		<b>0,0</b>	<b>133,1</b>	<b>122,7</b>	<b>123,7</b>	<b>92,8</b>	<b>121,9</b>	<b>87,8</b>	<b>12,4</b>	<b>118,8</b>	<b>37,8</b>	<b>160,7</b>	<b>2,8</b>	<b>36,4</b>	<b>161,0</b>	<b>8,4</b>
<b>Máximo</b>		<b>0,4</b>	<b>833,0</b>	<b>103,0</b>	<b>416,0</b>	<b>59539,0</b>	<b>1540,0</b>	<b>59539,0</b>	<b>36,0</b>	<b>9460,0</b>	<b>1698,2</b>	<b>199,4</b>	<b>6,6</b>	<b>342,0</b>	<b>2098,0</b>	<b>202,4</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1080,0</b>	<b>22,0</b>	<b>40,0</b>	<b>399,7</b>	<b>0,0</b>	<b>5,8</b>	<b>81,0</b>	<b>47,5</b>	<b>149,1</b>
<b>CONAMA 420</b>		<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
(2009)	Não	0,0	2,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conformidade																

Legenda: TPH DRO (C10-C28) – faixa do diesel; TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; TPH Total (C8–C40); Vapores Orgânicos Voláteis (VOCs).

Tabela 38: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando o aerador 1 em escala piloto.

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
1	0	0,4	0,4	0,4	1,3	895,0	0,3	895,0	26,0	0,0	737,5	154,8	8,0	78,0	69,5	-
1	60	0,4	0,4	0,4	1,3	922,0	0,3	922,0	26,5	0,0	866,3	-	8,0	96,0	-	-
1	120	0,4	0,4	0,4	1,3	802,0	0,3	802,0	27,5	0,0	938,8	-	7,9	106,0	-	-
1	180	0,4	0,4	0,4	1,3	2725,0	0,3	2725,0	28,0	0,0	909,5	-	8,0	99,0	-	-
1	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1876,0	0,3	1877,0	34,0	0,0	650,3	220,6	6,5	77,0	69,0	-
2	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1981,0	0,3	1981,0	26,0	0,0	908,5	93,2	7,6	80,0	45,0	-
2	60	0,4	94,1	47,0	143,0	1,0	331,0	331,0	26,0	0,0	859,8	-	7,6	98,0	-	-
2	120	0,4	0,4	0,4	1,3	2353,0	0,3	2353,0	26,0	0,0	835,8	-	7,6	98,0	-	-
2	180	0,4	0,4	0,4	1,3	1575,0	0,3	1575,0	27,0	0,0	1070,9	-	7,6	118,0	-	-
2	240	0,4	0,4	0,4	1,3	4312,0	0,3	4312,0	29,0	0,0	970,6	122,5	7,5	143,0	88,5	-
3	0	0,4	59,9	26,4	90,7	1,0	192,0	192,0	27,0	0,0	836,0	74,0	7,4	125,0	91,0	-
3	60	0,4	56,2	25,5	85,1	1,0	179,0	179,0	27,0	0,0	1055,9	-	7,6	125,0	-	-
3	120	0,4	0,4	0,4	1,3	3247,0	0,3	3247,0	29,0	0,0	1221,6	-	7,5	162,0	-	-
3	180	0,4	53,0	23,2	82,2	4328,0	177,0	4505,0	30,0	0,0	1007,2	-	7,5	169,0	-	-
3	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	184,0	184,0	30,5	0,0	1314,7	39,1	7,5	161,0	87,0	-
4	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	0,0	387,0	0,0	7,6	88,0	191,5	-
4	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	27,0	0,0	477,1	0,0	7,5	113,0	-	-
4	120	0,4	0,4	0,4	1,3	22971,0	0,3	22971,0	28,0	0,0	400,5	0,0	7,3	123,0	-	-



Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
4	180	0,4	0,4	0,4	1,3	14350,0	0,3	14350,0	29,0	0,0	601,8	0,0	7,0	175,0	-	-
4	240	0,4	0,4	0,4	1,3	13280,0	0,3	13280,0	29,0	0,0	520,9	0,0	6,8	181,0	70,5	-
5	0	0,4	0,4	0,4	1,3	10743,0	0,3	10743,0	21,0	0,0	459,7	0,0	6,4	70,0	60,0	138,5
5	60	0,4	0,4	0,4	1,3	14599,0	0,3	14599,0	21,0	0,0	448,1	-	6,4	81,0	-	127,8
5	120	0,4	0,4	0,4	1,3	17491,0	0,3	17491,0	21,0	0,0	460,5	-	6,3	93,0	-	159,8
5	180	0,4	0,4	0,4	1,3	17172,0	0,3	17172,0	22,0	0,0	478,5	-	6,3	124,0	-	121,4
5	240	0,4	0,4	0,4	1,3	19389,0	0,3	19389,0	29,0	0,0	364,6	0,0	6,3	113,0	57,0	149,1
6	0	0,4	0,4	0,4	1,3	28251,0	0,3	28251,0	20,0	0,0	488,2	7,1	6,2	76,0	1621,0	138,5
6	60	0,4	0,4	0,4	1,3	27411,0	0,3	27411,0	22,0	0,0	520,3	-	6,1	80,0	-	138,5
6	120	0,4	0,4	0,4	1,3	15305,0	0,3	15305,0	21,0	0,0	517,9	-	6,2	77,0	-	132,1
6	180	0,4	0,4	0,4	1,3	26998,0	0,3	26998,0	23,0	0,0	519,9	-	6,2	83,0	-	138,5
6	240	0,4	0,4	0,4	1,3	30457,0	0,3	30457,0	24,0	0,0	528,9	22,1	6,1	82,0	1596,5	153,4
<b>Média</b>		<b>0,4</b>	<b>9,1</b>	<b>4,4</b>	<b>14,5</b>	<b>9448,0</b>	<b>35,7</b>	<b>9483,3</b>	<b>26,1</b>	<b>0,0</b>	<b>711,9</b>	<b>48,9</b>	<b>7,1</b>	<b>109,8</b>	<b>337,2</b>	<b>139,7</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,0</b>	<b>23,4</b>	<b>11,0</b>	<b>35,4</b>	<b>10256,4</b>	<b>84,2</b>	<b>10225,6</b>	<b>3,4</b>	<b>0,0</b>	<b>269,6</b>	<b>69,7</b>	<b>0,7</b>	<b>33,0</b>	<b>595,1</b>	<b>11,6</b>
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		<b>0,0</b>	<b>256,1</b>	<b>248,1</b>	<b>244,8</b>	<b>108,6</b>	<b>235,6</b>	<b>107,8</b>	<b>13,1</b>	<b>-</b>	<b>37,9</b>	<b>142,5</b>	<b>9,6</b>	<b>30,0</b>	<b>176,5</b>	<b>8,3</b>
<b>Máximo</b>		<b>0,4</b>	<b>94,1</b>	<b>47,0</b>	<b>143,0</b>	<b>30457,0</b>	<b>331,0</b>	<b>30457,0</b>	<b>34,0</b>	<b>0,0</b>	<b>1314,7</b>	<b>220,6</b>	<b>8,0</b>	<b>181,0</b>	<b>1621,0</b>	<b>159,8</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>20,0</b>	<b>0,0</b>	<b>364,6</b>	<b>0,0</b>	<b>6,1</b>	<b>70,0</b>	<b>45,0</b>	<b>121,4</b>
<b>CONAMA 420</b>		<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
(2009)	Não	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conformidade																

Legenda: TPH DRO (C10-C28) – faixa do diesel; TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; TPH Total (C8–C40); Vapores Orgânicos Voláteis (VOCs).

Tabela 39: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando o aerador 2 em escala piloto.

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
1	0	0,4	0,4	0,4	1,3	483,0	0,3	483,0	24,0	0,0	577,7	160,7	8,4	60,0	48,0	-
1	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	25,0	0,0	650,3	-	8,3	68,0	-	-
1	120	0,4	0,4	0,4	1,3	433,0	0,3	433,0	25,5	0,0	713,5	-	8,4	73,0	-	-
1	180	0,4	0,4	0,4	1,3	596,0	0,3	596,0	26,0	0,0	722,7	-	8,3	78,0	-	-
1	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1377,0	0,3	1377,0	27,0	0,0	790,2	225,7	8,4	84,0	57,0	-
2	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1068,0	0,3	1068,0	26,0	0,0	669,6	114,9	7,9	62,0	30,5	-
2	60	0,4	0,4	0,4	1,3	896,0	0,3	896,0	26,0	0,0	712,9	-	8,0	67,0	-	-
2	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1171,0	0,3	1171,0	26,0	0,0	746,3	-	7,9	72,0	-	-
2	180	0,4	0,4	0,4	1,3	10979,0	0,3	10979,0	27,0	0,0	783,8	-	7,9	77,0	-	-
2	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1645,0	0,3	1645,0	27,5	0,0	882,2	128,4	7,9	93,0	34,0	-
3	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,5	0,0	688,0	96,5	7,6	77,0	55,5	-
3	60	0,4	0,4	0,4	1,3	813,0	0,3	813,0	26,5	0,0	780,4	-	7,9	92,0	-	-
3	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	27,0	0,0	902,4	-	7,9	99,0	-	-
3	180	0,4	0,4	0,4	1,3	1647,0	0,3	1647,0	28,0	0,0	907,4	-	7,9	104,0	-	-
3	240	0,4	0,4	0,4	1,3	4279,0	0,3	4279,0	28,5	0,0	991,9	121,4	7,8	104,0	64,5	-
4	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	0,0	1180,0	0,0	7,9	192,0	116,5	-
4	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	0,0	837,6	0,0	8,0	115,0	-	-
4	120	0,4	0,4	0,4	1,3	10979,0	0,3	10979,0	27,0	0,0	774,8	0,0	8,0	160,0	-	-

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
4	180	0,4	0,4	0,4	1,3	21148,0	0,3	21148,0	28,0	0,0	652,2	0,0	8,1	150,0	-	-
4	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	29,0	0,0	856,4	0,0	8,1	165,0	97,5	-
5	0	0,4	0,4	0,4	1,3	6925,0	0,3	6925,0	20,0	0,0	516,1	6,9	7,6	93,0	116,5	108,6
5	60	0,4	0,4	0,4	1,3	9425,0	0,3	9425,0	20,0		444,2	-	7,6	80,0	-	127,8
5	120	0,4	0,4	0,4	1,3	14564,0	0,3	14564,0	21,0		632,8	-	7,4	91,0	-	121,4
5	180	0,4	0,4	0,4	1,3	19621,0	0,3	19621,0	21,0		461,7	-	7,4	86,0	-	119,3
5	240	0,4	0,4	0,4	1,3	27736,0	0,3	27736,0	21,0	0,0	417,8	13,6	7,3	92,0	67,5	95,9
6	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	18,0	0,0	446,4	45,0	7,1	42,3	1579,0	110,8
6	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	21,0	0,0	530,8	-	6,7	58,0	-	117,2
6	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	21,0	0,0	582,6	-	6,7	66,0	-	106,5
6	180	0,4	0,4	0,4	1,3	15774,0	0,3	15774,0	22,0	0,0	551,9	-	6,7	67,0	-	119,3
6	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	22,0	0,0	558,0	65,8	6,5	64,0	1587,5	138,5
<b>Média</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>5052,3</b>	<b>0,3</b>	<b>5052,3</b>	<b>24,7</b>	<b>0,0</b>	<b>698,8</b>	<b>65,3</b>	<b>7,7</b>	<b>91,0</b>	<b>321,2</b>	<b>116,5</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>7667,4</b>	<b>0,0</b>	<b>7667,4</b>	<b>3,1</b>	<b>0,0</b>	<b>177,7</b>	<b>72,3</b>	<b>0,5</b>	<b>34,6</b>	<b>590,2</b>	<b>11,9</b>
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>151,8</b>	<b>0,0</b>	<b>151,8</b>	<b>12,5</b>	<b>-</b>	<b>25,4</b>	<b>110,8</b>	<b>6,9</b>	<b>38,0</b>	<b>183,8</b>	<b>10,2</b>
<b>Máximo</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>27736,0</b>	<b>0,3</b>	<b>27736,0</b>	<b>29,0</b>	<b>0,0</b>	<b>1180,0</b>	<b>225,7</b>	<b>8,4</b>	<b>192,0</b>	<b>1587,5</b>	<b>138,5</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>18,0</b>	<b>0,0</b>	<b>417,8</b>	<b>0,0</b>	<b>6,5</b>	<b>42,3</b>	<b>30,5</b>	<b>95,9</b>
<b>CONAMA 420</b>		<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
(2009)	Não	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conformidade																

Legenda: TPH DRO (C10-C28) – faixa do diesel; TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; TPH Total (C8–C40); Vapores Orgânicos Voláteis (VOCs).

Tabela 40: Resultados do monitoramento para o tratamento utilizando o filtro de adsorção em escala piloto.

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
1	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	24,0	-	466,9	148,6	8,1	48,0	84,0	-
1	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	24,5	-	856,0	-	6,8	95,0	-	-
1	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	25,5	-	521,7	-	8,2	50,0	-	-
1	180	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	-	500,5	-	7,9	50,0	-	-
1	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	27,0	-	548,2	206,0	9,1	54,0	54,5	-
2	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	25,0	-	447,3	54,8	7,7	42,6	96,0	-
2	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	25,0	-	418,2	-	7,6	35,8	-	-
2	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	-	470,9	-	7,7	38,4	-	-
2	180	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	27,0	-	495,4	-	7,7	47,7	-	-
2	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	29,0	-	554,0	110,1	7,5	53,0	27,0	-
3	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	25,5	-	949,1	34,9	7,4	44,7	31,0	-
3	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	-	275,0	-	7,0	29,3	-	-
3	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	27,0	-	362,3	-	7,0	36,3	-	-
3	180	0,4				1,0			29,0	-	821,6	-	6,8	75,0	-	-
3	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	29,0	-	703,4	97,8	6,9	62,0	41,5	-
4	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	-	116,9	0,0	8,4	16,5	27,0	-
4	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	26,0	-	404,0	0,0	8,5	37,5	-	-
4	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	28,0	-	432,1	0,0	8,3	37,9	-	-

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
4	180	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	29,0	-	534,2	0,0	8,3	47,9	-	-
4	240	0,4	0,4	0,4	1,3		0,3		29,5	-	504,0	0,0	8,2	45,0	35,0	-
5	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	19,0	-	444,7	0,0	8,0	27,7	279,0	238,6
5	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	19,0	-	507,2	-	7,9	29,3	-	181,1
5	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	21,0	-	407,4	-	7,8	33,6	-	147,0
5	180	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	21,0	-	360,7	-	7,8	30,7	-	127,8
5	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	22,0	-	316,9	0,0	7,7	28,1	29,5	134,2
6	0	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	19,0	-	228,2	0,0	7,6	24,1	1576,5	142,7
6	60	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	21,3	-	347,3	-	7,1	31,2	-	132,1
6	120	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	22,0	-	426,7	-	7,0	31,5	-	121,4
6	180	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	22,5	-	309,0	-	7,0	25,8	-	142,7
6	240	0,4	0,4	0,4	1,3	1,0	0,3	1,0	22,0	-	344,1	4,9	7,0	25,4	1657,5	127,8
<b>Média</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>24,8</b>	<b>-</b>	<b>469,1</b>	<b>43,8</b>	<b>7,7</b>	<b>41,1</b>	<b>328,2</b>	<b>149,5</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>3,2</b>	<b>-</b>	<b>178,2</b>	<b>66,4</b>	<b>0,6</b>	<b>16,2</b>	<b>606,3</b>	<b>35,4</b>
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>12,9</b>	<b>-</b>	<b>38,0</b>	<b>151,5</b>	<b>7,6</b>	<b>39,3</b>	<b>184,7</b>	<b>23,7</b>
<b>Máximo</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>29,5</b>	<b>-</b>	<b>949,1</b>	<b>206,0</b>	<b>9,1</b>	<b>95,0</b>	<b>1657,5</b>	<b>238,6</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>19,0</b>	<b>-</b>	<b>116,9</b>	<b>0,0</b>	<b>6,8</b>	<b>16,5</b>	<b>27,0</b>	<b>121,4</b>
<b>CONAMA 420</b>		<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH DRO (µg/L)	TPH GRO (µg/L)	TPH Total (µg/L)	Temperatura (°C)	VOC's (ppm)	Cor Aparente (mg/L Pt/Co)	Cor verdadeira (mg/L Pt/Co)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
(2009)	Não	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conformidade																

Legenda: TPH DRO (C10-C28) – faixa do diesel; TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; TPH Total (C8–C40); Vapores Orgânicos Voláteis (VOCs).



## APÊNDICE II – Resultados dos Decréscimos em Escala Piloto

Tabela 41: Decréscimo dos parâmetros BTEX em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no poço de sucção.

Decréscimo do parâmetro em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no PS																	
Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (%)				Tolueno (%)				Etilbenzeno (%)				Xileno (%)			
		S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA
1	0	NC	NC	NC	NC	84,63	99,97	99,97	99,97	68,49	99,72	99,72	99,72	66,83	99,79	99,79	99,79
1	60	NC	NC	NC	NC	55,36	99,97	99,97	99,97	48,61	99,72	99,72	99,72	51,05	99,79	99,79	99,79
1	120	NC	NC	NC	NC	52,69	99,97	99,97	99,97	46,65	99,72	99,72	99,72	47,67	99,79	99,79	99,79
1	180	NC	NC	NC	NC	32,63	99,97	99,97	99,97	30,36	99,72	99,72	99,72	33,98	99,79	99,79	99,79
1	240	NC	NC	NC	NC	62,72	99,97	99,97	99,97	50,44	99,72	99,72	99,72	48,63	99,79	99,79	99,79
2	0	NC	NC	NC	NC	22,43	99,91	99,91	99,91	31,56	99,51	99,51	99,51	34,59	99,68	99,68	99,68
2	60	NC	NC	NC	NC	NC	80,64	99,91	99,91	NC	45,66	99,51	99,51	NC	64,03	99,68	99,68
2	120	NC	NC	NC	NC	99,91	99,91	99,91	99,91	99,51	99,51	99,51	99,51	99,68	99,68	99,68	99,68
2	180	NC	NC	NC	NC	99,91	99,91	99,91	99,91	99,51	99,51	99,51	99,51	99,68	99,68	99,68	99,68
2	240	NC	NC	NC	NC	35,39	99,91	99,91	99,91	36,88	99,51	99,51	99,51	35,85	99,68	99,68	99,68
3	0	NC	NC	NC	NC	20,54	90,57	99,93	99,93	19,85	74,57	99,60	99,60	22,74	81,16	99,73	99,73
3	60	NC	NC	NC	NC	18,17	91,16	99,93	99,93	18,50	75,43	99,60	99,60	17,76	82,33	99,73	99,73
3	120	NC	NC	NC	NC	21,64	99,93	99,93	99,93	19,27	99,60	99,60	99,60	18,17	99,73	99,73	99,73
3	180	NC	NC	NC	NC	18,96	91,66	99,93	100,00	18,02	77,65	99,60	100,00	16,30	82,93	99,73	100,00
3	240	NC	NC	NC	NC	91,97	99,93	99,93	99,93	74,18	99,60	99,60	99,60	82,04	99,73	99,73	99,73
4	0	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
4	60	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

Decréscimo do parâmetro em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no PS																	
Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (%)				Tolueno (%)				Etilbenzeno (%)				Xileno (%)			
		S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA
4	120	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
4	180	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
4	240	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
5	0	94,90	94,90	94,90	94,90	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,85	99,85	99,85	99,85
5	60	94,90	94,90	94,90	94,90	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,85	99,85	99,85	99,85
5	120	94,90	94,90	94,90	94,90	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,85	99,85	99,85	99,85
5	180	94,90	94,90	94,90	94,90	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,85	99,85	99,85	99,85
5	240	94,90	94,90	94,90	94,90	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,76	99,85	99,85	99,85	99,85
6	0	98,53	98,53	98,53	98,53	99,74	99,74	99,74	99,74	99,73	99,73	99,73	99,73	99,86	99,86	99,86	99,86
6	60	98,53	98,53	98,53	98,53	99,74	99,74	99,74	99,74	99,73	99,73	99,73	99,73	99,86	99,86	99,86	99,86
6	120	98,53	98,53	98,53	98,53	99,74	99,74	99,74	99,74	99,73	99,73	99,73	99,73	99,86	99,86	99,86	99,86
6	180	98,53	98,53	98,53	98,53	99,74	99,74	99,74	99,74	99,73	99,73	99,73	99,73	99,86	99,86	99,86	99,86
6	240	98,53	98,53	98,53	98,53	99,74	99,74	99,74	99,74	99,73	99,73	99,73	99,73	99,86	99,86	99,86	99,86
<b>Média</b>		<b>96,71</b>	<b>96,71</b>	<b>96,71</b>	<b>96,71</b>	<b>71,43</b>	<b>98,03</b>	<b>99,86</b>	<b>99,86</b>	<b>69,14</b>	<b>94,66</b>	<b>99,66</b>	<b>99,68</b>	<b>69,73</b>	<b>96,25</b>	<b>99,78</b>	<b>99,79</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>1,92</b>	<b>1,92</b>	<b>1,92</b>	<b>1,92</b>	<b>34,13</b>	<b>4,63</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>33,99</b>	<b>12,90</b>	<b>0,10</b>	<b>0,12</b>	<b>33,88</b>	<b>8,90</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		<b>1,98</b>	<b>1,98</b>	<b>1,98</b>	<b>1,98</b>	<b>47,77</b>	<b>4,73</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>49,16</b>	<b>13,63</b>	<b>0,10</b>	<b>0,12</b>	<b>48,58</b>	<b>9,25</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>
<b>Máximo</b>		<b>98,53</b>	<b>98,53</b>	<b>98,53</b>	<b>98,53</b>	<b>99,91</b>	<b>99,97</b>	<b>99,97</b>	<b>100,00</b>	<b>99,76</b>	<b>99,76</b>	<b>99,76</b>	<b>100,00</b>	<b>99,86</b>	<b>99,86</b>	<b>99,86</b>	<b>100,00</b>
<b>Mínimo</b>		<b>94,90</b>	<b>94,90</b>	<b>94,90</b>	<b>94,90</b>	<b>18,17</b>	<b>80,64</b>	<b>99,74</b>	<b>99,74</b>	<b>18,02</b>	<b>45,66</b>	<b>99,51</b>	<b>99,51</b>	<b>16,30</b>	<b>64,03</b>	<b>99,68</b>	<b>99,68</b>

Legenda: TPH DRO (C10-C28) – faixa do diesel; TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; TPH Total (C8–C40); ND (Não detectável pelo equipamento); NC (Ensaio não considerado para análise dos resultados).

Tabela 42: Decréscimo dos parâmetros TPH em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no poço de sucção.

Decréscimo do parâmetro em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no PS													
Ensaio	Tempo (min)	TPH DRO (%)				TPH GRO (%)				TPH Total (%)			
		S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA
1	0		84,35	91,55	99,98	78,95	99,99	99,99	99,99	NC	88,93	94,03	99,99
1	60	38,05	83,87	99,98	99,98	56,56	99,99	99,99	99,99	43,31	88,60	99,99	99,99
1	120	36,07	85,97	92,43	99,98	54,05	99,99	99,99	99,99	41,17	90,08	94,65	99,99
1	180	69,55	52,34	89,58	99,98	35,79	99,99	99,99	99,99	59,41	66,30	92,63	99,99
1	240	11,31	67,19	75,92	99,98	60,68	99,99	99,99	99,99	21,93	76,79	82,97	99,99
2	0	99,99	85,82	92,36	99,99	9,16	99,97	99,97	99,97	92,63	86,97	92,98	99,99
2	60	89,82	99,99	93,59	99,99	NC	73,18	99,97	99,97	81,51	97,82	94,11	99,99
2	120	74,68	83,16	91,62	99,99	99,97	99,97	99,97	99,97	76,74	84,52	92,30	99,99
2	180	54,38	88,73	21,41	99,99	99,97	99,97	99,97	99,97	58,08	89,64	27,79	99,99
2	240	12,92	69,13	88,23	99,99	45,38	99,97	99,97	99,97	15,55	71,64	89,18	99,99
3	0	99,98	99,98	99,98	99,98	18,77	85,56	99,97	99,97	83,37	97,04	99,98	99,98
3	60	90,15	99,98	84,26	99,98	15,01	86,54	99,97	99,97	74,78	97,24	87,48	99,98
3	120	NC	37,13	99,98	99,98	17,19	99,97	99,97	99,97	NC	50,00	99,98	99,98
3	180	NC	16,21	68,11	99,98	15,38	86,69	99,97	100,00	NC	30,63	74,64	100,00
3	240	NC	99,98	17,15	99,98	10,04	86,16	99,97	99,97	NC	97,17	34,11	99,98
4	0	NC	100,00	100,00	100,00	NC	NC	NC	NC	NC	100,00	100,00	100,00
4	60	41,06	100,00	100,00	100,00	NC	NC	NC	NC	41,06	100,00	100,00	100,00
4	120	48,36	35,97	69,40	100,00	NC	NC	NC	NC	48,36	35,97	69,40	100,00
4	180	NC	60,00	41,05	100,00	NC	NC	NC	NC	NC	60,00	41,05	100,00
4	240	24,10	62,98	100,00	100,00	NC	NC	NC	NC	24,10	62,98	100,00	100,00

Decréscimo do parâmetro em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no PS													
Ensaio	Tempo (min)	TPH DRO (%)				TPH GRO (%)				TPH Total (%)			
		S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA	S	A1	A2	FA
5	0	59,17	85,28	90,51	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	60,15	85,64	90,74	100,00
5	60	68,26	80,00	87,09	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	69,03	80,48	87,40	100,00
5	120	71,99	76,03	80,04	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	72,67	76,61	80,53	100,00
5	180	76,32	76,47	73,12	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	76,89	77,04	73,76	100,00
5	240	66,65	73,43	62,00	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	67,45	74,08	62,91	100,00
6	0	NC	39,93	100,00	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	NC	42,06	100,00	100,00
6	60	54,55	41,72	100,00	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	56,16	43,78	100,00	100,00
6	120	81,28	67,46	100,00	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	81,95	68,61	100,00	100,00
6	180	54,06	42,59	66,46	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	55,69	44,63	67,65	100,00
6	240	22,17	35,24	100,00	100,00	99,98	99,98	99,98	99,98	24,93	37,53	100,00	100,00
<b>Média</b>		<b>58,47</b>	<b>71,03</b>	<b>82,53</b>	<b>99,99</b>	<b>67,36</b>	<b>96,71</b>	<b>99,98</b>	<b>99,98</b>	<b>57,69</b>	<b>73,43</b>	<b>84,34</b>	<b>99,99</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>26,27</b>	<b>23,84</b>	<b>22,46</b>	<b>0,01</b>	<b>37,13</b>	<b>7,09</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>21,97</b>	<b>21,48</b>	<b>20,18</b>	<b>0,01</b>
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		<b>44,92</b>	<b>33,57</b>	<b>27,21</b>	<b>0,01</b>	<b>55,12</b>	<b>7,33</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>38,09</b>	<b>29,25</b>	<b>23,93</b>	<b>0,01</b>
<b>Máximo</b>		<b>99,99</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>99,98</b>	<b>99,99</b>	<b>99,99</b>	<b>100,00</b>	<b>92,63</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
<b>Mínimo</b>		<b>11,31</b>	<b>16,21</b>	<b>17,15</b>	<b>99,98</b>	<b>9,16</b>	<b>73,18</b>	<b>99,97</b>	<b>99,97</b>	<b>15,55</b>	<b>30,63</b>	<b>27,79</b>	<b>99,98</b>

Legenda: TPH DRO (C10-C28) – faixa do diesel; TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; TPH Total (C8-C40); ND (Não detectável pelo equipamento); NC (Ensaio não considerado para análise dos resultados).

### APÊNDICE III – Resultados do Tratamento em Escala Piloto para pH, Temperatura e Alcalinidade

Tabela 43: Monitoramento do pH, Temperatura e Alcalinidade em ensaios em escala piloto.

Parâmetro	Ensaio	Poço de Sucção			Sucção			Aeração 1			Aeração 2			Filtro de Adsorção		
		Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV
Temperatura (°C)	1	24,8	1,8	7,1	29,3	2,7	9,2	27,0	0,9	3,4	25,5	1,1	4,4	25,4	1,2	4,7
	2	25,3	2,5	9,8	30,4	3,0	10,0	26,8	1,3	4,9	26,5	0,7	2,7	26,4	1,7	6,3
	3	26,8	1,8	6,6	31,9	2,5	7,7	28,7	1,6	5,7	27,3	0,9	3,3	27,3	1,6	6,0
	4	27,0	2,8	10,5	31,6	4,3	13,5	27,8	1,3	4,7	27,2	1,3	4,8	27,7	1,6	5,9
	5	21,5	2,1	9,9	26,0	2,6	10,2	21,3	0,5	2,4	20,6	0,5	2,7	20,4	1,3	6,6
	6	22,0	1,4	6,4	27,1	3,6	13,2	22,0	1,6	7,2	20,8	1,6	7,9	21,4	1,4	6,5
pH	1	5,8	0,0	0,6	6,4	0,4	5,8	7,7	0,7	8,5	8,3	0,0	0,4	8,0	0,8	9,9
	2	6,4	0,2	2,9	6,3	0,0	0,7	7,6	0,0	0,6	7,9	0,1	0,8	7,6	0,1	0,9
	3	6,3	0,2	3,6	6,2	0,1	1,0	7,5	0,1	1,1	7,8	0,1	1,6	7,0	0,2	3,4
	4	6,4	0,1	2,3	6,2	0,0	0,4	7,2	0,4	4,9	8,0	0,1	1,2	8,3	0,1	1,1
	5	6,3	0,1	1,2	6,1	0,1	1,2	6,3	0,1	1,4	7,5	0,1	1,8	7,8	0,1	1,3
	6	6,2	0,0	0,5	6,1	0,0	0,4	6,1	0,1	0,9	6,7	0,2	3,0	7,1	0,2	3,3
Alcalinidade (mg/L)	1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	2	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	3	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	4	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	5	174,7	36,1	20,7	174,7	17,0	9,7	139,3	15,6	11,2	114,6	12,5	10,9	147,5	23,7	16,1
	6	167,2	40,7	24,3	164,4	10,1	6,2	140,2	7,9	5,6	118,4	12,3	10,4	133,3	9,4	7,0

Legenda: PS (Poço de Sucção), DP (Desvio Padrão), CV (Coeficiente de Variação em %), NR (Não realizado)

## APÊNDICE IV – Resultados do Monitoramento em Escala Real

Tabela 44: Resultados do monitoramento para o poço de sucção em escala real.

Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (µg/L)	Tolueno (µg/L)	Etilbenzeno (µg/L)	Xileno (µg/L)	TPH C8–C40 (µg/L)	TPH GRO C6- C10 (µg/L)	pH	Temperatura (°C)
1	0	1750,0	3400,0	610,0	3540,0	4600,0	15925,5	6,3	25,0
1	240	1830,0	3280,0	565,0	3220,0	3100,0	14961,5	6,4	25,0
2	0	3040,0	6050,0	811,0	4690,0	6300,0	21956,3	6,4	22,0
2	240	2140,0	3680,0	443,0	3000,0	6200,0	15531,2	5,3	21,0
3	0	1460,0	2420,0	372,0	2229,0	4600,0	11477,2	6,0	23,0
3	240	1440,0	2360,0	372,0	2165,0	5200,0	13315,9	6,3	23,0
4	0	1650,0	1920,0	531,0	2207,0	9400,0	15562,5	6,5	23,0
4	240	1430,0	1350,0	496,0	1919,0	6600,0	12478,5	6,5	23,0
5	0	1410,0	1350,0	482,0	1904,0	8900,0	12445,3	6,6	23,0
5	240	1550,0	1140,0	473,0	1700,0	6100,0	5427,6	6,7	23,0
<b>Média</b>		1770,0	2695,0	515,5	2657,4	6100,0	13908,2	6,3	23,1
<b>Desvio Padrão</b>		501,9	1486,6	128,5	943,0	1924,7	4185,8	0,4	1,2
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		28,4	55,2	24,9	35,5	31,6	30,1	6,3	5,2
<b>Máximo</b>		3040,0	6050,0	811,0	4690,0	9400,0	21956,3	6,7	25,0
<b>Mínimo</b>		1410,0	1140,0	372,0	1700,0	3100,0	5427,6	5,3	21,0
<b>CONAMA 420 (2009)</b>		<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	-	-	-	-
<b>Não Conformidade</b>		<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	-	-	-	-

Tabela 45: Resultados do monitoramento para o tratamento por sucção em escala real.

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Benzeno (µg/L)</b>	<b>Tolueno (µg/L)</b>	<b>Etilbenzeno (µg/L)</b>	<b>Xileno (µg/L)</b>	<b>TPH C8–C40 (µg/L)</b>	<b>TPH GRO C6- C10 (µg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
1	0	28,5	34,5	6,7	52,9	890,0	258,0	7,2	38,0
1	60	8,4	9,5	1,0	36,1	480,0	198,3	7,1	38,5
1	120	7,3	8,1	1,0	22,6	470,0	134,7	7,3	41,0
1	180	7,5	6,7	1,0	20,7	430,0	120,4	7,3	45,0
1	240	6,5	6,2	1,0	17,5	520,0	121,1	7,2	46,0
2	0	10,6	6,5	1,3	8,1	320,0	101,4	7,6	39,0
2	60	1,3	1,0	1,0	3,0	370,0	50,0	7,6	41,0
2	120	1,8	1,2	1,0	3,0	280,0	71,6	7,1	41,0
2	180	1,0	1,0	1,0	3,0	220,0	50,0	7,7	45,0
2	240	1,0	1,0	1,0	3,0	220,0	918,8	7,8	43,0
3	0	10,7	2,8	1,4	5,2	360,0	50,0	7,7	49,0
3	60	1,9	1,0	1,0	3,0	300,0	50,0	7,7	51,0
3	120	1,7	1,0	1,0	3,0	420,0	50,0	7,8	52,5
3	180	1,0	1,0	1,0	3,0	280,0	50,0	8,0	54,5
3	240	1,8	1,0	1,0	3,0	300,0	50,0	7,8	54,5
4	0	5,8	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,1	42,0
4	60	2,8	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,2	35,0
4	120	1,6	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,0	34,0
4	180	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,4	35,0

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Benzeno (µg/L)</b>	<b>Tolueno (µg/L)</b>	<b>Etilbenzeno (µg/L)</b>	<b>Xileno (µg/L)</b>	<b>TPH C8–C40 (µg/L)</b>	<b>TPH GRO C6- C10 (µg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
4	240	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,6	39,0
5	0	5,8	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,4	41,0
5	60	4,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,4	40,5
5	120	4,4	1,0	1,0	3,0	330,0	50,0	7,3	40,5
5	180	4,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,4	40,5
5	240	4,8	1,0	1,0	3,0	350,0	50,0	7,4	40,5
	<b>Média</b>	5,0	3,7	1,3	8,7	325,6	111,0	7,4	42,7
	<b>Desvio Padrão</b>	5,8	6,9	1,1	12,4	155,3	176,5	0,3	5,8
	<b>Coefficiente de Variação (%)</b>	114,1	187,6	90,6	143,3	47,7	159,0	3,6	13,5
	<b>Máximo</b>	28,5	34,5	6,7	52,9	890,0	918,8	8,0	54,5
	<b>Mínimo</b>	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,0	34,0
	<b>CONAMA 420 (2009)</b>	<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	-	-	-	-
	<b>Não Conformidade</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-	-	-	-



Tabela 46: Resultados do monitoramento para o tratamento por aeração em escala real.

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Benzeno (µg/L)</b>	<b>Tolueno (µg/L)</b>	<b>Etilbenzeno (µg/L)</b>	<b>Xileno (µg/L)</b>	<b>TPH C8–C40 (µg/L)</b>	<b>TPH GRO C6- C10 (µg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
1	0	1,0	1,0	1,0	3,0	230,0	57,9	8,2	33,0
1	60	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	69,1	8,3	33,0
1	120	1,0	1,0	1,0	3,0	240,0	62,3	8,3	33,0
1	180	1,0	1,0	1,0	3,0	230,0	61,6	8,4	34,0
1	240	1,0	1,0	1,0	3,0	370,0	69,1	8,5	34,0
2	0	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,5	32,0
2	60	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,7	32,0
2	120	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,9	32,5
2	180	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,5	35,0
2	240	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,6	31,0
3	0	1,0	1,0	1,0	3,0	240,0	50,0	8,3	42,0
3	60	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,3	41,0
3	120	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,6	41,5
3	180	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,7	41,0
3	240	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,7	42,0
4	0	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,3	37,0
4	60	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,2	38,0
4	120	1,0	1,0	1,0	3,0	250,0	50,0	8,3	37,0
4	180	1,0	1,0	1,0	3,0	1400,0	50,0	8,3	36,0
4	240	1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	8,4	35,0

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Benzeno (µg/L)</b>	<b>Tolueno (µg/L)</b>	<b>Etilbenzeno (µg/L)</b>	<b>Xileno (µg/L)</b>	<b>TPH C8–C40 (µg/L)</b>	<b>TPH GRO C6- C10 (µg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
5	0	1,0	1,0	1,0	3,0	310,0	50,0	8,3	37,0
5	60	1,0	1,0	1,0	3,0	300,0	50,0	8,4	37,0
5	120	1,0	1,0	1,0	3,0	390,0	50,0	8,3	36,0
5	180	1,0	1,0	1,0	3,0	290,0	50,0	8,3	37,0
5	240	1,0	1,0	1,0	3,0	560,0	50,0	8,3	37,0
<b>Média</b>		1,0	1,0	1,0	3,0	296,4	52,8	8,4	36,2
<b>Desvio Padrão</b>		0,0	0,0	0,0	0,0	244,9	6,1	0,2	3,3
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		0,0	0,0	0,0	0,0	82,6	11,5	2,2	9,2
<b>Máximo</b>		1,0	1,0	1,0	3,0	1400,0	69,1	8,7	42,0
<b>Mínimo</b>		1,0	1,0	1,0	3,0	200,0	50,0	7,9	31,0
<b>CONAMA 420 (2009)</b>		<b>5,0</b>	<b>700,0</b>	<b>300,0</b>	<b>500,0</b>	-	-	-	-
<b>Não Conformidade</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-	-	-	-

## APÊNDICE V – Resultados dos Decréscimos em Escala Real

Tabela 47: Decréscimo dos parâmetros BTEX e TPH em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no poço de sucção.

Decréscimo do parâmetro em relação a concentração inicial da água subterrânea coletada no PS													
Ensaio	Tempo (min)	Benzeno (%)		Tolueno (%)		Etilbenzeno (%)		Xileno (%)		TPH C8 – C40 (%)		TPH GRO C6 – C10	
		S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
1	0	98,41	99,94	98,97	99,97	98,86	99,83	98,43	99,91	76,88	94,03	98,33	99,63
1	60	99,53	99,94	99,72	99,97	99,83	99,83	98,93	99,91	87,53	94,81	98,72	99,55
1	120	99,59	99,94	99,76	99,97	99,83	99,83	99,33	99,91	87,79	93,77	99,13	99,60
1	180	99,58	99,94	99,80	99,97	99,83	99,83	99,39	99,91	88,83	94,03	99,22	99,60
1	240	99,64	99,94	99,81	99,97	99,83	99,83	99,48	99,91	86,49	90,39	99,22	99,55
2	0	99,59	99,96	99,87	99,98	99,79	99,84	99,79	99,92	94,88	96,80	99,46	99,73
2	60	99,95	99,96	99,98	99,98	99,84	99,84	99,92	99,92	94,08	96,80	99,73	99,73
2	120	99,93	99,96	99,98	99,98	99,84	99,84	99,92	99,92	95,52	96,80	99,62	99,73
2	180	99,96	99,96	99,98	99,98	99,84	99,84	99,92	99,92	96,48	96,80	99,73	99,73
2	240	99,96	99,96	99,98	99,98	99,84	99,84	99,92	99,92	96,48	96,80	95,10	99,73
3	0	99,26	99,93	99,88	99,96	99,62	99,73	99,76	99,86	92,65	95,10	99,60	99,60
3	60	99,87	99,93	99,96	99,96	99,73	99,73	99,86	99,86	93,88	95,92	99,60	99,60
3	120	99,88	99,93	99,96	99,96	99,73	99,73	99,86	99,86	91,43	95,92	99,60	99,60
3	180	99,93	99,93	99,96	99,96	99,73	99,73	99,86	99,86	94,29	95,92	99,60	99,60
3	240	99,88	99,93	99,96	99,96	99,73	99,73	99,86	99,86	93,88	95,92	99,60	99,60
4	0	99,62	99,94	99,94	99,94	99,81	99,81	99,85	99,85	97,50	97,50	99,64	99,64
4	60	99,82	99,94	99,94	99,94	99,81	99,81	99,85	99,85	97,50	97,50	99,64	99,64

4	120	99,90	99,94	99,94	99,94	99,81	99,81	99,85	99,85	97,50	96,88	99,64	99,64
4	180	99,94	99,94	99,94	99,94	99,81	99,81	99,85	99,85	97,50	82,50	99,64	99,64
4	240	99,94	99,94	99,94	99,94	99,81	99,81	99,85	99,85	97,50	97,50	99,64	99,64
5	0	99,61	99,93	99,92	99,92	99,79	99,79	99,83	99,83	97,33	95,87	99,44	99,44
5	60	99,73	99,93	99,92	99,92	99,79	99,79	99,83	99,83	97,33	96,00	99,44	99,44
5	120	99,70	99,93	99,92	99,92	99,79	99,79	99,83	99,83	95,60	94,80	99,44	99,44
5	180	99,73	99,93	99,92	99,92	99,79	99,79	99,83	99,83	97,33	96,13	99,44	99,44
5	240	99,68	99,93	99,92	99,92	99,79	99,79	99,83	99,83	95,33	92,53	99,44	99,44
<b>Média</b>		99,70	99,94	99,87	99,95	99,75	99,80	99,71	99,88	93,66	95,08	99,27	99,60
<b>Desvio Padrão</b>		0,32	0,01	0,20	0,02	0,19	0,04	0,35	0,03	4,90	3,11	0,93	0,10
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>		0,32	0,01	0,20	0,02	0,19	0,04	0,35	0,03	5,23	3,27	0,93	0,10
<b>Máximo</b>		99,96	99,96	99,98	99,98	99,84	99,84	99,92	99,92	97,50	97,50	99,73	99,73
<b>Mínimo</b>		98,41	99,93	98,97	99,92	98,86	99,73	98,43	99,83	76,88	82,50	95,10	99,44

Legenda: TPH GRO (C6-C10) – faixa da gasolina; ND (Não detectável pelo equipamento); NC (Ensaio não considerado para análise dos resultados).

## APÊNDICE VI – Resultados do Tratamento em Escala Real para pH e Temperatura

Tabela 48: Monitoramento do pH e Temperatura em ensaios em escala real.

Parâmetro	Ensaio	Poço de Sucção			Sucção			Aeração		
		Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV
Temperatura (°C)	1	25,0	0,0	0,0	41,7	3,7	8,8	33,4	0,5	1,6
	2	21,5	0,7	3,3	41,8	2,3	5,5	32,5	1,5	4,6
	3	23,0	0,0	0,0	52,3	2,4	4,5	41,5	0,5	1,2
	4	23,0	0,0	0,0	37,0	3,4	9,2	36,6	1,1	3,1
	5	23,0	0,0	0,0	40,6	0,2	0,6	36,8	0,4	1,2
	6	25,0	0,0	0,0	41,7	3,7	8,8	33,4	0,5	1,6
pH	1	6,3	0,0	0,4	7,2	0,1	1,1	8,3	0,1	1,3
	2	5,9	0,8	13,5	7,5	0,3	3,9	8,4	0,3	3,6
	3	6,1	0,2	3,8	7,8	0,1	1,3	8,5	0,2	2,1
	4	6,5	0,0	0,3	7,2	0,2	3,3	8,3	0,1	1,1
	5	6,6	0,1	1,1	7,4	0,0	0,6	8,3	0,1	0,6
	6	6,3	0,0	0,4	7,2	0,1	1,1	8,3	0,1	1,3

Legenda: PS (Poço de Sucção), DP (Desvio Padrão), CV (Coeficiente de Variação em %)