

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
CAMPUS DE RIO CLARO

PATRICIA TOTTI

**COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS TÉCNICAS DE
BOMBEAMENTO, TPE E DPE PARA REMEDIAÇÃO DE ÁREAS
CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO**

RIO CLARO
2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
CAMPUS DE RIO CLARO

PATRICIA TOTTI

**COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS TÉCNICAS DE
BOMBEAMENTO, TPE E DPE PARA REMEDIAÇÃO DE ÁREAS
CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

RIO CLARO
2015

628.55 Totti, Patricia
T718c Comparação da eficiência das técnicas de bombeamento,
TPE e DPE para remediação de áreas contaminadas por
hidrocarbonetos de petróleo / Patrícia Totti. - Rio Claro, 2015
123 f. : il., figs., gráfs., quadros, fots.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Chang Hung Kiang

1. Solos - Poluição. 2. Remediação ambiental. 3. Extração
multifásica. 4. Eficiência de sistemas MPE. I. Título.

Patricia Totti

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS TÉCNICAS DE BOMBEAMENTO, TPE E DPE PARA REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Dr. Miguel Angel Alfaro Soto
LEBAC/UNESP/Rio Claro (SP)

Dra. Silvia Maria Ferreira Salvador
FUNDUNESP/ Rio Claro (SP)

Rio Claro, SP 18 de maio de 2015

Ao meu Pai.

“A morte não é nada...O que fomos um para o outro ainda somos”

St. Agostinho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang pela amizade, orientação e confiança depositada no projeto.

À Prof. Dra. Maria Rita Caetano Chang pelo apoio em todas as etapas do projeto.

À Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP, pela bolsa concedida.

Aos Drs. Miguel Alfaro Soto e Silvia Maria Ferreira Salvador, pela amizade e pelas valiosas observações durante a etapa de qualificação.

Aos amigos do RAIH, Cristiane Aily, Eduardo dos Santos, Elias Isler, Lélia Soares, Silvia Salvador e Thelma Ferreira, pelo apoio, incentivo e ajuda em todas as etapas do projeto.

Aos desenhistas e estagiários do RAIH, pela inestimável ajuda com os desenhos e à toda a equipe do LEBAC, que direta ou indiretamente ajudaram nas diferentes etapas do trabalho.

Ao Eng. José Heleno Junqueira Reis e a toda sua equipe, pelo incentivo à pesquisa e apoio durante os trabalhos de campo.

Aos amigos da GEOCIA, Gabriela Ciantelli, Flavio Remedio, Carlos Ciantelli e Celso Gatto, pela amizade, pelo empréstimo dos equipamentos para o ensaio e pelo incentivo a este trabalho.

Aos amigos da TSL, Dr. Marcio Alberto e Eng. Heric Costa de Paula, e a toda a equipe de campo da TSL em Minas Gerais, pela ajuda durante os trabalhos de campo e pelo empréstimo de equipamentos e instrumentos para os ensaios e disponibilização dos dados utilizados neste trabalho.

Ao Vitório Populin, da Geoesfera Ambiental e Olyverson Porto, da Estre Ambiental, pelo apoio e empréstimo de instrumentos para o trabalho de campo.

Aos meus queridos tios Verginia e Filipe Lima e a toda minha família, pelo apoio e incentivo à realização deste trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente me ajudaram nesta jornada.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a comparação da eficiência de três técnicas: bombeamento, TPE (*Two Phase Extraction*) e DPE (*Dual Phase Extraction*), na remediação de uma área contaminada com óleo diesel no Estado de Minas Gerais. Observações empíricas em sistemas de remediação em diversas áreas impactadas nos EUA e América Latina indicam um aumento significativo (superior a 30%) na remoção da massa total de contaminantes com a utilização de DPE em relação ao bombeamento e ao TPE, considerando as taxas de recuperação de massa nas fases livre, dissolvida e vapor. Para a comparação entre as técnicas foram efetuados ensaios de bombeamento, TPE e DPE em duas subáreas da área em estudo (denominadas área 1 e área 2), cujos dados foram comparados aos resultados de modelos teóricos. A partir da compilação de dados de sistemas de remediação em operação e da realização de ensaios de campo, foi possível confirmar o aumento significativo das vazões de extração utilizando a técnica de DPE em relação às vazões obtidas com as técnicas de bombeamento e TPE. Para a área 1, a utilização do DPE resultou em vazão de extração de líquido 38,5% maior que a obtida por bombeamento. Nos testes realizados na área 2, a utilização do DPE no poço de extração PE-01 resultou em aumentos de 39,68% na vazão de líquido em relação ao TPE e de 43,77% em relação ao bombeamento. Já para o poço PM-28, a vazão média obtida com o DPE foi 47,63% maior em relação ao TPE e 51,3% maior em relação ao bombeamento. A maior efetividade do DPE em relação ao bombeamento convencional pode ser explicada pelo aumento do gradiente de pressão, que ocasiona maior mobilidade de água e de LNAPL para o interior do poço. Em relação ao TPE, o DPE também foi mais efetivo, e, neste caso, as maiores vazões de líquido obtidas podem ser explicadas pelo rebaixamento causado pelo bombeamento, somado ao aumento de fluxo causado pelo maior gradiente causado pela aplicação do vácuo.

Palavras-chave: Remediação ambiental. Extração multifásica. Hidrocarbonetos de petróleo. Eficiência de sistemas MPE.

ABSTRACT

The objective of this study is to compare the effectiveness of three remediation techniques – pumping, TPE (Two Phase Extraction) and DPE (Dual Phase Extraction) – in a contaminated area with diesel in the state of Minas Gerais. Empirical observations for remediation systems in various areas affected in the US and Latin America indicate a significant increase (over 30%) in the total mass of contaminant removal with the use of DPE in relation to pumping and TPE, considering the recovery rates mass in free phase, dissolved phase and vapor phase. To compare the techniques the following methodologies were used: a) literature review; b) build systems operation data deployed in the area; c) conducting pumping tests, TPE and DPE in two sub-areas of the study area (known as Area 1 and Area 2); d) treatment and analysis of the obtained data; e) comparing the results with theoretical models. Using data compiled from field tests it was possible to confirm the significant increase in extraction flow using the DPE technique with respect to the flow obtained from pumping techniques and TPE. For area 1, the use of MPE resulted in the extraction liquid flow higher than the 38.5% compared to that obtained by pumping. In tests performed in area 2, the use of DPE in extraction well led to increase of 39.68% in the flow relative to the TPE and 43.77% with respect to the pumping. As for the PM-28 well, the average flow rate obtained with DPE was 47.63% higher compared to that of TPE and 51.3% higher compared to the pumping. The greater effectiveness of DPE compared to conventional pumping can be explained by the increased pressure gradient, which increase water and LNAPL yield into the well. With respect to TPE, DPE was also more effective, and, in this case, the highest net flow obtained can be explained by the drawdown induced by pumping, coupled with the augmented gradient caused by the application of vacuum.

Keywords: Environmental remediation. Multiphase extraction. Petroleum hydrocarbons. MPE efficiency.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de fase livre em subsuperfície ao longo do tempo.	14
Figura 2 - Diagrama típico de um sistema DPE	19
Figura 3 - Diagrama típico de um sistema TPE.....	20
Figura 4 - Diagrama lógico de decisão de tecnologias MPE	23
Figura 5 - Mapa Geológico Regional.....	48
Figura 6 - Secção Geológica Local	50
Figura 7- Mapa Potenciometrico	51
Figura 8– Índices Pluviométricos.....	54
Figura 9– Fluxograma de etapas do trabalho.....	57
Figura 10- Localização dos sistemas e poços nas áreas 1 e 2 em Betim – MG	63
Figura 11- Perfis de sondagens dos poços de extração e observação utilizados no ensaio piloto de DPE – área 1.....	66

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação da espessura de fase livre nos poços de monitoramento da área 1 nos períodos de (a)2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014.	85
Gráfico 2- Variação da espessura de fase livre nos poços de monitoramento da área 2 nos períodos de (a)2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014	86
Gráfico 3 - Variação do nível d'água nos poços de monitoramento da área 1 nos períodos de (a) 2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014.....	87
Gráfico 4- Variação do nível d'água nos poços de monitoramento da área 2 nos períodos de (a)2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014.....	88
Gráfico 5- Comparação dos volumes de água subterrânea extraídos pelos sistemas de bombeamento (área 1) e TPE (área 2).	95
Gráfico 6 - Comparação das massas de compostos de interesse em água subterrânea extraídos pelo sistema de bombeamento (área 1) e TPE (área 2).....	95
Gráfico 7- Comparação dos Volumes de Produto Extraídos pelos Sistemas de Bombeamento (área 1) e TPE (área 2).....	96

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Diretrizes gerais para aplicação de MPE	22
Quadro 2 - Guia de seleção para as tecnologias MPE: TPE, HVDPE, LVDPE.....	22
Quadro 3- Vantagens e desvantagens entre HVDPE/LVDPE e TPE.....	22
Quadro 4 - Comparação da Eficiência das Técnicas de Remediação por Bombeamento, TPE e DPE em 14 Áreas nos EUA.	27
Quadro 5 - Resultados de DPE – Comparação por custo por galão de fase livre recuperado por libra de petróleo removido	28
Quadro 6 - Componentes do Sistema de Bombeamento e Tratamento.....	60
Quadro 7 - Componentes do Sistema TPE	60
Quadro 8- Relação de poços utilizados no ensaio piloto de DPE	65
Quadro 9- Relação de equipamentos e instrumentos utilizados no Ensaio Piloto – área 1	65
Quadro 10 - Equipamentos, instrumentos e materiais utilizados nos ensaios - área 2.	73
Quadro 11– Dados de entrada utilizados no software LDRM2	81
Quadro 12- Taxas de extração de produto ao longo da operação de diferentes sistemas de remediação implantados na área de interesse.....	83
Quadro 13. Volume de água e produto e taxas de extração água/óleo no sistema de bombeamento – área 1.	90
Quadro 14- Volumes de água e óleo e taxas de extração obtidos no sistema TPE – área 2	91
Quadro 15- Concentrações dos compostos de interesse no efluente do sistema de bombeamento – área 1.	92
Quadro 16- Concentrações dos compostos de interesse no efluente do sistema TPE – área 2.	93
Quadro 17- Massa dos compostos de Interesse Extraídos em Fase Dissolvida pelos Sistemas de Bombeamento (Área 1) e TPE (Área 2).....	94
Quadro 18- Resumo dos Parâmetros para Comparação dos Sistemas de Bombeamento e TPE, totalizados para o período de outubro de 2011 a junho de 2014.	96
Quadro 19- Vácuo gerado nos cabeçotes dos poços de extração e observação durante o ensaio de DPE.	99

Quadro 20– Resultados do teste piloto de DPE na área 1.....	100
Quadro 21- Resultados Analíticos das Amostras de Vapores extraídos pelo sistema durante o teste contínuo de DPE.	100
Quadro 22- Concentrações de VOC's nos gases extraídos durante o ensaio de DPE.	100
Quadro 23- Resultados analíticos para o efluente líquido extraído durante o teste de DPE.	101
Quadro 24. Resultado do Monitoramento dos níveis d'água e espessura de produto nos poços selecionados para ensaio	102
Quadro 25. Vazões de Extração de Líquidos no Ensaio TPE – área 2	103
Quadro 26- Vazões de Extração de Líquidos no ensaio de Bombeamento – área 2	103
Quadro 27 - Composição do Efluente de saída do sistema TPE (operando apenas com bombeamento nos poços PE-01 e PM-28).....	104
Quadro 28 - Vazões médias de extração de líquidos obtidas durante o ensaio de DPE na área 2.....	104
Quadro 29 - Comparação das vazões de extração de água subterrânea pelas técnicas de bombeamento, TPE e DPE na área 2.	105

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo.....	15
1.2	Justificativa do projeto	15
1.3	Histórico de contaminação na área em estudo	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Fundamentos das Técnicas de Remediação	17
2.1.1	<i>Extração Multifásica (MPE)</i>	<i>17</i>
2.1.2	<i>Critérios para Seleção das Técnicas de MPE</i>	<i>21</i>
2.2	Taxas de remoção de contaminantes por bombeamento, TPE e DPE – Estudos de Casos	24
2.3	Revisão teórica dos princípios do escoamento multifásico.....	35
2.3.1	<i>Conservação de massa, energia e quantidade de movimento aplicada ao fluxo de água subterrânea.....</i>	<i>35</i>
2.3.2	<i>Volume de fase livre</i>	<i>39</i>
2.3.4	<i>Saturação efetiva na camada de óleo e permeabilidade relativa</i>	<i>41</i>
2.3.5	<i>Recuperação de óleo em poços de bombeamento</i>	<i>42</i>
2.3.6	<i>Recuperação aumentada por vácuo.....</i>	<i>43</i>
2.3.7	<i>Considerações sobre o software LDRM 2</i>	<i>43</i>
2.4	Composição e propriedades físico-químicas do óleo diesel	44
2.5	Características Geológicas e Hidrogeológicas do Meio Físico Estudado	44
2.5.1	<i>Geologia e Hidrogeologia Regionais</i>	<i>44</i>
2.5.2	<i>Geologia e Hidrogeologia Locais.....</i>	<i>49</i>
2.6	Clima, Relevo, Vegetação e Hidrografia na Região de Betim.....	52
2.7	Pluviometria	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1	Materiais e Métodos Utilizados na Operação dos Sistemas de Bombeamento e TPE	59
3.2	Materiais e Métodos Utilizados no Ensaio Piloto de DPE na Área 1.....	64
3.3	Materiais e Métodos Utilizados nos Ensaios Piloto de TPE, Bombeamento e DPE na Área 2	70
3.3.1	<i>Procedimentos do ensaio de TPE na área 2</i>	<i>76</i>
3.3.2	<i>Procedimentos do ensaio de bombeamento na área 2</i>	<i>77</i>
3.3.3	<i>Procedimentos do ensaio de DPE na área 2.....</i>	<i>77</i>

3.4	Estimativa Teórica da Quantidade de Produto Recuperável	79
4	RESULTADOS	82
4.1	Resultados da compilação de dados de operação de sistemas de remediação de 2003 a 2014	82
4.2	Resultados Obtidos nos Ensaios de Campo na área 1.....	97
4.3	Resultados dos testes de TPE, Bombeamento e DPE na Área 2.....	102
4.3.1	<i>Resultados do teste de TPE na Área 2</i>	<i>103</i>
4.3.2	<i>Resultados do Teste de Bombeamento na Área 2</i>	<i>103</i>
4.3.3	<i>Resultados do Teste de DPE na Área 2.....</i>	<i>104</i>
4.4	Resultados obtidos com modelo teórico	105
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	107
5.1	Discussão dos resultados da compilação de dados de operação de sistemas de remediação de 2003 a 2014.....	107
5.2	Discussão dos resultados obtidos nos ensaios de campo na área 1.....	110
5.3	Discussão dos resultados obtidos nos ensaios de campo na área 2.....	111
5.4	Comparação dos resultados obtidos com previsões de modelos teóricos	114
6	CONCLUSÃO.....	116
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
	ANEXOS.....	122
	ANEXO 1 Especificações técnicas do óleo diesel.....	123

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma mistura complexa, contendo centenas de hidrocarbonetos, os quais podem ser divididos em três classes gerais: hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos aromáticos e compostos orgânicos polares. Os hidrocarbonetos saturados, por sua vez, podem ser subdivididos em alcanos de cadeias lineares, de cadeias ramificadas ou ciclo alcanos, com variados números de anéis saturados e cadeias laterais. Os hidrocarbonetos aromáticos podem conter um ou mais anéis aromáticos, formando compostos monoaromáticos como benzeno e tolueno, ou poliaromáticos como o pireno. A fração polar é formada por compostos contendo heteroátomos polares, tais como nitrogênio, enxofre e oxigênio. (RISEN-ROBERTS,1998).

Da mesma forma, os produtos do refinamento de petróleo, particularmente os combustíveis, são misturas complexas, que embora contenham maior concentração de determinados compostos, contém também traços dos demais compostos contidos no óleo cru. (ATLAS, 1977 apud RISEN-ROBERTS,1998).

Vazamentos de derivados de petróleo em tanques de estocagem, linhas de processo, dutos, transporte rodoviário ou ferroviário, podem causar severos danos ambientais e à saúde humana. Após o vazamento, os combustíveis líquidos percolam pela zona não saturada do solo, também chamada de zona vadosa, e podem atingir a zona saturada. Em subsuperfície, em contato com a água subterrânea, compostos orgânicos voláteis (VOC) e semi-voláteis (SVOC) do contaminante, além de traços de metais, são transferidos para a fase aquosa e transportados por esta, gerando uma pluma de contaminação. Como ocorre o transporte de contaminantes em subsuperfície, áreas distantes do ponto de vazamento ou da “fonte” podem ser atingidas pelas plumas de contaminantes.

Em subsuperfície, os contaminantes são particionados e podem permanecer adsorvidos ou absorvidos ao solo, em fase livre, dissolvido em água subterrânea ou em vapores no solo. A fase livre, formada pelo líquido vazado, é uma fonte secundária para a contaminação da água subterrânea e distribuição dos contaminantes para outros meios. Portanto, a remoção da fase livre é o primeiro objetivo de qualquer sistema de remediação.

Os combustíveis derivados de petróleo são menos densos que a água e a fase livre, denominada de LNAPL (*Light Non Aqueous Phase Liquid*, ou Líquido Não-

Aquoso Menos Denso que a Água), tende a permanecer na porção superior do aquífero.

Embora existam diversas técnicas desenvolvidas para remediação de solo e água subterrânea contaminados por hidrocarbonetos, nenhuma simples tecnologia pode ser indicada como a melhor solução para todas as áreas e todos os tipos de solo contaminados com LNAPL. Esta remoção é particularmente mais difícil em solos de baixa permeabilidade.

As técnicas de bombeamento e tratamento (P&T - *Pump and Treat*) e de extração multifásica (MPE – *Multi Phase Extraction*) vêm sendo amplamente utilizadas para a remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo e outros compostos voláteis e semi-voláteis.

No Estado de São Paulo, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) mantém o “Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo”, que em sua última atualização, em dezembro de 2013, apresentava 4.771 áreas cadastradas. Deste total, aproximadamente 75% correspondem a postos de combustíveis e 16% a atividades industriais. Na maior parte das áreas cadastradas as contaminações são causadas predominantemente por hidrocarbonetos de petróleo e as principais técnicas de remediação utilizadas são bombeamento e tratamento e MPE (CETESB, 2013). Apesar de não haver um cadastro nacional, abrangendo dados de sistemas de remediação instalados em todos os estados brasileiros, esta tendência de utilização das técnicas de P&T e MPE ocorre em outros estados também e, de acordo com informações obtidas de consultorias ambientais nacionais e internacionais que atuam em todo o território brasileiro, pode-se dizer que estas são as técnicas mais utilizadas no Brasil ultimamente.

O histórico de áreas contaminadas, tanto no Brasil quanto nos EUA, demonstra que os sistemas implantados para remediação operam por longo período de tempo, geralmente superior a 10 anos, e que a eficiência dos mesmos varia ao longo do tempo. De forma geral, os sistemas apresentam eficiência mais elevada no início da operação, decaindo com o tempo. Isto se deve, dentre outros fatores, às diferentes formas de distribuição dos contaminantes em subsuperfície ao longo do tempo. A Figura 1 apresenta esquematicamente as diferentes formas de distribuição dos contaminantes ao longo do tempo e a eficiência relativa da remoção dos mesmos por sistemas de remediação.

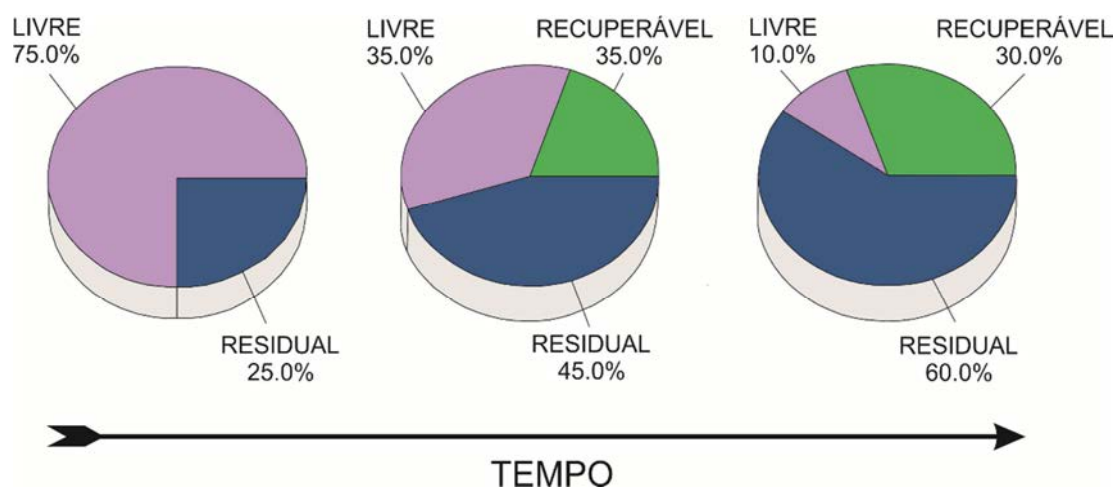


Figura 1 - Distribuição de fase livre em subsuperfície ao longo do tempo. (Fonte: EPA, 2014)

Por este motivo, a tendência é a utilização de uma segunda técnica ou de técnicas conjuntas de remediação de forma a otimizar a remoção de contaminantes, especialmente em fase livre.

As taxas de remoção dependem do tipo de contaminante, das características geológicas e hidrogeológicas da área, da forma de distribuição do contaminante em subsuperfície, do tipo de sistema de remediação utilizado, entre outros fatores.

O conhecimento de parâmetros geológicos e hidrogeológicos, que influenciam os mecanismos de transporte de contaminantes em subsuperfície, é fundamental para a seleção da técnica de remediação adequada.

Como a distribuição dos contaminantes em subsuperfície varia ao longo do tempo, quanto mais demorado for o processo de remediação, maior será a parcela de contaminante em fase residual, ou seja, a porcentagem que praticamente não pode ser removida do meio. Portanto, quanto mais eficientes forem os sistemas implantados, maior será a taxa de remoção dos contaminantes em menor tempo, reduzindo custos operacionais e melhorando a qualidade ambiental do meio impactado mais rapidamente.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a comparação da eficiência de três técnicas de remediação: bombeamento, TPE (*Two Phase Extraction*) e DPE (*Dual Phase Extraction*), aplicadas em uma área contaminada com óleo diesel, para confirmar se esta última técnica (DPE) é mais eficiente em relação às demais.

1.2 Justificativa do projeto

Observações empíricas em sistemas de remediação em diversas áreas impactadas nos EUA e América Latina, que utilizaram a técnica DPE, apontam um aumento significativo (superior a 30%) na remoção da massa total de contaminantes com a utilização de DPE em relação ao bombeamento e ao TPE, considerando as taxas de recuperação de massa nas fases livre, dissolvida e vapor. (USEPA, 2005; USEPA, 1997; MCDOWELL, A. SCOTT., 2001; SOLC, 2007; RUSZIN, 2012).

No Brasil não há estudos anteriores comparando as três técnicas, possivelmente porque o DPE ainda é muito pouco utilizado no país. Desta forma, a comparação das eficiências de extração entre estas técnicas, aplicadas a uma mesma área, é importante para mostrar que o DPE, apesar de apresentar maior custo de implantação e operação, pode ser uma opção viável para reduzir o tempo de remediação de uma área contaminada.

1.3 Histórico de contaminação na área em estudo

A comparação entre as técnicas de remediação por bombeamento, TPE e DPE proposta nesta dissertação foi feita a partir de resultados operacionais obtidos em sistemas de remediação instalados em uma área industrial localizada às margens da Rodovia Fernão Dias, no município de Betim – MG e por ensaios piloto das três técnicas realizados na mesma área.

A área objeto de estudo foi impactada por um derramamento de óleo diesel decorrente de um defeito em uma linha industrial que operava sob pressão, no início de 2003, ocasionando a contaminação de uma área de aproximadamente 12.500 m² e gerando uma pluma de fase livre de 300 m³, conforme estimativa efetuada pela empresa de consultoria ambiental que atuava no local, no mesmo ano.

Desta forma, a partir de 2003 esta área passou por diversas etapas do gerenciamento de áreas contaminadas, tais como investigações preliminar, confirmatória e complementar, análise de risco à saúde humana e implantação de sistemas de remediação emergenciais e definitivos. Quatro empresas de consultoria ambiental trabalharam nesta área de 2003 a 2014 e operaram sistemas de bombeamento e TPE, basicamente.

Para fins didáticos, a área em estudo foi dividida em duas outras, denominadas área 1 e área 2.

De 04 a 11 de outubro de 2014 a empresa de consultoria que operava os sistemas de remediação realizou um teste piloto utilizando a técnica DPE na área 1, o qual foi acompanhado e supervisionado pela autora.

No período de 8 a 19 de dezembro de 2014 a autora conduziu ensaios de bombeamento, TPE e DPE na área 2, com o objetivo de comparar a eficiência dos três sistemas nos mesmos poços e verificar se o comportamento observado no ensaio piloto da área 1 se repetia para outros poços na área 2.

A escolha desta área para o estudo empírico foi motivada pela rápida resposta do meio aos sistemas testados, o que pôde ser observado durante o ensaio piloto na área 1, ocasião na qual após apenas 15 min de teste já se podia observar raios de influência para o rebaixamento do nível d'água e para o vácuo nos poços de observação. Este fato possibilitou testes mais curtos, pois as respostas do meio físico foram obtidas mais rapidamente.

Desta forma, foi comparada a eficiência das três técnicas de remediação, através das taxas de extração, para indicar qual delas é a melhor opção para o processo de remediação da área em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos das Técnicas de Remediação

2.1.1 Extração Multifásica (MPE)

A técnica de extração multifásica (MPE – Multi Phase Extraction) vem sendo amplamente utilizada para a remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo e outros compostos voláteis e semi-voláteis. (U.S. ARMY, 1999).

Neste processo utiliza-se vácuo como força motriz para extração simultânea de fase-livre, água subterrânea e vapores do solo. A ventilação causada pela extração de vapores aumenta a oxigenação no meio poroso, especialmente na zona não saturada do aquífero, estimulando também processos de biodegradação aeróbia de compostos orgânicos. (U.S. ARMY, 1999).

A técnica MPE foi desenvolvida para a remediação de solo e água subterrânea contaminados por compostos orgânicos voláteis (VOC's) e TPH (*Total Petroleum hydrocarbons* – hidrocarbonetos totais de petróleo), e teria surgido como aprimoramento de uma outra técnica, o SVE (*Soil Vapor Extraction*). (EPA, 1997).

O SVE utiliza o processo de “*air stripping*” de compostos voláteis presentes no solo e a extração de vapores contendo os contaminantes de interesse para remediação da zona vadosa. O SVE promove a circulação de ar no subsolo através da aplicação de vácuo em um poço de extração. Com o aumento da circulação de ar pelos poros da porção não saturada do solo, os contaminantes voláteis presentes no mesmo são transferidos para a fase gasosa e removidos juntamente com o ar, através dos poços de extração. (EPA, 2002).

O MPE é uma denominação genérica para uma categoria de tecnologias de remediação “*in situ*” que utilizam vácuo para a extração simultânea de contaminantes em mais de uma fase (vapores, água e fase livre), em poços ou trincheiras, e pode ser dividido em três técnicas distintas, segundo terminologia definida por EPA (1997): DPE (*Dual-Phase Extraction*), TPE (*Two-Phase Extraction*) e *Bioslurping*.

O princípio de funcionamento do MPE é semelhante ao SVE, com a diferença de que este último atua apenas na extração de vapores da zona não

saturada, em solos de alta permeabilidade, enquanto o MPE é aplicável para remediação simultânea das zonas saturada e não saturada, com a vantagem adicional de ser aplicável a solos de baixa a moderada permeabilidade. (U.S. ARMY, 1999).

No DPE, os vapores provenientes do solo e os líquidos são extraídos do poço de extração em tubulações distintas e por bombas ou compressores radiais distintos. Nesta técnica, uma bomba submersível é introduzida na tubulação do poço para a extração de água subterrânea e fase livre, enquanto outra tubulação é interligada ao cabeçote do poço para a extração de vapores, utilizando um compressor radial ou uma bomba de vácuo para gerar pressão negativa no interior do poço. (U.S.ARMY, 1999).

O DPE pode ainda ser subdividido em HVDPE (*High Vacuum Dual Phase Extraction*) e LVDPE (*Low Vacuum Dual Phase Extraction*). A diferença entre as duas modalidades é a faixa de vácuo em que operam: o HVDPE opera em uma faixa de vácuo variando de 460 a 660mmHg e o LVDPE opera em uma faixa de vácuo de 76 a 305 mmHg. (EPA, 1997).

A Figura 2 apresenta a representação esquemática de um sistema DPE.

No TPE, as três fases (vapor, água e fase livre) são extraídas na mesma tubulação de sucção, utilizando-se uma única bomba de vácuo ou compressor radial. Nesta técnica, o tubo de sucção é posicionado abaixo do nível d'água e a operação ocorre com alto vácuo (entre 460 e 660mmHg). A turbulência gerada no tubo de sucção facilita a transferência de massa de contaminantes da fase líquida para a fase vapor, obtendo-se eficiência de *stripping* superior a 98% (o processo de "*air stripping*" consiste na transferência de massa da fase aquosa para a fase gasosa). (EPA,1997).

A Figura 3 apresenta a representação esquemática de um sistema TPE.

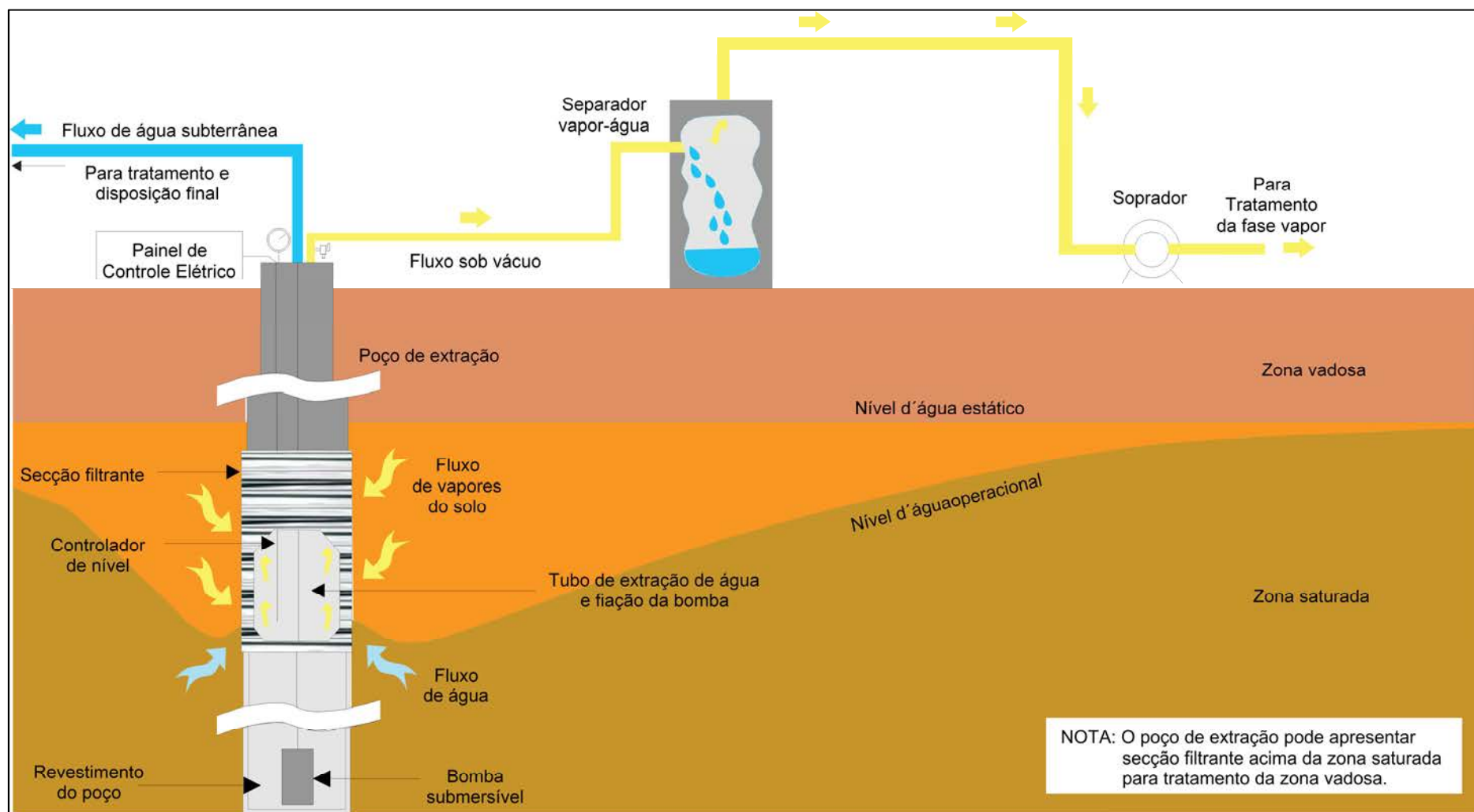


Figura 2 - Diagrama típico de um sistema DPE (Fonte: EPA, 1997).

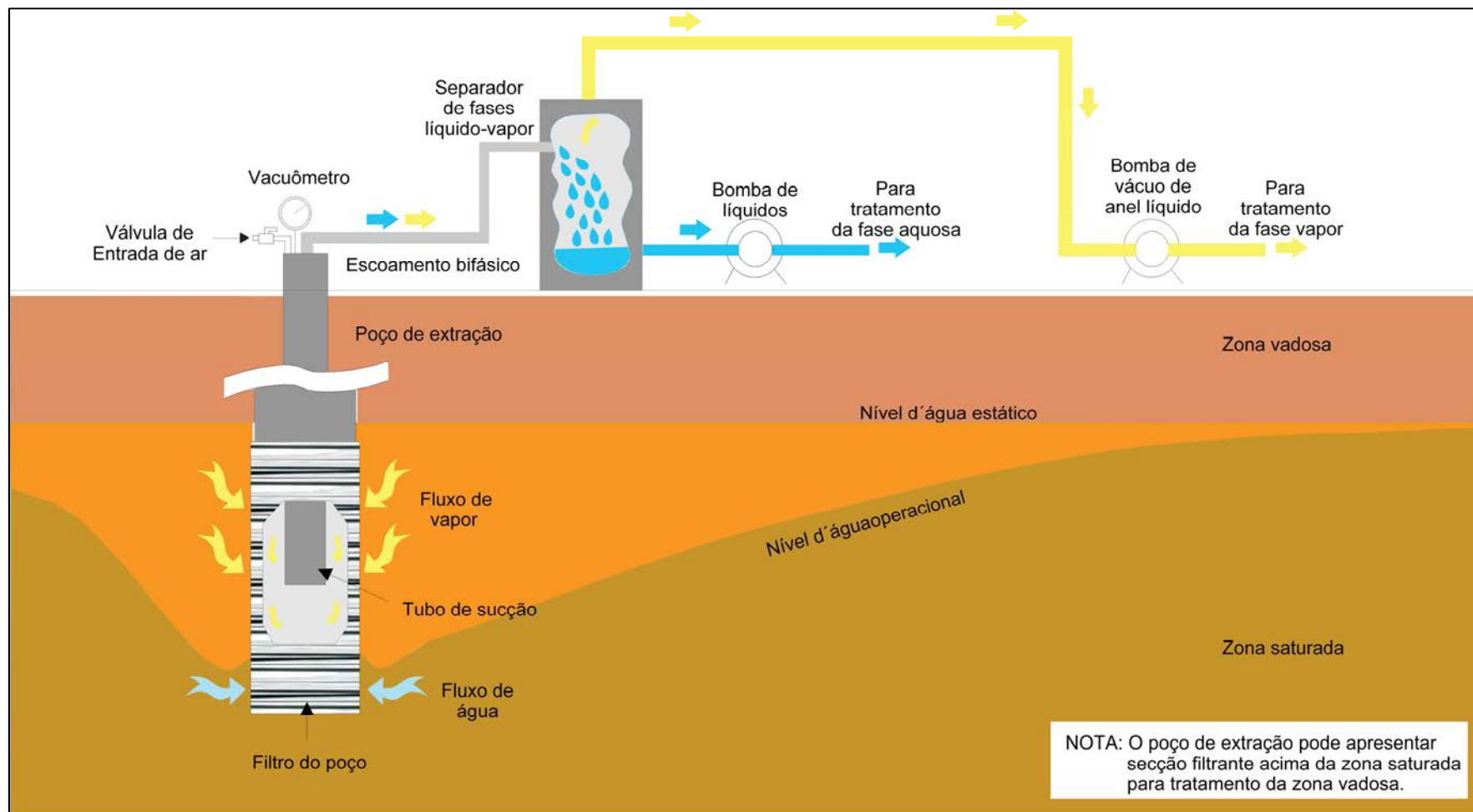


Figura 3 - Diagrama típico de um sistema TPE (Fonte: EPA, 1997).

De modo geral, a decisão de se utilizar alto ou baixo vácuo dependerá das características geológicas e hidrogeológicas da área, e também da disponibilidade e custo do tratamento posterior das fases extraídas. Se na área houver maior disponibilidade para tratamento da fase líquida, utiliza-se baixo vácuo para gerar menor turbulência e, conseqüentemente, maiores concentrações na fase aquosa. Se houver maior disponibilidade para tratamento da fase gasosa (como o envio para processos de tratamento térmico ou catalítico existentes em refinarias, por exemplo), pode-se utilizar alto vácuo para promover maiores turbulências e ocasionar maiores concentrações de contaminantes na fase gasosa, ou seja, potencializando o *stripping*. (EPA,1997).

O *Bioslurping* é uma variação da técnica TPE, sendo utilizada para aumentar a recuperação de LNAPL (*Light Non Aqueous Phase Liquid*). Nesta técnica, o tubo de extração é posicionado na interface óleo-água para induzir um gradiente de pressão, causando a entrada de óleo, água e vapores no interior do tubo. Para a geração de vácuo pode ser utilizada uma bomba de vácuo ou um compressor radial. Convém ressaltar que alguns autores tratam o *bioslurping* como sinônimo de TPE. (U.S. ARMY,1999).

Os projetos de MPE normalmente são dimensionados de acordo com resultados de ensaios pilotos, ou muitas vezes são estimados de acordo com a experiência dos projetistas.(EPA,1997).

2.1.2 Critérios para Seleção das Técnicas de MPE

Embora a experiência do projetista e os resultados de testes pilotos sejam determinantes para a elaboração de um projeto de remediação, a seleção prévia das melhores técnicas aplicáveis pode ser feita a partir de características conhecidas da área.

Nos Quadros 1 a 3 estão apresentados alguns critérios de seleção para as diversas modalidades de MPE.

A Figura 4 apresenta um diagrama lógico de decisão para a escolha da tecnologia aplicável a cada área.

Quadro 1 - Diretrizes gerais para aplicação de MPE

CONDIÇÕES DO SITE	DIRETRIZES
Contaminante	1. VOC's halogenados
	2. VOC's não-halogenados e/ou hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH)
Localização da contaminação	1. Abaixo do nível d'água
	2. Abaixo e acima do nível d'água
Constante da Lei de Henry da maioria dos contaminantes	> 0,01 a 20°C (adimensional)*
Pressão de vapor da maioria dos contaminantes	> 1,0 mmHg a 20°C
Geologia abaixo do nível d'água	Areias a argilas
Aplicação do MPE acima do nível d'água	
Permeabilidade do solo ao ar acima do nível d'água	Solos com moderada a baixa permeabilidade ($k < 0,1$ darcy)**

* Constante de Henry adimensional na forma: (concentração na fase gasosa)/(concentração na fase líquida)

** Permeabilidade do solo ao gás (k): 1 darcy = 1×10^{-8} cm²

(Fonte: EPA, 1997)

Quadro 2 - Guia de seleção para as tecnologias MPE: TPE, HVDPE, LVDPE.

CONDIÇÕES DO SITE	DIRETRIZES PARA LVDPE	DIRETRIZES PARA HVDPE	DIRETRIZES PARA TPE
Taxa de produção de água subterrânea *	Não limitada a taxas de produção típicas de água subterrânea, porém o aquífero deve ser drenável	Não limitada a taxas de produção típicas de água subterrânea, porém o aquífero deve ser drenável	< 1,4 m ³ /h
Máxima profundidade atingida pela contaminação	Não limitada pela profundidade do contaminante	Não limitada pela profundidade do contaminante	1. Até ±15m abaixo da superfície do solo (para produção de água subterrânea < 0,45 m ³ /h) 2. Até 6 a 9m abaixo da superfície do solo (para produção de água subterrânea entre 0,45 e 1,14 m ³ /h)
Geologia abaixo do nível d'água	Areia a silte argiloso	argilo-arenosos a argilosos	argilo-arenosos a argilosos
Para aplicação de MPE acima do nível d'água			
Permeabilidade do solo ao ar acima do nível d'água	Permeabilidade moderada (maior que 1×10^{-3} darcy)	Permeabilidade moderada (menor que 1×10^{-2} darcy)	Permeabilidade moderada (menor que 1×10^{-2} darcy)

* Para aplicação do MPE, o aquífero deve ser drenável.

(Fonte: EPA, 1997)

Quadro 3- Vantagens e desvantagens entre HVDPE/LVDPE e TPE

	HVDPE e LVDPE	TPE
Vantagens	Não limitada à profundidade da contaminação;	<i>Stripping</i> na água subterrânea: até 98% de transferência da massa de contaminantes da fase aquosa para a fase gasosa;
	Baixas perdas de vácuo dentro dos poços de extração;	Sem necessidade de bombas ou equipamentos mecânicos dentro dos poços;
	Não limitada à taxa de produção de água subterrânea;	Pode ser aplicada a poços de monitoramento ou extração já existentes na área.
Desvantagens	Onde bombas submersíveis são utilizadas, há necessidade de uma coluna d'água acima das bombas, de forma que é necessário instalar novos poços com profundidade adequada.	Limitado à profundidade máxima de água subterrânea a 15m abaixo do nível do solo;
	Requer maior controle das bombas, comparado com TPE	Limitada a uma máxima vazão de extração de aproximadamente 1,0 m ³ /h;
		Altas perdas de vácuo devido ao arraste de água a partir do poço.

(Fonte: EPA, 1997)

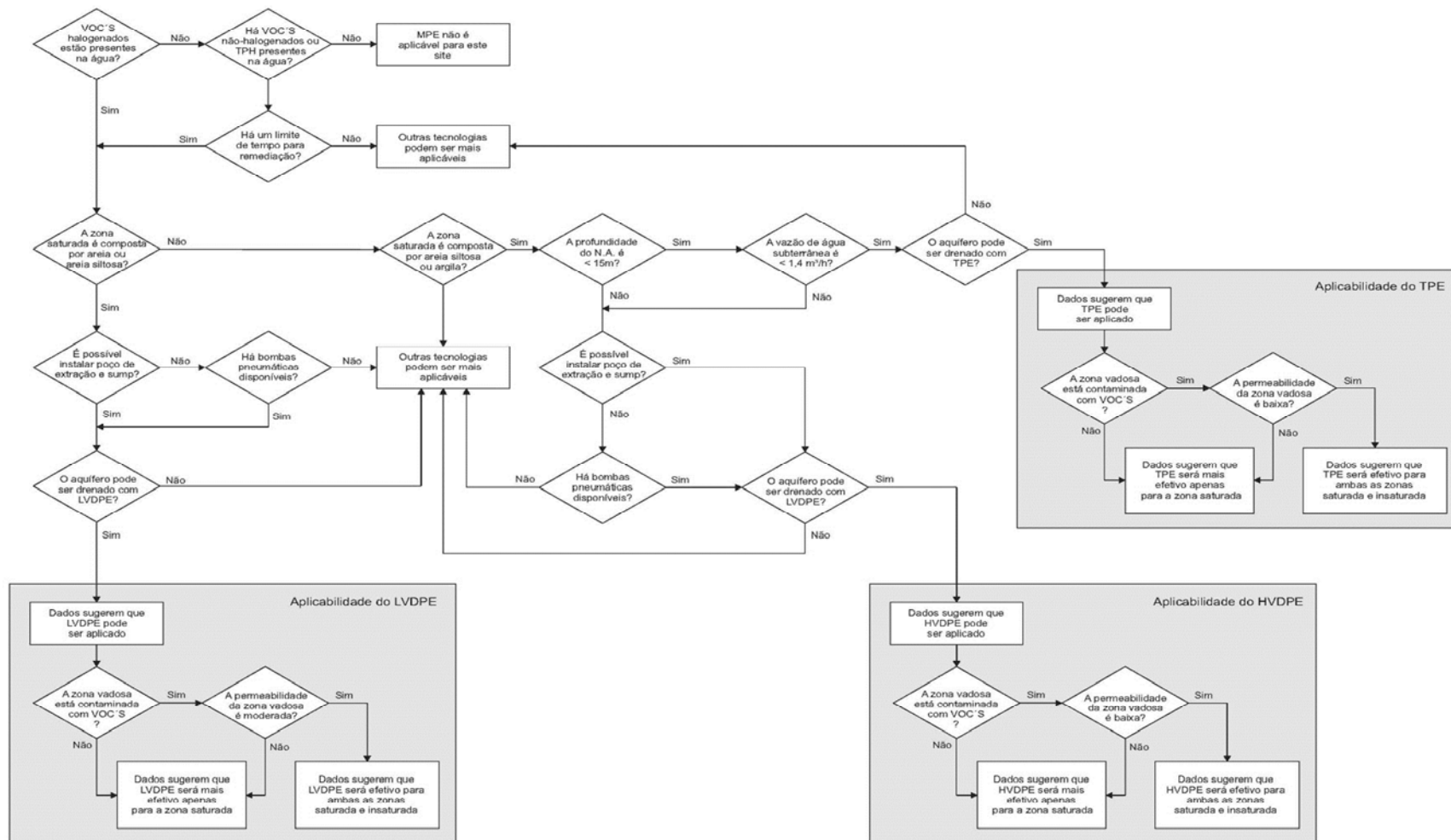


Figura 4 - Diagrama lógico de decisão de tecnologias MPE (Fonte: EPA, 1997)

2.2 Taxas de remoção de contaminantes por bombeamento, TPE e DPE – Estudos de Casos

A tecnologia TPE vem sendo utilizada em dezenas de áreas com solos de baixa a moderada permeabilidade (condutividades hidráulicas da ordem de 10^{-6} a 10^{-4} cm/s) e provou ser mais efetiva na remoção de compostos orgânicos voláteis (VOCs) em subsuperfície em relação à utilização das técnicas de bombeamento e SVE (*Soil Vapor Extraction*) isoladamente. Isto se deve ao aumento nas taxas de remoção de água subterrânea e de vapores do solo e à potencialização da volatilização dos contaminantes presentes no solo inicialmente saturado. O aumento das taxas de remoção de massa de contaminantes implica na redução dos custos da remediação. (U.S. ARMY, 1999).

Um estudo realizado pela EPA em duas áreas distintas da refinaria norte-americana BP Former Amoco Refinery, localizada em Sugar Creek, Missouri, comparou a eficiência das técnicas de remediação por bombeamento duplo e MPE para remoção de LNAPL (EPA, 2005).

A técnica de bombeamento duplo consiste na utilização simultânea de duas bombas no interior de um poço, sendo uma destinada à extração de fase livre e a outra para bombeamento de água subterrânea. Esta técnica foi aplicada em uma área com solo composto predominantemente por silte e areia fina, com porcentagem de finos variando de 11 a 69% e condutividade hidráulica da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s. A porcentagem de saturação média de LNAPL variava de 7 a 10%. O sistema operou de 1982 a 2004, removendo um total aproximado de 7.190,4 m³ de LNAPL e 740.048 m³ de água, com taxa de recuperação água / LNPL de 103:1 (1.000 L de óleo recuperado para cada 103.000 L de água subterrânea bombeada). (EPA, 2005).

A técnica de MPE foi utilizada em outra área da mesma refinaria, porém com geologia distinta, predominando a ocorrência de siltes eólicos (*silt loess*), com 92 a 98% de finos e condutividade hidráulica da ordem de 10^{-6} cm/s. A espessura de fase livre nos poços de monitoramento chegava a aproximadamente 4,9m e a porcentagem de saturação média de LNAPL de 1,4% do volume de poros. O sistema MPE operou de 2001 a 2003, com aplicação média de vácuo de 660 mmHg, recuperando 571,6 L de óleo e 817.649 L de água subterrânea, com taxa de

recuperação água/LNAPL de 1430:1 (1 L de óleo recuperado para cada 1430 L de água extraídos). (EPA, 2005).

O sistema de duplo bombeamento, operando em solo com condutividade hidráulica média da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s conseguiu extrair 67% da quantidade estimada de LNAPL recuperável na área, enquanto o sistema MPE, operando em solo de baixa permeabilidade hidráulica, conseguiu extrair menos de 10% do volume total de LNAPL presente no subsolo. Estas quantidades de LNAPL foram calculadas com o modelo API, considerando as espessuras específicas de fase livre na área da pluma. (EPA, 2005).

Este estudo concluiu que, independentemente da utilização das técnicas de bombeamento ou MPE, a remoção de LNAPL é muito mais efetiva em solos arenosos que em solos siltsos ou argilosos, de baixa permeabilidade. Outra conclusão foi que a extração de LNAPL, com o propósito de remoção da fonte de contaminação e controle da migração da mesma, em litologias arenosas, é mais fácil e economicamente mais viável que em litologias argilosas. No entanto, mesmo com menor remoção, a priorização na remoção de fase livre ainda é a principal etapa de remediação em áreas com litologia argilosa, pois a mesma é fonte potencial de contaminação da água subterrânea. Desta forma, para áreas com litologias predominantemente argilosas, a remoção de óleo, embora apresente taxas de remoção inferiores quando comparadas a uma área predominantemente arenosa, é importante para o controle e a contenção da fonte. (EPA, 2005).

Em outros estudos de casos realizados, também pela EPA foram feitas comparações entre as eficiências das técnicas de MPE (nas modalidades TPE ou DPE) e de bombeamento, observadas em 14 (quatorze) áreas contaminadas com organoclorados, e que se encontravam em processo de remediação, nas quais ambas as técnicas foram empregadas. O Quadro 4 apresenta o resumo destes estudos de casos, considerando a aplicação das diferentes técnicas em um único poço, pelo período de um ano. É possível observar que nos casos utilizando DPE a vazão mássica de contaminantes extraídos foi substancialmente maior que nos casos onde a técnica TPE foi utilizada. (EPA, 1997).

Um estudo de caso realizado em instalações mecânicas de ferrovias americanas da Norfolk Southern Railway Company (NS), contaminadas com uma mistura de hidrocarbonetos de petróleo (óleo diesel, óleo lubrificante, óleo hidráulico, gasolina, e óleo queimado), demonstrou a eficiência da técnica de DPE para a

remediação de três áreas da ferrovia, concluindo que a remoção de massa em fase livre de produto, fase dissolvida e fase vapor, utilizando esta técnica, foi economicamente mais viável nos três casos, quando comparadas a outras técnicas de remediação. Este estudo concluiu também que, para hidrocarbonetos mais pesados de petróleo, tais como a mistura de óleo diesel, óleo lubrificante, óleo hidráulico e óleo de engrenagem, a maior parte da massa de contaminante removida ocorre em fase livre, enquanto para compostos mais leves, como a gasolina, a maior parte da massa é removida nas fases vapor e dissolvida. (McDOWELL, 2001).

O estudo demonstrou a maior eficiência de remoção de contaminantes com a aplicação de vácuo em relação a outras técnicas. O artigo relata também que, apesar do sistema ser teoricamente aplicável a profundidades de até 9m, o sistema foi eficiente em profundidades até 30,5m nos casos das ferrovias estudadas. (McDOWELL, 2001).

Segundo McDowell (*op. cit.*), a distribuição do produto em subsuperfície é resultado das condições de saturação do solo e a migração da fase livre não segue os mesmos princípios hidráulicos de fluxo de fluidos em condições atmosféricas. Os padrões de espessura e de migração de produto são altamente variáveis, podendo estar presente no poço em um dia e ausente em dias subsequentes. As espessuras de produto nos poços variam drasticamente com as flutuações do nível d'água tendendo a ser maiores quando o nível d'água está mais profundo e menores quando o nível d'água é raso. O produto tende a se mover em "bolhas" (*droplets*), em oposição a camadas espaçadas uniformemente. A natureza altamente variável do fluxo de produto em subsuperfície é o principal fator que torna muito difícil prever a efetividade de técnicas convencionais de remediação para a remoção do mesmo.

Desta forma, com o DPE, a utilização de alto vácuo favoreceria o desprendimento de produto do solo e, ainda, o alto vácuo ocasionaria um aumento de produtividade dos poços de 2 a 4 vezes maior em relação ao bombeamento simples, em formações de baixa permeabilidade (condutividades hidráulicas superiores a 10^{-3} cm/s). O DPE promove ainda a maior circulação de ar na zona não saturada, potencializando processos de biodegradação e, desta forma, além da maior remoção da massa de contaminantes nas fases livre, dissolvida e vapor, promove também o tratamento das concentrações residuais em solo. (McDOWELL, 2001).

Quadro 4 - Comparação da Eficiência das Técnicas de Remediação por Bombeamento, TPE e DPE em 14 Áreas nos EUA.

Área	Tipo de Tratamento	Profundidade do Nível d'água (m)	Litologia		Contaminante de Interesse	Concentração em Água Subterrânea (µg/L)	Profundidade dos Poços de Extração (m)	Vácuo Efetivo no Poço (mmHg)	Intervalo da Seção Filtrante (m)	Massa total Inicial de VOCs Removidos (kg/dia)		Vazão de Água Subterrânea (L/h)		Vazão de Vapores (Nm³/h)	Estimativa de custo de extração (\$/kg)
			Zona Vadosa	Zona Saturada						MPE	P&T	MPE	P & T		
DDRW-Tracy OU1	TPE	7,3	Argilo siltosa	Argilo siltosa	TCE	3.5-6.5	9,4	457	4,7–9,3-	1,1 x 10 ⁻³	3,9 x 10 ⁻⁵	795	114	22-29	83,80
Travis AFB, MW-269	TPE	4,2	Argilo siltosa	Argilo siltosa	TCE	1,03	6,7	483-559	3,6—6,6	0,05	0,004	845	182	10,2-17	1869,50
Travis AFB, Ragsdale & V, MW-7	TPE	3,0	Argilo siltosa	Argilo siltosa	TCE, TPH, benzeno	3,7	8,8	432	2,6-8,7	10,9	0,13	1136	454	29	8,82
Travis AFB, OSA	TPE	2,4	Argilo siltosa	Argilo siltosa	TCE, PCE	900	8,8	572	2,4-8,5	0,4	0,05	114	57	6-8,5	242,50
Nellis AFB, Site 44	TPE	13,7	Argilo siltosa	Argilo siltosa	TCE (VOC's)	1,76	18,3	165	9—18,3	0,2	0,005	386	181,7	148-165	773,81
McClellan AFB, Bld.666	TPE	33,2	Silto arenosa	Silto arenosa	TCE, PCE, Freon	8,4	37,9	508	32,2-37,9	4	0,16	1181	908,5	160	127,87
FE Warren AFB, OU2, EW1	TPE	3,0	Cascalho argilosa, areno-siltosa	Areno-argilosa e argilosa and	TCE	0-150	7,6	229-330	3,9-7,5	0.013	0,005	613-681	454-681	3,4-6,8	7,28
Ellsworth AFB OU-11, BG-04	TPE	5,5	Silto arenoso, argilo siltoso e areia	Cascalho, argilosa	TCE	40.5	10	229-356	4-7	0,001	0,0004	454-681	<454	25,5-51	70,55
Offutt AFB, Bld. 301	LVDPE	15,2	argilosa	Silto arenosa	TCE	24,6	28	229-368	15,2-21,4	0,32	0,15	704	341	15,3-24,7	302,02
McClellan AFB, Bld. 360, EW - 321	LVDPE	34,1	Silto argilosa	Silto argilosa Argilo siltora	TCE (VOCs)	10,5	45,7	254	33,5-42,7	5,2	0,13	1340	623	98,5	540,12
	HVDPE	34,1	Silto argilosa	Silto argilosa Argilo siltora	TCE (VOCs)	10,5	48,8	381	33,5-42,7	6,2	0,13	1522	625	132,5	496,03
McClellan AFB, Bld. 360, MW-224	LVDPE	34,3	Silto argilosa	Silto argilosa	TCE (VOCs)	11	36,4	254	33,5-42,7	0,3	0,04	363	136	7,7	3,75
	HVDPE	34,3	Silto argilosa	Silto argilosa	TCE (VOCs)	11	36,4	607	33,4-36,4	1,2	0,04	409	136	18,7	2,84
Air Force Plant - 44, IRP Site 3,	LVDPE	40,2	Areno argilosa interlada com areia e cascalho	Areno argilosa interlada com areia e cascalho	TCE, DCE, TCA, Freon 113	190-510	53,3	165	12,8-56	80,3	0,09	13173	10675	392,5	6,61
Air Force Plant - 44, IRP Site 2,	LVDPE	44,2	Areno argilosa interlada com areia e cascalho	Areno argilosa interlada com areia e cascalho	TCE	240-2,100	76,2	152	36,6-74,7	333,4	0,70	25438	24984	307,5	<2,2
Air Force Plant - 44, IRP Site 5	LVDPE	36,0	arenosa	arenosa	TCE, DCE	25-58	54,9	152	36,6-45,7	10,7	0,01	15672	14536	374	26,50

(Fonte: EPA, 1997)

Nos casos de remediação das áreas nas ferrovias americanas, os contaminantes eram predominantemente hidrocarbonetos mais pesados, com menores volatilidade e mobilidade. No estudo de caso, a eficiência dos sistemas DPE foi avaliada através do custo de recuperação por galão de produto livre e do custo de remoção por libra de massa total de contaminantes removidos nas fases livre, dissolvida e vapor. Nestes valores foram considerados custos de implantação, operação, manutenção e monitoramento. (McDOWELL, 2001).

O Quadro 5 apresenta o resumo das eficiências para as três áreas da ferrovia, denominadas áreas 1, 2 e 3, respectivamente.

Quadro 5 - Resultados de DPE – Comparação por custo por galão de fase livre recuperado por libra de petróleo removido

	ÁREA 1 Fase I	ÁREA 1 Fase II	ÁREA 1 Manual /Bailer	ÁREA 2	ÁREA 3
Total de Fase Livre Recuperada (L)	488	992	189	564	12.833
Massa Total de Fase Livre (kg)	404	820	156	466	10.612
Massa Total de Água Subterrânea extraída (kg)	5.935	3.707	0	14.699	4.491
Massa Total de Petróleo extraída em Água Subterrânea (kg)	17	4	156	67	120
Total de Petróleo removido em Vapor (kg)	0,1	0,3	0	153	27
Massa Total de Petróleo removido (kg)	427,1	824	156	686	10.758
Custo Total \$	37.443 (a)	23.860 (b)	20.000 (c)	40.000 (d)	76.400 (e)
Custo total por L	76,72	24,05	105,80	70,92	5,95
Custo Total /kg	87,67	28,95	128,20	58,31	7,10
(a) Custo para sistema com 10 poços de extração, 24 horas de teste. (b) Custo para sistema com 4 poços, 10 dias de operação, 24h/dia. (c) Custo anual (d) Custo para 4 poços, 5 dias de operação, 24h/dia (e) Custo para 7 poços, 120 horas de operação por poço.					

(Fonte: McDowell, 2001)

O artigo fez referência a períodos de teste piloto para DPE em geral, sendo este de 2 a 4 dias em média. (McDOWELL, 2001).

A massa de hidrocarbonetos removida por biodegradação não foi considerada no cálculo da eficiência.

Para a área 1, fase II, o custo estimado foi de \$24 (vinte e quatro dólares) por L de produto extraído e de aproximadamente \$29 (vinte e nove dólares) por kg de hidrocarbonetos totais extraídos; para a área 2, o custo estimado foi de aproximadamente \$71 (setenta e um dólares) por L de produto extraído e de \$58 (cinquenta e oito dólares) por kg de hidrocarbonetos totais extraídos; para a área 3, o custo estimado foi de \$6 (seis dólares) por L de produto extraído e de \$7 (sete dólares) por libra de hidrocarbonetos totais extraídos. (McDOWELL, 2001).

Na área 3, onde predominavam areias finas a médias, características de área de dinâmica fluvial, de inundação de rio, com condutividade hidráulica estimada de $5,3 \times 10^{-2}$ cm/s, a eficiência do DPE foi muito maior que nas áreas 1 e 2 onde predominava litologia silto-argilosa, com condutividades hidráulicas de $5,6 \times 10^{-5}$ e $8,8 \times 10^{-4}$ cm/s, respectivamente. (McDOWELL, 2001).

Aparentemente, a combinação de alta condutividade hidráulica com a homogeneidade do meio permitiu que na área 3 ocorressem as taxas mais elevadas de recuperação de produto. (McDOWELL, 2001).

Desta forma, outra importante conclusão do estudo foi que, embora a utilização do DPE seja recomendada para áreas com litologias de média a baixa condutividade (10^{-5} a 10^{-6} cm/s), a técnica mostrou-se bastante eficiente na área 3, com litologias de alta condutividade hidráulica, possivelmente devido à relativa homogeneidade do meio. Já na área 1, em dois poços, o DPE não pôde ser aplicado, devido à alta heterogeneidade do meio, concluindo-se que a eficiência do DPE é maior em áreas com litologia mais homogênea que em áreas com grande heterogeneidade. (McDOWELL, 2001).

Ressalta-se que o artigo em questão foi escrito em 2001, quando o assunto ainda estava sendo estudado e que, atualmente, a questão da homogeneidade ser mais favorável à eficiência da remediação é bastante conhecida por profissionais que atuam na área de remediação ambiental.

O Quadro 5 mostra também que a remoção de massa dos contaminantes em fase livre é muito maior que em fase dissolvida, que por sua vez é maior que em fase vapor, no caso de contaminantes com predominância de hidrocarbonetos mais pesados, como nos casos da ferrovia. Entretanto, para contaminantes com hidrocarbonetos mais leves, como a gasolina, por exemplo, embora a maior parte da massa de contaminantes continue sendo removida em fase livre, a remoção na fase vapor geralmente é maior que na fase dissolvida. (McDOWELL, 2001).

Outro assunto abordado foi o conflito entre autores sobre a melhor forma de operar um sistema DPE: continuamente ou de forma intermitente.

O Departamento de Qualidade Ambiental da Virginia (DEQ), de acordo com McDOWELL e BARBEE (2001), defende a utilização de operação contínua do DPE para alcançar o rebaixamento do nível d'água, aumentando o cone de depressão em água subterrânea, maximizar o raio de influência para vapor, maximizar o desprendimento dos contaminantes do solo e mobilizar a fase livre para o poço de extração, além de estimular a biorremediação por melhorar a oxigenação do meio. O DEQ proíbe a utilização de sistemas intermitentes no estado da Virgínia, Estados Unidos, com base em informações de que a operação intermitente não melhora, mas atrapalha a remoção de produto da zona vadosa.

Por outro lado, segundo McDOWELL e BARBEE (2001), não há unanimidade entre consultorias e algumas delas afirmam que a operação intermitente permitiria a recuperação do nível d'água e dissolveria maior quantidade de hidrocarbonetos presente na fase residual do solo, de forma que as flutuações do nível d'água causadas pela operação intermitente atuariam como uma "lavagem" da zona saturada.

Para contaminantes compostos por hidrocarbonetos mais leves, como a gasolina, a operação intermitente seria particularmente prejudicial, pois a maior parte da massa removida ocorre na fase vapor e a transferência de massa para a fase vapor ocorre após a drenagem das porções saturadas. Desta forma, a operação contínua é mais recomendada, pois manteria o rebaixamento e favoreceria os processos de transporte de massa para a fase vapor. (McDOWELL, 2001)

Para contaminantes compostos por hidrocarbonetos mais pesados, com menores concentrações de compostos voláteis, como é o caso do óleo diesel, a maior parte da massa de contaminantes é extraída em fase livre, de forma que a principal ação do sistema seria a atuação de forças físicas para a mobilização do produto para os poços de extração. Nestes casos, o sistema poderia ser operado de forma intermitente, porém, a estimulação dos processos de biodegradação seria prejudicada. (McDOWELL, 2001)

A questão da forma de operação, contínua ou intermitente, também foi discutida na remediação de percloroetileno (PCE) do Aquífero de Borden, em Ontario, Canadá, para a técnica de SVE. Um estudo realizado analisando-se a composição do gás extraído pelo sistema demonstrou que a operação contínua

ocasionou um aumento na remoção de massa do contaminante quando comparada com a operação intermitente do mesmo sistema. Este fato foi atribuído ao incremento do gradiente de concentração entre a porção contaminada do aquífero e o ar atmosférico limpo que circula pela zona vadosa devido à aplicação do SVE. Assim, embora na operação pulsada (ou intermitente) haja um incremento na concentração dos contaminantes nos vapores extraídos no início da operação, esta concentração decai rapidamente e, ao longo de um período maior de operação do sistema, a operação contínua resultou em maior remoção de massa do composto de interesse. (THOMSON, 2000).

A efetividade da utilização de vácuo para aumentar a eficiência da biorremediação em uma área da empresa Mohler Oil, localizada em Bismarck, Dakota - EUA, também foi reportada em um relatório técnico preparado pela Energy & Environmental Research Center - University of North Dakota, em 2007. (SOLC, 2007).

Na área em questão, foi utilizado o sistema de extração multifásica DPE, em conjunto com poços de injeção de nutrientes para a bioestimulação, monitorando-se a remoção da massa dos contaminantes nas fases líquida e gasosa extraídas e a massa removida por biodegradação. (SOLC, 2007).

A recuperação combinada de contaminantes resultou em 6.170 kg de hidrocarbonetos, equivalentes a 8.236 litros de produto. A injeção de 682 kg de nitrato e 245 kg de oxigênio dissolvido resultaram na remoção de 222 kg de benzeno, e ocasionou uma estimulação a longo prazo para o processo de atenuação natural. Adicionalmente à remoção dos contaminantes por extração e reduzidos por biodegradação, uma massa de 1876 kg de oxigênio foi fornecida à zona saturada, resultando na redução estimada de 600 kg de hidrocarbonetos na fase dissolvida, durante a operação dos sistemas entre 2003 e 2006. (SOLC, 2007).

A extração de contaminantes em fase vapor (responsável por 87,9% do total de contaminantes extraídos) foi muito maior que em fase dissolvida (apenas 0,4% do total de contaminantes removidos), que a porção biodegradada pela injeção de nutrientes (3,2%) e que a porção biodegradada pelo aumento da concentração de oxigênio no meio (8,5%). (SOLC, 2007).

Embora a maior massa de contaminantes tenha sido extraída na fase vapor, a comparação com outras áreas usando apenas a extração de vapores como técnica de remediação não resulta nas mesmas taxas sem a drenagem da zona

saturada. A vantagem adicional do sistema de extração multifásica é a melhor distribuição do oxigênio nas zonas saturada e insaturada, durante a operação do sistema e a biodegradação causada por este incremento de oxigênio normalmente não é contabilizada nas avaliações de desempenho dos sistemas (SOLC, 2007).

Um teste piloto realizado em posto de abastecimento contaminado com gasolina, pertencente à Royal Farms Store, localizado em uma rodovia em Maryland, EUA, comparou a eficiência das técnicas de bombeamento e DPE (RUSZIN, 2012).

Inicialmente, foi feito um teste de bombeamento contínuo em 8 poços selecionados, para obtenção dos parâmetros do aquífero, tais como condutividade hidráulica, coeficiente de transmissividade e raio de influência (raio de captura) de cada poço sob uma taxa de bombeamento constante. As medidas de recuperação foram obtidas em intervalos de tempo similares ao monitoramento do rebaixamento do nível d'água. Posteriormente, o teste de bombeamento foi refeito em duas etapas: teste escalonado e teste contínuo. A etapa de teste escalonado foi realizada em três etapas com rebaixamentos distintos, cada uma com 90 min de duração, com o objetivo de determinar a máxima vazão de bombeamento, a qual foi utilizada no teste subsequente de DPE. O teste de bombeamento contínuo, no posto de combustível, foi conduzido por 4 h e 38 min, tempo suficiente para atingir condições de equilíbrio, e o teste de DPE foi conduzido durante 6 h e 44 min. (RUSZIN, 2012).

O teste de recuperação com DPE foi conduzido para avaliar o raio de influência utilizando-se a mesma vazão do teste de bombeamento, 15,1 a 22,7 L/min, e aplicando-se vácuo nos poços para uma vazão de extração de vapores de $1,4\text{m}^3/\text{min}$ para cada poço individualmente. (RUSZIN, 2012).

Os parâmetros utilizados nos testes piloto foram os seguintes: raio de influência de 7,6m, vazão de recuperação de água por poço individual de 15,1 a 22,7 L/min, rebaixamento do nível d'água em cada poço de 1,2m abaixo do nível estático d'água e vazão individual de vapor por poço igual a $1,4\text{m}^3/\text{h}$. (RUSZIN, 2012).

Os resultados do teste de bombeamento indicaram condutividade hidráulica de $3,0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ e o raio de influência observado foi de 8,5m. O vácuo utilizado no sistema DPE foi de aproximadamente 240 mmHg. A influência do vácuo foi observada nos cinco poços de observação utilizados para o ensaio e, aparentemente, permaneceu constante após 32 min da primeira etapa do teste. O

raio de influência para o vácuo efetivo de 0,2 mmHg foi observado a 7,6m. (RUSZIN, 2012).

Os resultados do teste indicaram que os parâmetros de desempenho dos sistemas utilizados no teste piloto, dentre os quais se incluem as vazões de líquido e de gás, poderiam ser duplicados para o DPE, em comparação com o bombeamento. (RUSZIN, 2012).

Com relação ao teste contínuo de bombeamento foi obtida a vazão de 3,8 L/min e, com a aplicação de vácuo, a vazão de extração de água subterrânea aumentou para 11,4 L/min, indicando que a aplicação de vácuo aumenta significativamente o potencial para fluxo de água no sistema. (RUSZIN, 2012).

Outra conclusão do estudo foi que a vazão ótima de operação para a máxima recuperação de produto muda de acordo com as estações do ano. Durante a estação chuvosa, a vazão de extração foi aumentada, de forma a manter o rebaixamento do nível d'água e, na estação seca, a vazão foi reduzida ou a bomba foi rebaixada. Nos primeiros estágios do ciclo de vida da remediação foram necessárias vazões maiores para manter o controle hidráulico. À medida que o rebaixamento foi atingindo a condição estática, a vazão necessária para manter o controle hidráulico foi menor. (RUSZIN, 2012).

PEHLIVAN *et al.* (2000) realizou ensaios com cinco sistemas utilizando o método patenteado BubblexSM, que consiste em um TPE onde o tubo de extração é modificado para permitir a extração em profundidades superiores a 10 m e proporcionar maior taxa de *stripping* para compostos voláteis.

A modificação no tubo de extração, proposta por esta patente, consiste basicamente na inserção de orifícios no tubo extrator abaixo e acima do nível d'água, de forma que, quando o vácuo é aplicado, a parte submersa extrai água e, simultaneamente, os vapores são extraídos pelos orifícios acima do nível d'água. Esta configuração, além de permitir a utilização do TPE em profundidades maiores que 10 m, proporciona maior transferência de massa da fase aquosa para a gasosa (*stripping*). Os resultados dos cinco testes mostraram que a taxa de *stripping* para MTBE variou de 47% a 98%, e para BTXE foram obtidas taxas de 40% a mais de 99%. (PEHLIVAN *et al.*, 2000).

Os resultados mostraram também que a taxa de *stripping* é maior quando o vácuo utilizado é maior, quando a vazão de extração de líquido é mais baixa, quando a vazão de vapores é mais elevada e quando o nível d'água é mais

profundo. Além disso, a taxa de *stripping* de BTXE foi de 20 a 30% maior que a de MTBE. (PEHLIVAN *et al.*, 2000).

MARTINS & GREGORY (2006) publicaram um artigo relatando os efeitos das mudanças ambientais nas taxas de extração de vapores do solo. Na área estudada, o objetivo era a redução da concentração de organoclorados voláteis da zona vadosa do solo e o sistema instalado foi um SVE (*Soil Vapor Extraction*) que operava inicialmente com vácuo médio de 127 mmHg, obtendo-se vazões de extração de vapores da ordem de 34 m³/h por poço.

O sistema foi implantado em 1995, e operou satisfatoriamente até 1997. Porém, devido às intensas chuvas provocadas pelo fenômeno El Niño, houve considerável elevação do nível d'água e da umidade do solo, o que levou à paralisação do sistema, pois as vazões de extração de vapores atingiram zero em alguns poços. Para solucionar o problema, foi implantado o DPE, com utilização de alto vácuo (710 mmHg), o que permitiu manter altas taxas de extração ao longo do tempo, devido à drenagem da zona vadosa causada pelo bombeamento, o que possibilitou o aumento das taxas de extração de vapores do solo e reduziu o tempo total para a remediação. (MARTINS & GREGORY, 2006).

A utilização de múltiplos poços de extração com alto vácuo durante a extração bifásica (DPE) foi efetiva na drenagem da formação e no aumento da condutividade ao ar. (MARTINS & GREGORY, 2006).

O estudo concluiu que o aumento da saturação na zona vadosa causou o decréscimo na vazão de extração de vapores, sob vácuo de 127 mmHg, de 35 m³/h para praticamente zero e que a utilização de extração com alto vácuo pôde compensar a queda na condutividade ao ar causada pela saturação de água na zona vadosa, mas houve necessidade de drenagem para manter o cone de rebaixamento nos poços de extração. A instalação do novo sistema DPE indicou que a manutenção do alto vácuo ao longo do tempo pode causar o aumento da condutividade ao ar na zona vadosa drenada, e também a expansão de caminhos preferenciais. Outra conclusão do estudo foi que poderiam ocorrer variações diárias nas taxas de extração de vapores da ordem de 8% a mais de 10% devido a variações na temperatura e pressão barométricas do ambiente. (MARTINS & GREGORY, 2006).

Ressalta-se que há poucas referências internacionais comparando a eficiência das diferentes técnicas de remediação para uma mesma área e, no Brasil,

durante a etapa de revisão bibliográfica, não foi encontrada nenhuma publicação sobre o assunto, possivelmente devido ao fato da técnica de DPE ainda ser pouco utilizada em projetos nacionais. Nota-se, por exemplo, que o DPE sequer aparece como técnica de remediação utilizada nas áreas em remediação no Estado de São Paulo, de acordo com os relatórios anuais da CETESB (2014).

Tem-se conhecimento da utilização de DPE em três áreas industriais no Brasil, localizadas nos estados da Bahia, São Paulo e Minas Gerais. Na área da Bahia, os compostos de interesse são organoclorados e, em São Paulo e Minas Gerais, hidrocarbonetos de petróleo.

A pouca utilização do DPE no Brasil deve-se possivelmente aos custos iniciais de implantação mais elevados, em comparação ao TPE e ao bombeamento.

2.3 Revisão teórica dos princípios do escoamento multifásico

2.3.1 Conservação de massa, energia e quantidade de movimento aplicada ao fluxo de água subterrânea.

Uma simplificação da equação da conservação de massa, quantidade de movimento e energia, aplicada ao fluxo de água subterrânea é apresentada pela Lei de Darcy, que correlaciona a velocidade da água subterrânea com o gradiente de energia, através da equação:

$$\tilde{q} = K \times \tilde{I} \quad (1) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

$\tilde{q}$ = fluxo volumétrico

K = condutividade hidráulica

$\tilde{I}$ = gradiente de energia (gradiente hidráulico) = $-\nabla h$

A condutividade hidráulica depende de propriedades do fluído que ocupam os poros e também das características geométricas do meio poroso e pode ser generalizada como:

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \quad (2) \quad (\text{CHARBENEAU, 2006})$$

Onde :

ρ = densidade do fluido

g = constante gravitacional

k = permeabilidade intrínseca

μ = viscosidade

A permeabilidade intrínseca depende apenas das características da matriz porosa.

Uma forma geral da lei de Darcy aplicada a fluxo multifásico pode ser expressa da seguinte forma:

$$\tilde{q} = -\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho h \hat{k}) \quad (3) \quad (\text{CHARBENEAU, 2006})$$

Onde:

$\hat{k} = \nabla z$ = vetor unitário ascendente na direção z;

p = pressão do fluido;

h = carga hidráulica;

Fluídos em meio poroso irão se mover apenas se houver forças atuando sobre os mesmos. As forças atuantes nos fluídos em meio poroso consistem em forças relacionadas ao gradiente de pressão e à gravidade. A força por unidade de massa para a água ($\tilde{F}_w$) e o óleo ($\tilde{F}_o$) podem ser expressas como:

$$\tilde{F}_w = -g \hat{k} - \frac{1}{\rho_w} \nabla p_w \quad (4) \quad (\text{CHARBENEAU, 2006})$$

$$\tilde{F}_o = -g \hat{k} - \frac{1}{\rho_o} \nabla p_o \quad (5) \quad (\text{CHARBENEAU, 2006})$$

Onde:

$\tilde{F}_w$ = força atuante na fase aquosa

$\tilde{F}_o$ = força atuante na fase oleosa

g = constante gravitacional

ρ_w =densidade da água

∇p_w =gradiente de pressão na fase aquosa

ρ_o = densidade da fase oleosa

∇p_o = gradiente de pressão na fase oleosa.

A diferença de pressão na interface de separação das fases molhante e não-molhante é chamada de pressão capilar e é definida por:

$$p_c = p_{nw} - p_w \dots\dots (6) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

p_{nw} = pressão da fase não molhante

p_w =pressão da fase molhante

Combinando a definição de capilaridade (6) com a equação (5), obtem-se a equação de Hubbert (7):

$$\tilde{F}_o = -g\hat{k} - \frac{\nabla p_c}{\rho_o} + \frac{\rho_w}{\rho_o}(\tilde{F}_w + g\hat{k}) \dots\dots (7) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

$$\tilde{I}_w = -\nabla h_w = -\hat{k} - \frac{\nabla p_w}{\rho_w g} \quad (8) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

$$\tilde{F}_w = -g\tilde{I}_w \quad (9) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Assumindo que a pressão capilar pode ser negligenciada:

$$\tilde{F}_o = -\left(\frac{\rho_w}{\rho_o} - 1\right)g\hat{k} - \frac{\rho_w}{\rho_o}g\tilde{I}_w \quad (10) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

$\tilde{F}_w$ = força atuante na fase aquosa

$\tilde{F}_o$ = força atuante na fase oleosa

g = constante gravitacional

ρ_w =densidade da água

∇p_w = gradiente de pressão na fase aquosa

$\tilde{I}_w$ = gradiente de energia na fase aquosa

∇h_w = gradiente hidráulico

ρ_o = densidade da fase oleosa

∇p_o = gradiente de pressão na fase oleosa.

A equação (10) mostra que a migração de NAPL é controlada pela influência da flutuação (primeiro termo a direita) e pelo gradiente hidráulico associado ao movimento da água (segundo termo a direita).

Em fluxo multifásico e regime estacionário, o fluxo dos fluídos praticamente independem um do outro, pois a interface está situada na zona capilar, onde não há fluxo. A forma análoga da Lei de Darcy para uma fase i é dada pela seguinte equação:

$$\tilde{q}_i = \frac{K_{ei}}{\mu_i} (\nabla p_i + \rho_i g \hat{k}) \dots (11) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

k_{ei} = permeabilidade da fase i

μ_i = viscosidade da fase i

A forma da equação 11 é idêntica à Lei de Darcy aplicada à zona saturada por água, porém no lugar da permeabilidade intrínseca k utiliza-se a permeabilidade efetiva k_{ei} .

A permeabilidade efetiva pode ser escrita como função da pressão capilar e também é comumente expressa como uma fração da permeabilidade intrínseca do meio, definindo a permeabilidade relativa para a fase i como:

$$k_{ri} = \frac{k_{ei}}{k} \dots (12) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

E a lei de Darcy pode ser reescrita como:

$$\tilde{q}_i = \frac{k k_{ri}}{\mu_i} (\nabla p_i + \rho_i g \hat{k}) \dots (13) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Apesar da forma da lei de Darcy ser semelhante à utilizada somente para fluxo de água subterrânea, o significado físico da equação 13, utilizando a permeabilidade relativa, é diferente e mais complexo, por causa dos efeitos da histerese na curva de pressão capilar (em h_i e k_{ri}), sendo função não linear das saturações das fases presentes.

Em sistemas multifásicos, parte dos poros estará saturada com água, parte com NAPL e parte com ar. A soma da saturação destas três fases será 1.

$$S_w + S_o + S_a = 1 \text{(14) (CHARBENEAU, 2006)}$$

Se os líquidos (água e NAPL) são assumidos como fluídos incompressíveis, a equação da continuidade para a fase i pode ser escrita como:

$$n \frac{\partial S_i}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{q}_i = 0 \text{(15) (CHARBENEAU, 2006)}$$

Ou

$$n \frac{\partial S_i}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k k_{ri}}{\mu_i} (\nabla p_i + \rho_i g \hat{k}) \right) \text{(16) (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

n = porosidade total

s_i = saturação da fase i

A combinação das equações 14 e 16 com as funções de pressão capilar de cada fase e com as funções de permeabilidade relativa adequadas fornecem um modelo matemático para fluxo em sistemas multifásicos. Mesmo soluções aproximadas para estas equações requerem técnicas de simulação numérica avançadas.

2.3.2 Volume de fase livre

Devido às forças capilares a espessura de óleo no interior de um poço de monitoramento não é a mesma do meio poroso. Porém, em condições de equilíbrio,

há uma correlação direta entre as espessuras de óleo no interior do poço e na formação.

Na condição de equilíbrio vertical, três fatores determinam a distribuição vertical da fase livre: densidade relativa do óleo, quantidade total de hidrocarbonetos presentes e forças capilares atuantes na matriz porosa.

A quantidade de hidrocarbonetos presente em fase livre (excluindo a parcela em fase residual acima ou abaixo da camada de óleo) é encontrada integrando a saturação de óleo (S_o) na porção ocupada pelo produto:

$$D_o = n \int_{z_{ow} + \psi_{bow}}^{z_r} S_o dz \dots\dots(17) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde

D_o = quantidade de hidrocarboneto em fase livre

A relação entre a espessura de óleo observada em um poço de monitoramento e a quantidade de óleo presente na formação é sensível à textura do solo.

Charbeneau (1999) desenvolveu um modelo linear relacionando as espessuras observadas em poço de monitoramento e a quantidade de óleo na formação, dada por:

$$D_o = \beta(b_o - \alpha) \dots\dots(18) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

β = coeficiente angular da relação linear entre volume de óleo na formação e espessura de óleo no poço de monitoramento.

α = ponto de interceptação do eixo da espessura de óleo no poço

2.3.3 Recuperação de fase livre de hidrocarbonetos de petróleo

Tecnologias alternativas têm utilizado sistemas de bombeamento duplo em poços para extração de água subterrânea e óleo, separadamente. A produção de

água cria um gradiente em direção ao poço que promove o fluxo de óleo para ser recuperado. Estes sistemas são utilizados quando há uma quantidade significativa de óleo presente e o meio poroso possui suficiente permeabilidade.

Outra tecnologia que é aplicável especialmente em meios com baixa permeabilidade é a recuperação de fase livre aumentada por vácuo. Nesta, vácuo é aplicado em um poço de recuperação, produzindo um fluxo de ar em direção ao mesmo. O gradiente resultante na fase ar cria um gradiente na fase óleo, que causa a movimentação deste para o interior do poço, onde o óleo é recuperado por bomba ou *skimmer* (CHARBENEAU, 2000).

A técnica de DPE pode ser entendida como uma extração aumentada por vácuo.

2.3.4 Saturação efetiva na camada de óleo e permeabilidade relativa

A saturação de óleo e a permeabilidade relativa variam com a elevação da espessura da camada de fase livre. A saturação é maior próximo ao topo da camada e reduz com a profundidade. A distribuição da permeabilidade relativa apresenta características semelhantes.

Se a espessura de óleo no poço de monitoramento (b_o) é selecionada como medida apropriada para estimar a espessura de óleo na formação, então a saturação efetiva na camada de óleo pode ser calculada por:

$$\overline{S_o} = \frac{1}{b_o} \int S_o(z) dz = \frac{D_o}{nb_o} \dots\dots(19) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

A estimativa de espessura de produto na formação é dada por:

$$\overline{S_o} = \frac{\beta}{n} \left(1 - \frac{\alpha}{b_o}\right); b_o \geq \alpha \dots\dots(20) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

A definição de permeabilidade relativa equivalente é dada por:

$$\overline{K_{ro}} = \frac{1}{b_o} \int K_{ro}(z) dz \dots\dots(21) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

$$\overline{K_{ro}} = \left(\frac{\beta}{n}\right)^2 \left(1 - \frac{\alpha}{b_o}\right)^2; b_o \geq \alpha \dots\dots(22) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

As equações (20) e (22) são utilizadas para desenvolver modelos para o projeto de sistemas de recuperação de fase livre.

2.3.5 Recuperação de óleo em poços de bombeamento

A distribuição do rebaixamento na camada de óleo é criada pela mesma distribuição do rebaixamento na camada de água e pode ser equacionada como função de $\ln(r/r_w)$, onde r é a distância radial em relação ao poço de extração e r_w é o raio do poço de extração:

$$\frac{S_w}{\ln(R_w/r_w)} = \frac{S_o}{\ln(R_o/r_w)} \dots\dots(23) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

R_o = raio da camada de óleo;

R_w = raio de influência do poço para água subterrânea.

Se o rebaixamento do nível d'água é pequeno comparado à espessura da zona saturada, a equação de Thiem pode ser utilizada para prever o fluxo de água e de óleo para o poço. Combinando a equação de Thiem com a equação (22), obtém-se:

$$\frac{Q_w}{K_{ws} \bar{k}_{rw} \bar{b}_w} = \frac{Q_o}{K_{os} \bar{k}_{ro} \bar{b}_o} \dots\dots(24) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde :

$\bar{b}_w$ = espessura de água;

$\bar{b}_o$ = espessura de óleo.

Assumindo que a permeabilidade relativa da água é 1 ($\bar{k}_{rw} = 1$) :

$$Q_o = \left(\frac{\rho_r \beta^2 Q_w}{\mu_r n^2 \bar{b}_w} \right) \frac{(b_o - \alpha)^2}{b_o} \dots\dots(25) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Onde:

ρ_r = densidade relativa óleo/água

μ_r = viscosidade relativa óleo/água

2.3.6 Recuperação aumentada por vácuo

A aplicação de vácuo em um poço pode aumentar a recuperação de óleo. A equação para a estimativa de recuperação de óleo causada pela aplicação de vácuo é dada por:

$$Q_o = \left(\frac{\mu_a \rho_r \beta^2 Q_a}{\mu_o \bar{k}_{ra} L_w n^2} \right) \frac{(b_o - \alpha)^2}{b_o} \dots\dots (26) \text{ (CHARBENEAU, 2006)}$$

Esta equação assume que o óleo é removido do poço na mesma taxa em que entra da formação.

2.3.7 Considerações sobre o software LDRM 2

Modelos para estimativa quantitativa da *performance* de sistemas necessariamente assumem simplificações que podem não ser aplicáveis às condições de campo, sendo esta a principal limitação dos modelos. Entretanto, o modelamento proporciona uma indicação para a seleção da tecnologia e pré-dimensionamento dos sistemas, bem como uma análise preliminar da *performance* dos sistemas. (CHARBENEAU, 2007)

A superfície do meio poroso considerada no LDRM2 é assumida como lateralmente homogênea, podendo ser diferenciada em até no máximo três camadas homogêneas. Desta forma, a heterogeneidade do solo deve ser representada no modelo apenas por três camadas. Assume-se que a transição vertical entre estas camadas ocorre abruptamente. (CHARBENEAU, 2007)

A base de dados utilizada pelo programa para o cálculo de parâmetros de fluxo multifásico pode ou não ser aplicável às condições da área em estudo, o que pode afetar significativamente os resultados finais da simulação. (CHARBENEAU, 2007).

Muitos parâmetros hidrogeológicos não podem ser facilmente obtidos diretamente em ensaios de campo, como por exemplo tensões interfaciais, forças capilares, entre outros e precisam ser analisados em laboratório, em condições diferentes das de campo. Desta forma os resultados obtidos podem não ser representativos das características reais da área. (CHARBENEAU, 2007)

Sabe-se que os sistemas no subsolo são predominantemente heterogêneos e esta característica não é bem representada pelo modelo, que é limitado a utilização de três camadas distintas, porém o interior de cada camada é considerado um meio homogêneo, o que não ocorre na prática. (CHARBENEAU, 2007).

O LDRM2 assume também condições de equilíbrio vertical. (CHARBENEAU, 2007).

Estas limitações do modelo podem produzir resultados que não necessariamente sejam aplicáveis à área em estudo, devendo-se ter um prévio conhecimento do histórico da área e de suas propriedades hidrogeológicas para avaliar a aplicabilidade ou não do LDRM2. (CHARBENEAU, 2007)

2.4 Composição e propriedades físico-químicas do óleo diesel

As propriedades físico-químicas do óleo diesel fabricado pela PETROBRAS, único fabricante nacional do produto, podem ser observadas na FISPQ (Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico), apresentada no Anexo 1.

2.5 Características Geológicas e Hidrogeológicas do Meio Físico Estudado

A área industrial selecionada para o estudo proposto está localizada às margens da Rodovia Fernão Dias, no município de Betim – MG. A seguir serão apresentadas as principais características do meio físico estudado.

2.5.1 Geologia e Hidrogeologia Regionais

O estado de Minas Gerais apresenta grande diversidade geológica, ocorrendo nessa área sequências de idades arqueana a fanerozoica, em contextos tectônicos e metamórficos dos mais variados. Tal variedade geológica reflete-se tanto na história mineradora do estado, cujo desenvolvimento está intimamente

ligado à exploração de recursos minerais desde o período colonial, quanto em sua geodiversidade. (CPRM, 2010).

As principais unidades geológicas aflorantes no território mineiro são assim divididas: (i) Cráton do São Francisco; (ii) Faixa Brasília; (iii) Orógeno Araçuaí/Ribeira; (iv) Bacia do Paraná; (v) Coberturas Colúvio-Aluviais e Eluviais. Tais unidades, sob uma abordagem tectônica, são resultantes da deposição de sedimentos em bacias geradas em contexto de tafrogênese mundial, com a “quebra” do supercontinente Rodínia ocorrida durante o Toniano. Foram gerados, ainda, granitos e rochas básicas durante o desenvolvimento de bacias *riffs*, bem como rochas de crosta oceânica, geradas na evolução de bacias de margem passiva. Essas sequências foram, posteriormente, metamorfizadas durante a fase de compressão que culminou com a amalgamação do supercontinente Gondwana durante o Neoproterozoico (Brasiliano) e o estabelecimento do Cráton do São Francisco e seus limites principais: o Orógeno Araçuaí/Ribeira e a Faixa Brasília. Nesse contexto, foram gerados vários estilos tectônicos de bacias, possibilitando a deposição de sedimentos e geração de granitos pré-, sin- e tardi-tectônicos. Durante o Mesozóico, com a “quebra” do Gondwana e o surgimento do Oceano Atlântico, novas bacias foram geradas, sendo que os representantes mais importantes no estado referem-se às unidades que ocorrem nas bacias do Paraná e Sanfranciscana. Posteriormente, sucessivos eventos erosivos de aplainamento e sedimentação de coberturas cenozoicas promoveram o entalhamento do relevo atual. (CPRM, 2010).

A área objeto de estudo, localizada em Betim – MG, insere-se no contexto geológico do Cráton São Francisco, sob o domínio do Complexo Belo Horizonte, localizado ao norte do Quadrilátero Ferrífero. Estas rochas compõem o embasamento arqueano da região do Quadrilátero Ferrífero, juntamente com outros complexos metamórficos (Bonfim e Bação) e uma sequência do tipo *greenstone belt*, pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas. (CPRM, 2010).

O Complexo Belo Horizonte é constituído por um gnaiss bandado, migmatizado, exibindo estrutura *schlieren* ou estromática e frequentes enclaves máficos, além de corpos granitóides intrusivos. Este gnaiss bandado representa o litotipo dominante do Complexo, denominado Gnaiss Belo Horizonte. É representado por um gnaiss cinza claro, exibindo bandamento composicional e feições de migmatização. Frequentemente exhibe um fino bandamento, de milimétrico

a centimétrico, resultante da alternância de bandas leucocráticas e máficas, ricas em biotita. O bandamento pode apresentar caráter retilíneo e uniforme ou encontrar-se fortemente dobrado e rompido. Quanto a sua composição química, podem ser classificados como ortognaisses do tipo tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG). Embora tenham sido geradas durante o arqueano, estas rochas foram muito afetadas durante o evento Transamazônico, por volta de 2050 Ma (MACHADO *et al.* 1992; NOCE, 1995).

A ocorrência generalizada e aleatória de diques máficos proterozóicos cortam a área com uma orientação predominante N50-70W; enquanto que os fraturamentos possuem uma direção preferencial N10-30W e N50-70E e mergulho de alto ângulo (CPRM, 2010).

O Domínio do Complexo Belo Horizonte está inserido na unidade geomorfológica da Depressão de Belo Horizonte, a qual possui um relevo caracterizado por espigões, colinas de topo plano a arqueado, e encostas policonvexas de declividades variadas nos flancos dessas feições e nas transições. As drenagens da área em estudo mostram um controle estrutural, associadas aos vales, superimpostos pelo fraturamento do substrato arqueano (CPRM, 2010).

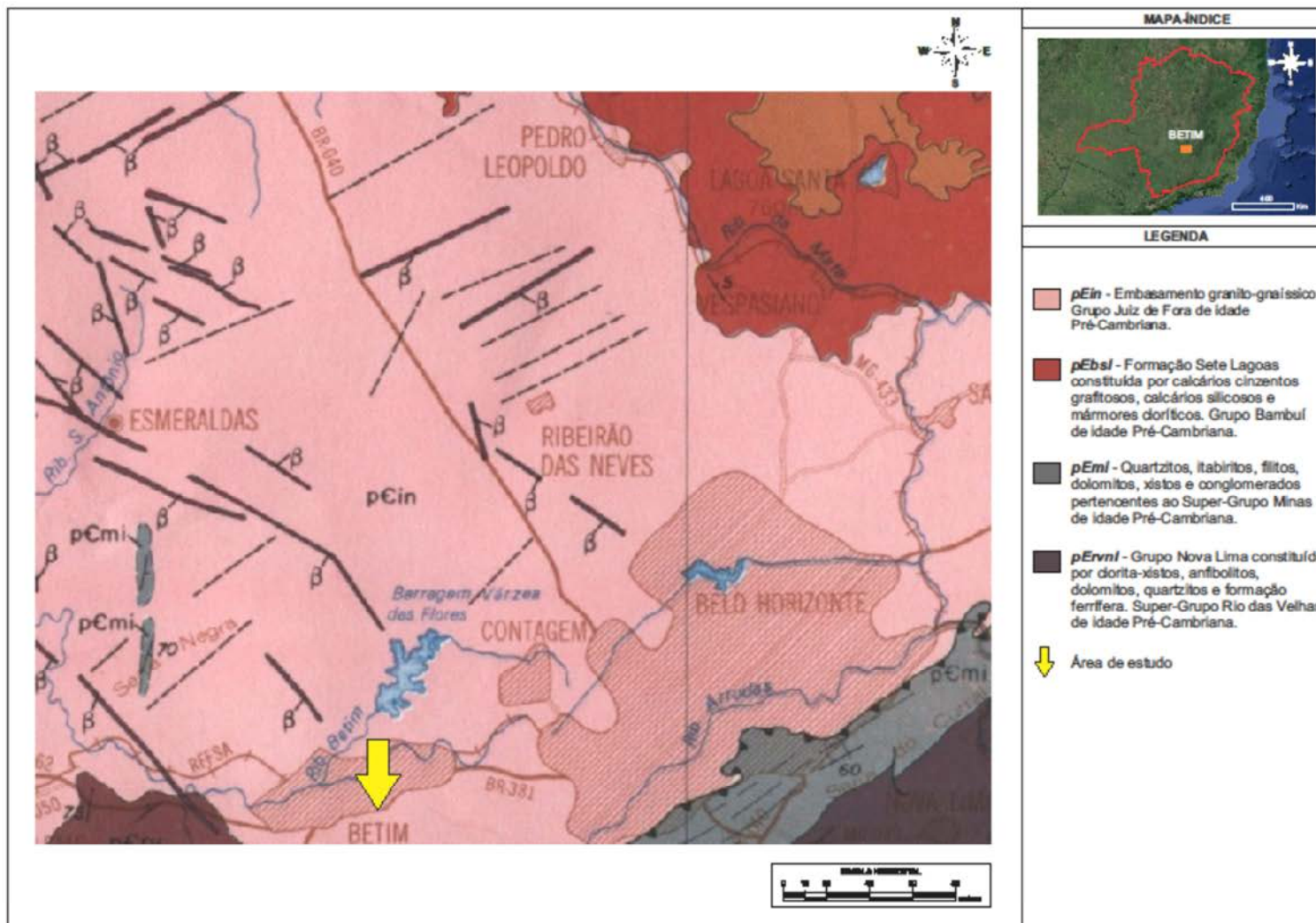
O clima úmido associado a rochas gnáissicas bastante fraturadas ocasionou regionalmente um espesso manto saprolítico. O solo residual é rico em areia, silte e argila, enquanto que os depósitos aluvionares ocorrem nos vales, ao longo das calhas dos principais cursos d'água, predominando depósitos de naturezas areno-argilosas e argilo-arenosas (CPRM, 2010).

Segundo a classificação proposta por Mourão *et al.* (2001), para os aquíferos da porção mineira da Bacia do Rio São Francisco, na região onde está instalada a área em estudo, ocorrem representantes dos sistemas aquíferos granulares e fissurados, em rochas ígneas e metamórficas de alto grau. O Sistema Aquífero Granular é representado pelos depósitos sedimentares ou coberturas detríticas formadas a partir do Cretáceo. Nesse sistema, destacam-se os aquíferos superficiais relacionados ao manto de decomposição das rochas (saprólitos, colúvios e elúvios – aquíferos potencialmente fracos, mas importantes no processo de recarga dos aquíferos subjacentes, por infiltração vertical), e os depósitos detríticos de cobertura do Terciário-Quaternário. Em relação aos aquíferos fissurados, instalados em rochas ígneas e metamórficas de alto grau, destaca-se que os mesmos apresentam grande variabilidade nas características hidrogeológicas,

função direta da densidade de estruturas e do grau de intemperismo, uma vez que englobam rochas de tipos muito distintos (CPRM, 2010).

De modo geral, as rochas mais antigas exibem uma trama mais densa de estruturas e, conseqüentemente, maior potencial hidrogeológico. Rochas intrusivas de idade Cambriana ou superior exibem menor capacidade de produção de água e podem funcionar localmente como barreiras hidráulicas devido à sua baixa permeabilidade. (CPRM, 2010).

A Figura 5 apresenta o Mapa Geológico Regional, no qual está inserida a região de Betim – MG.



2.5.2 Geologia e Hidrogeologia Locais¹

Conforme as diversas sondagens realizadas na área objeto de estudo por empresas de consultoria, as quais apresentaram profundidade máxima de 15 m, os estratos existentes na área foram interpretados do topo para a base da seguinte forma:

- Aterro constituído por solo areno-siltoso a silto-arenoso;
- Aterro de solo silto-arenoso a silto-argiloso com fragmentos de materiais de construção e fragmentos de rocha;
- Solo areno-siltoso a areno-argiloso, de coloração avermelhada, apresentando fragmentos subangulosos de quartzo, nódulos argilosos, seixos subangulosos de quartzo;
- Solo arenoso de coloração bege;
- Solo areno-argiloso de coloração cinza esverdeada;
- Areia fina de coloração cinza esverdeada;

A hidrogeologia local apresenta um aquífero livre, raso, situado em meio poroso, de grande extensão, localizado no Complexo Belo Horizonte. A recarga deste aquífero ocorre predominantemente por infiltração de águas superficiais.

Os resultados obtidos em 2011 para ensaios de permeabilidade realizados em nove poços indicaram valores de condutividade hidráulica de $7,85 \times 10^{-6}$ cm/s a $1,62 \times 10^{-4}$ cm/s, com valor médio de $6,70 \times 10^{-5}$ cm/s.

A Figura 6 apresenta a seção geológica X-Y mais representativa da área em estudo. A seção geológica está representada entre os poços PM-DV-02 e PM-DV-15 na seção X-Y, direção paralela ao eixo principal da pluma de contaminantes.

A Figura 7 apresenta o Mapa Potenciométrico para a área em estudo, confeccionado a partir da interpolação dos dados de carga hidráulica adquiridos por empresa de consultoria no dia 15/08/13, onde foram traçadas curvas equipotenciais e, perpendicular às mesmas, o sentido do fluxo de água subterrânea.

¹

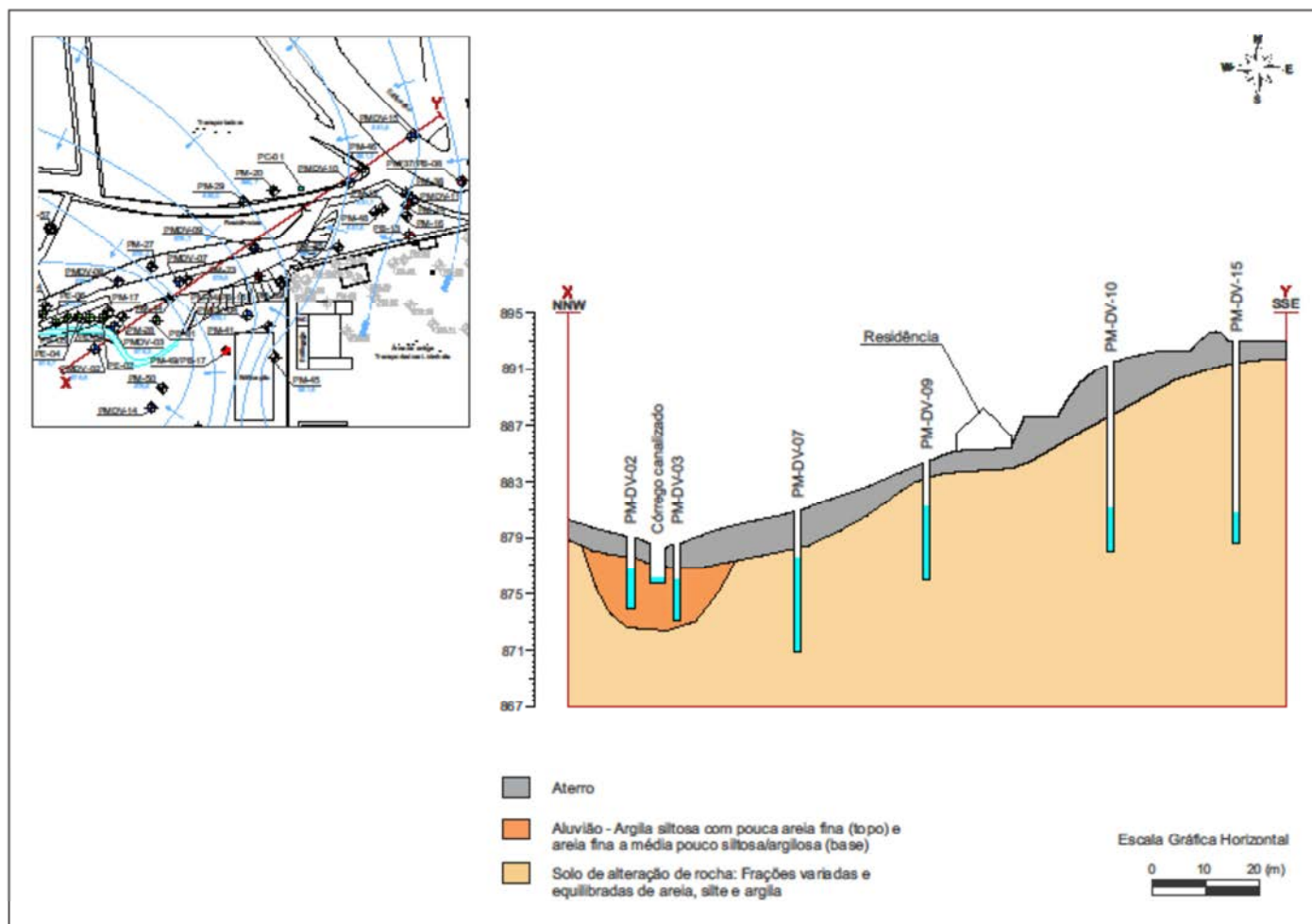


Figura 6 - Secção Geológica Local

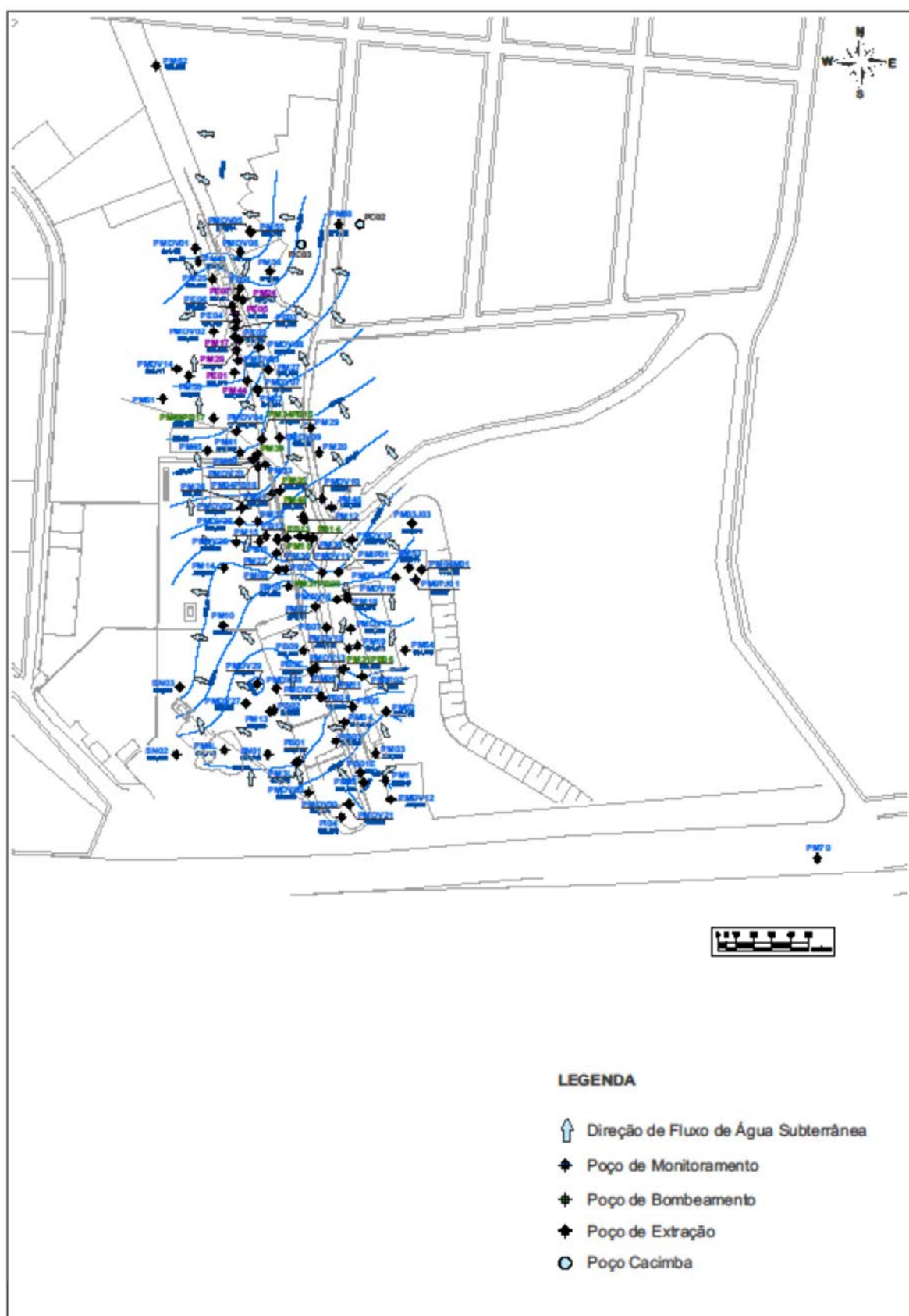


Figura 7- Mapa Potenciometrico

A direção preferencial de escoamento é Sudeste-Noroeste com sentido preferencial Noroeste, em direção a um córrego existente na área. Esta unidade aquífera apresenta variação da carga hidráulica de 873,08 (PM-62) a 889,48 m (PM-05).

Com base nos dados históricos de campo, foi verificada a existência de um aquífero de caráter livre até a profundidade investigada (15,0 m), associado, na faixa a montante da contaminação, a um solo residual proveniente da alteração de rochas Granito-Gnaiss, e a jusante, nas adjacências do córrego canalizado existente no local, a um aluvião. O nível d'água médio do lençol freático local foi de 6,23 m, variando entre 0,45 m (PM-25) e 12,90 m (PM-DV-14), de acordo com os dados obtidos em agosto de 2013 em amostragem realizada por empresa de consultoria. Neste trabalho foi considerada a porosidade efetiva para sedimentos areno-siltosos a silto-arenosos, variando de 10 e 25% para o aquífero local, de acordo com informações obtidas de literatura (FETTER, 1994).

Devido a presença de um declive acentuado na área de interesse, o gradiente hidráulico e a velocidade de fluxo foram calculados para dois pares de poços:

- Área 1: PMDV-12 (888,04 m) e PMDV-17 (884,19 m);
- Área 2: PMDV-09 (879,84 m) e PM-25 (876,89 m);

Os poços da área 1 estão em uma área relativamente plana, enquanto os poços da área 2 encontram-se na região em declive e próxima ao canal de drenagem.

Considerando a média harmônica da condutividade hidráulica igual a $6,70 \times 10^{-5}$ cm/s, e porosidade efetiva média (n_e) de 10%, a velocidade aparente de fluxo da água subterrânea foi estimada em 8,0 m/ano para a área 1 e 6,5 m/ano para área 2.

2.6 Clima, Relevo, Vegetação e Hidrografia na Região de Betim

O município de Betim está localizado em altitude média de 860m em relação ao nível do mar, com vegetação predominante de cerrado e mata de galeria nos vales úmidos.(MELLO, 2006).

Segundo classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, temperado brando com verões quentes e chuvosos e invernos brandos,

caracterizados por épocas secas. As temperaturas médias no verão tendem a superar os 22°C, enquanto que as médias dos meses mais frios estão abaixo de 18°C. (MELLO, 2006).

De acordo com MELLO *et al.* (2006):

“... o clima local é definido como tropical de altitude ameno e seco, com dias ensolarados e noites com temperaturas amenas. O verão é úmido, e o inverno seco. As temperaturas médias variam com a latitude. As chuvas variam, em geral, entre 1.500 e 2.000 mm por ano. Caem principalmente em dezembro, janeiro e fevereiro. A seca dura de 4 a 6 meses”.

“...O Município de Betim está inserido na bacia do rio Paraopeba. Seu relevo é o dos planaltos ondulados no imenso tabuleiro que se estende pelos contrafortes da Serra do Curral até Oeste de Minas Gerais. O Relevo é acidentado, principalmente nas vertentes da Serra Negra terminando em vales e áreas com menores declividades. A topografia de Betim pode ser caracterizada pela seguinte maneira: 15% do relevo é plano, 25% é montanhosa e a grande maioria, 60% é ondulada”.

“A intensidade do processo de fragmentação e de redução apresenta padrões diferenciados nas várias regiões da bacia do rio Betim. Esses padrões são decorrentes da interação das características físicas da região, em especial o relevo e a fertilidade do solo, com a sucessão histórica das diversas atividades econômicas desenvolvidas no Município, desde o início de sua ocupação.

As áreas urbanas são as que mais sofreram reduções da cobertura vegetal; a maioria dos remanescentes florestais encontra-se nos topos e nos vales das colinas e na parte alta das vertentes. Foram identificados, em 1994, três tipos fisionômicos principais: Florestas de galeria, floresta mesófila (secas) e cerrados ”.

Quanto à hidrografia, a área de interesse está localizada na micro-bacia do Córrego do Pintado, integrante da sub-bacia do Rio Paraopeba, tributário do rio São Francisco. O Córrego Pintado é um dos formadores da represa de Ibirité. (CPRM, 2010).

2.7 Pluviometria

O regime de chuvas da região não apresentou grandes mudanças nos últimos 10 anos. No período compreendido entre 2004 e 2014, desde o início da operação dos sistemas de remediação na área, portanto, houve uma relativa estabilidade dos índices pluviométricos na região de Betim, com exceção dos anos de 2005 e 2006, que apresentaram um baixo índice pluviométrico, e de 2011, com alta no índice pluviométrico. (INMET, 2014).

A Figura 8 apresenta os índices pluviométricos médios de 2004 a 2014.

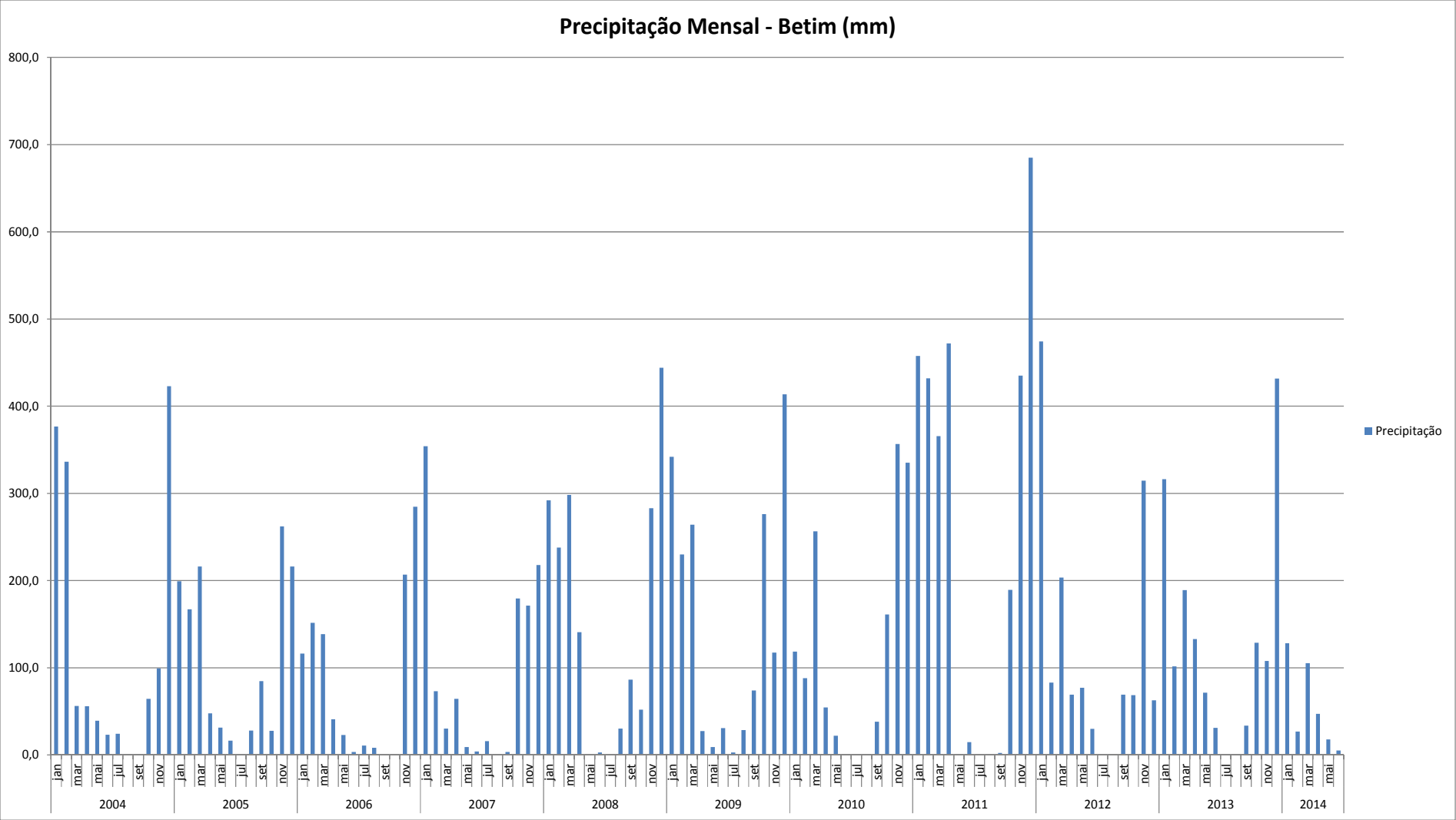


Figura 8– Índices Pluviométricos (Fonte: INMET, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizadas as seguintes metodologias: revisão bibliográfica, compilação de dados de relatórios de operação dos sistemas de remediação elaborados por empresas de consultoria e fornecidos pelo proprietário da área contaminada em estudo, realização de trabalhos no campo, tratamento e análise dos dados obtidos, comparação dos dados obtidos com previsões de modelos teóricos.

a) Revisão bibliográfica

Nesta etapa foram consultados trabalhos científicos publicados em artigos, livros, teses, *sites* de órgãos ambientais nacionais e internacionais, dentre outros.

b) Compilação de dados de operação de sistemas de remediação

Nesta etapa foram analisadas e compiladas informações contidas em relatórios técnicos de trabalhos de investigação e remediação ambiental, realizados no período de 2003 a 2014, por quatro empresas de consultoria que atuaram na área em estudo. Os relatórios foram fornecidos pelo proprietário da referida área para utilização dos dados nesta dissertação, porém as fontes não poderão ser citadas por conterem informações sigilosas.

Ressalta-se que foram selecionados apenas dados e informações relevantes para este estudo, não sendo objetivo a compilação e utilização de todos os dados gerados durante todo o período de operação de diferentes sistemas, devido ao grande número de poços de monitoramento, extração e bombeamento existentes na área em questão.

Para fins didáticos, a área em estudo foi dividida em duas outras, denominadas área 1 e área 2.

A área 1 localiza-se na porção mais alta do terreno e nesta opera, desde junho de 2011, um sistema de bombeamento e tratamento, interligado a 10 poços. A área 2 localiza-se em uma área de declive, próxima a um córrego que corta a propriedade, e nesta opera desde junho de 2011, um sistema TPE interligado a 8 poços.

Todos os poços foram instalados por empresas terceirizadas de consultorias ambientais, as quais relataram a construção de acordo com a norma técnica ABNT NBR -15495-1(2007).

c) Realização de ensaios de campo e comparação da eficiência das técnicas de remediação

Na área 1 foi realizado ensaio piloto utilizando a técnica de DPE. Este ensaio foi conduzido pela empresa de remediação ambiental que atuava na área, com acompanhamento da autora.

Na área 2 foram conduzidos pela autora ensaios piloto de bombeamento, TPE e DPE.

A comparação da eficiência das três técnicas de remediação foi comparada através das vazões de extração de água subterrânea obtidas durante os ensaios de campo.

d) Comparação dos resultados obtidos com previsões teóricas

Os resultados obtidos nos ensaios de campo para as vazões de extração nas três técnicas estudadas foram comparados com previsões teóricas.

A Figura 9 apresenta o fluxograma de etapas do trabalho

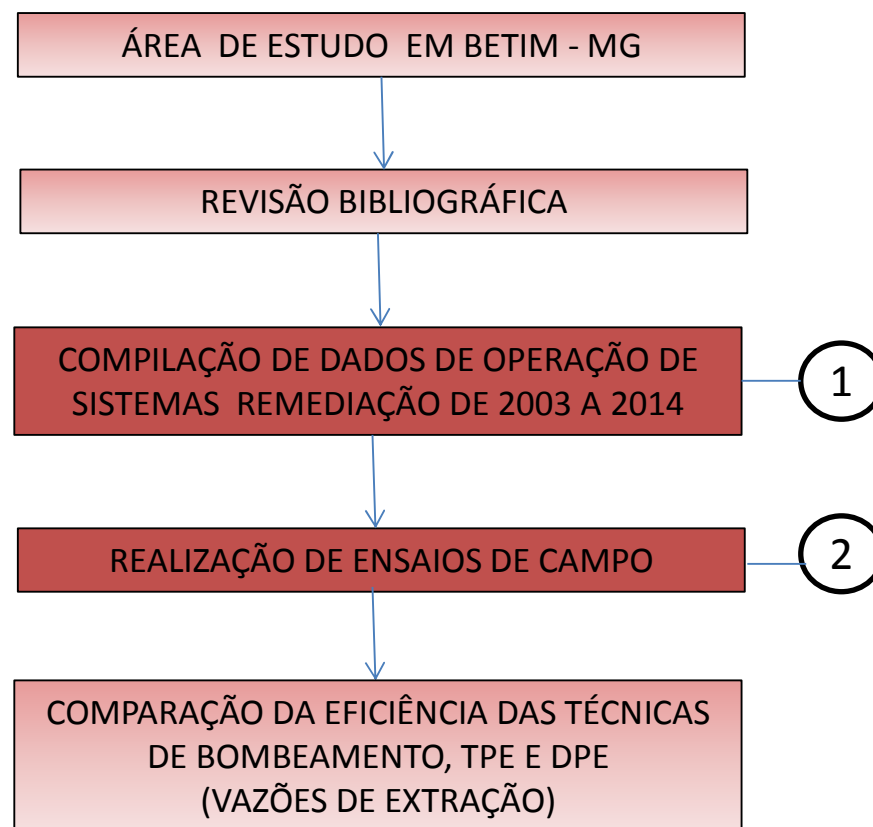


Figura 9– Fluxograma de etapas do trabalho

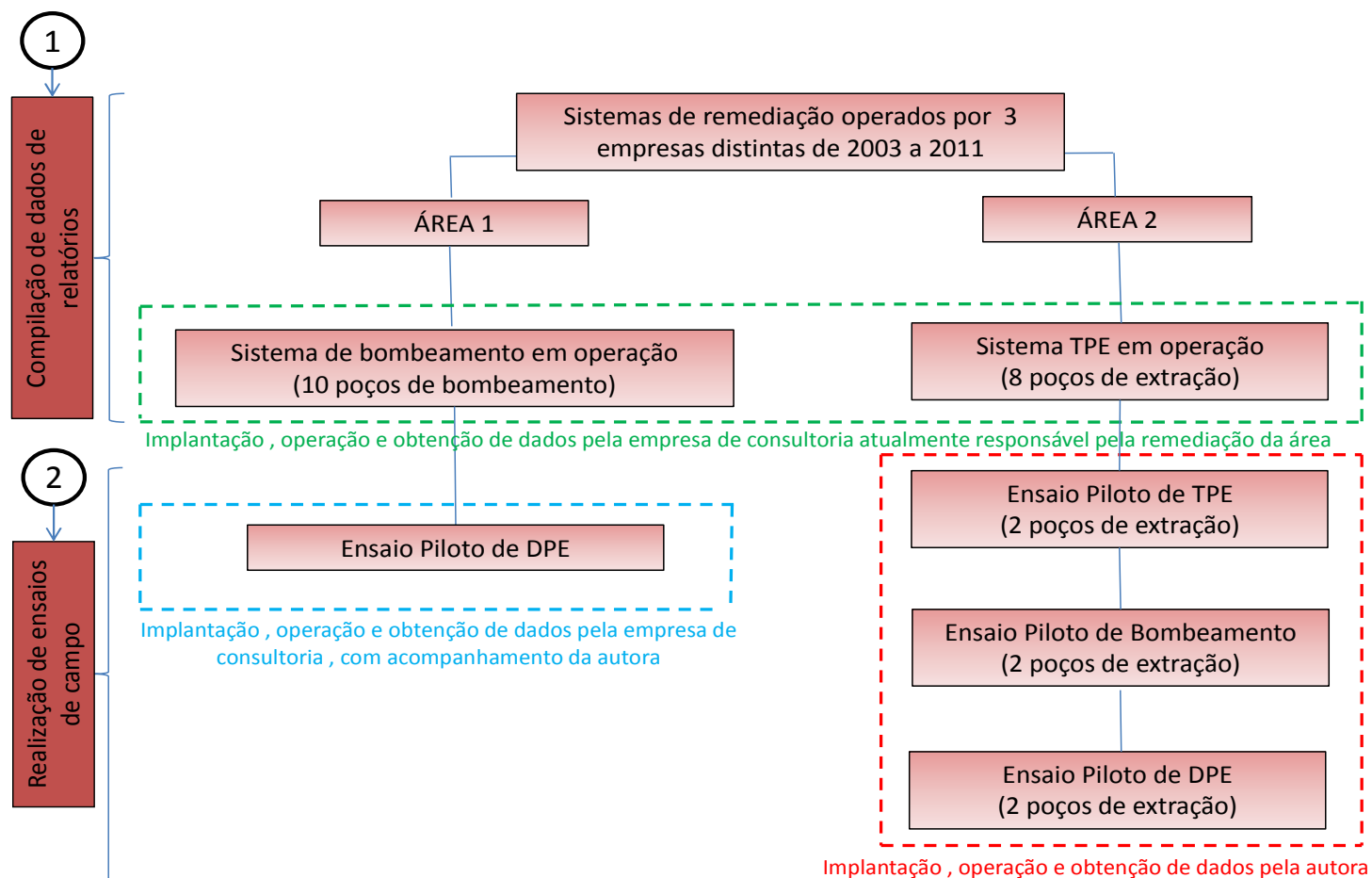


Figura 9– Fluxograma de etapas do trabalho (continuação).

3.1 Materiais e Métodos Utilizados na Operação dos Sistemas de Bombeamento e TPE

Os Quadros 6 e 7 apresentam a relação de equipamentos e instrumentos utilizados nos sistemas de bombeamento e TPE, implantados nas áreas 1 e 2, respectivamente e as Fotos 1 a 5 ilustram detalhes dos dois sistemas.

A Figura 10 apresenta a localização dos sistemas selecionados e dos poços de extração interligados aos mesmos.

Para os sistemas e poços selecionados foram compiladas informações de nível d'água, nível de óleo, massa dos contaminantes de interesse extraídos em fase livre, dissolvida em água e em vapores (quando disponível), pressões de operação e outros dados do sistema, contidas em relatórios de operação fornecidos pelo proprietário da área.

É importante ressaltar que os sistemas operam 8 horas/dia de segunda a sexta-feira e permanecem desligados durante o final de semana. Esta forma de operação é imposta pela presença de população muito próxima à área em remediação e à consequente necessidade de redução de ruídos durante o período noturno, além de questões contratuais que não preveem operação em períodos noturnos, ficando a mesma restrita ao horário de funcionamento da unidade industrial.

No sistema TPE, durante todo o período de operação, o vácuo medido no tanque de vácuo variou de 200 a 250mmHg. Embora o compressor radial utilizado tenha capacidade para atingir vácuos de até aproximadamente 450mmHg, a elevada temperatura dos gases na saída do sistema limitam a utilização de vácuos superiores à faixa de 200 a 250 mmHg. Como não há equipamento para resfriamento dos vapores e os mesmos são tratados em colunas de carvão ativado, sendo o processo de adsorção prejudicado por temperaturas elevadas, a faixa de operação foi mantida em 200 a 250 mmHg durante todo o período avaliado.

O controle do vácuo aplicado ao sistema é feito através de um inversor de frequência, que regula a faixa de operação do motor do compressor radial.

Quadro 6 - Componentes do Sistema de Bombeamento e Tratamento

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA
Compressor parafuso	Atlas GX 11, 78,8 m ³ /h, 7 bar
Bomba helicoidal de transferência	Modelo Nemo NM031BY, Netzsch, motor 1,5 kW, 1,25 m ³ /h
Caixa separadora de água e óleo	Tipo placas coalescentes, capacidade 2.000 l/h.
Filtro de carvão ativado para fase líquida (2 unidades)	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Controlador Lógico Programável (CLP)	CLP para controle das bombas e sistema de tratamento
Painel elétrico	Acionamento de motores através de IHM
Bombas pneumáticas (10 unidades)	Bombas de deslocamento positivo, em aço inox 316, capacidade 1 l/ciclo (400l/h)
Tanque para armazenamento de líquidos	Montado em aço com pintura eletrostática, capacidade 20 m ³
Tanque de aeração	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Manômetros analógicos	Tipo Bourdon, escala 0-12 kgf/cm ²
Hidrômetro analógico	Soppel, modelo Aquarius, vazão nominal 1,5 m ³ /h, vazão mínima 30 l/h
Chaves de nível baixo, alto e alto-alto	Tipo bóias de inserção lateral, em polipropileno

Quadro 7 - Componentes do Sistema TPE

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA
Bomba de vácuo	Compressor Radial (Side Channel) Rietschle Thomas, motor 13,2 kW, 420 m ³ /h
Bomba helicoidal de transferência	Modelo Nemo NM031BY, Netzsch, motor 1,5 kW
Tanques metálicos.	Fabricados com chapas de aço de 3 mm, pintados pelo processo eletrostático
Painel Elétrico de Controle	Proteções contra sobre-corrente e falta de fase, inversor de frequência
Caixa separadora de água e óleo	Tipo placas coalescentes, capacidade 2.000 l/h.
Filtro de carvão ativado para fase líquida	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Filtro de carvão ativado para fase gasosa	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Manômetros analógicos	Tipo Bourdon, escala 0-12 kgf/cm ²
Vacuômetros analógicos	Tipo Bourdon, escala -1 a 0 kgf/cm ²
Hidrômetro analógico	Soppel, modelo Aquarius, vazão nominal 1,5 m ³ /h, vazão mínima 30 l/h
Chaves de nível baixo, alto e alto-alto	Tipo bóias de inserção lateral, em polipropileno



Foto 1- Detalhes internos do sistema de bombeamento – coluna de carvão ativado



Foto 2 - Painel com válvulas reguladoras de ar comprimido do sistema de bombeamento



Foto 3 -Painel de controle com CLP do sistema de bombeamento



Foto 4- Detalhes internos do sistema TPE



Foto 5- Detalhes do painel de controle do sistema TPE

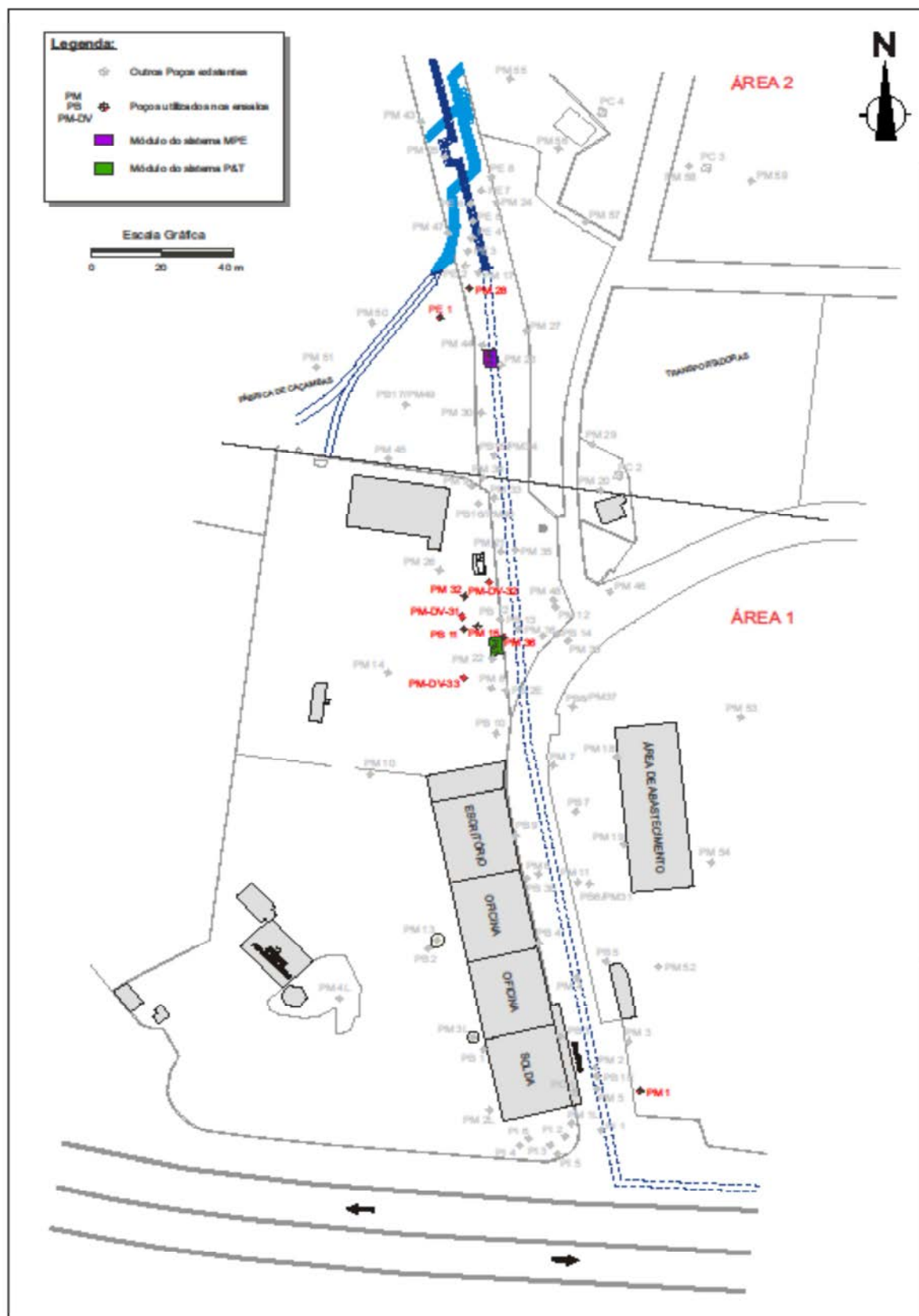


Figura 10- Localização dos sistemas e poços nas áreas 1 e 2 em Betim – MG

3.2 Materiais e Métodos Utilizados no Ensaio Piloto de DPE na Área 1

Para a realização do ensaio piloto na área 1 foram utilizados o compressor e o sistema de tratamento de efluentes do sistema de bombeamento previamente instalado nesta área, além de um sistema móvel de Extração de Vapores do Solo, SVE (*Soil Vapor Extraction*), para geração de vácuo no cabeçote do poço de extração.

O poço PM-15 foi selecionado como poço de extração para o ensaio de DPE, pois é um poço que apresentou histórico de constante presença de fase livre e está localizado próximo ao centro da pluma de fase livre inferida nos relatórios de evolução da remediação.

O poço também apresenta características construtivas apropriadas para o uso no ensaio, pois possui seção filtrante da base do furo até a 1 metro abaixo da cota do solo, cobrindo a maior parte da zona vadosa.

Três poços de observação (PO-01 a PO-03) foram dispostos radialmente em relação ao poço de extração (PE /PM-15), em ângulos de 120° entre si, distanciando-se do PE em 05 (cinco), 10 (dez) e 15 (quinze) m, respectivamente, de modo a se obter pontos representativos para o monitoramento e detectar eventuais heterogeneidades da área. Além destes, foram utilizados também para observação os poços PO-04 (PB-11), situado a 3,7 m do poço de extração, o poço PO-05 (PM-36), situado a 6,4 m do PE e o poço PO-06 (PM-32), localizado a 7,7 m do PE.

O Quadro 8 apresenta relação de poços utilizados no ensaio e as distâncias dos poços de observação em relação ao poço de extração.

Os perfis das sondagens dos poços de extração e dos poços de observação PO-01, P-O2 e PO-03 são apresentados na Figura 11. Para os demais poços de observação os desenhos dos perfis não constavam nos relatórios disponibilizados pelo proprietário da área.

Os equipamentos e instrumentos utilizados no ensaio piloto são listados no Quadro 9.

O ensaio de DPE foi conduzido durante cinco dias consecutivos, em duas etapas: teste escalonado e teste contínuo.

Quadro 8- Relação de poços utilizados no ensaio piloto de DPE

TAG	Tipo de Poço	Distância em relação ao poço de extração PE (m)
PE-01	poço de extração (PM-15)	-
PO-01	poço de observação (PM-DV-31)	5
PO-02	poço de observação (PM-DV-32)	10
PO-03	poço de observação (PM-DV-33)	15
PO-04	poço de observação (PB-11)	3,7
PO-05	poço de observação (PM-36)	6,4
PO-06	poço de observação (PM-32)	7,7

Quadro 9- Relação de equipamentos e instrumentos utilizados no Ensaio Piloto – área 1

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA
Compressor parafuso	Atlas GX 11, 78,8 m ³ /h, 7 bar
Tanques metálicos.	Fabricados com chapas de aço de 3 mm, pintados pelo processo eletrostático
Tanque para armazenamento de líquidos	Montado em aço com pintura eletrostática, capacidade 20 m ³
Bomba helicoidal de transferência	Modelo Nemo NM031BY, Netzsch, motor 1,5 kW
Controlador Lógico Programável (CLP)	CLP para controle das bombas e sistema de tratamento
Painel elétrico	Acionamento de motores através de IHM
Caixa separadora de água e óleo	Tipo placas coalescentes, capacidade 2.000 l/h.
Filtro de carvão ativado para fase líquida	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Bomba de vácuo	Compressor Radial (Side Channel) Rietschle Thomas, motor 5 kW, 360 m ³ /h
Filtro de carvão ativado para fase gasosa	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Medidor de nível de água/óleo	Interface -marca Solinst
Indicadores de pressão	Manômetros e vacuômetros analógicos
Indicadores de pressão	Manômetro diferencial digital portátil da marca Dwyer Digimag
Transdutores de pressão	Level loggers Solinst, modelo Edge
Detector portátil de VOC's	Gastech Innova
Termoanemômetro portátil	Marca Instrutherm, modelo AD-250
Fotoionizador portátil	PID
Totalizador de vazão	Hidrômetro multijato
Balde graduado	-

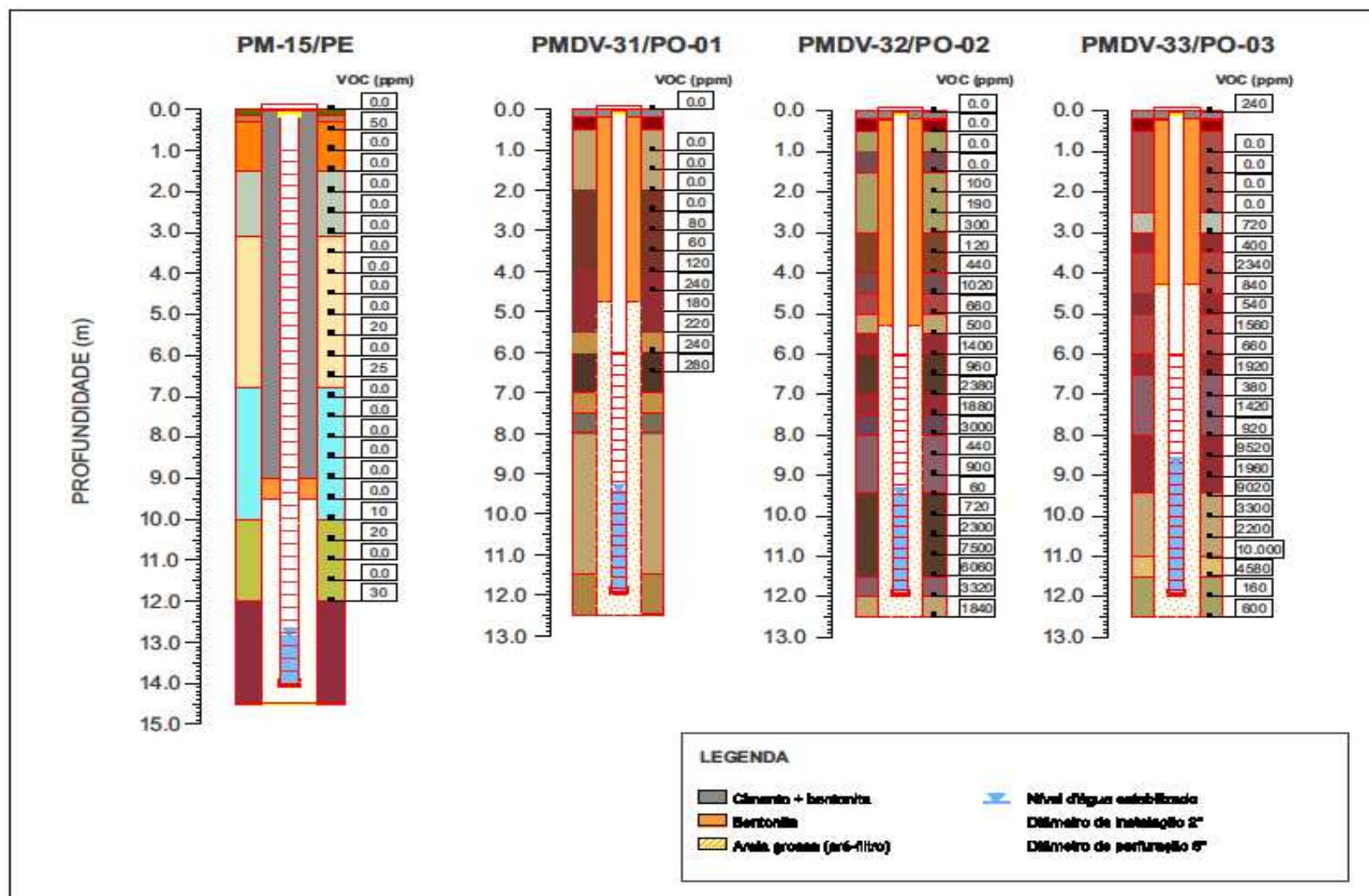


Figura 11- Perfis de sondagens dos poços de extração e observação utilizados no ensaio piloto de DPE – área 1.

Após o termino da instalação dos sensores e interligação das tubulações de extração ao sistema foram realizados pré-testes para verificar o funcionamento de todos os equipamentos e instrumentos do sistema.

No dia 05/08/2014 foi realizada a etapa de teste escalonado, que consistiu na aplicação de duas faixas de vácuo distintas no cabeçote do poço de extração (100 e 200 mmHg, respectivamente), com duração de 2h em cada faixa, simultaneamente ao bombeamento com bomba pneumática de deslocamento positivo (tipo *auto pump*) instalada no mesmo poço, e monitoramento dos seguintes parâmetros:

- vazões de extração de água, de produto e de vapores;
- vácuo aplicado no sistema e nos cabeçotes do poço de extração e dos poços de observação;
- Variação do nível d'água no poço de extração e nos poços de observação;
- Concentração expedita de VOC's nos vapores extraídos;
- Concentração dos compostos de interesse (BTXE, TPH e PAH) nos efluentes líquidos e gasosos, através de análises químicas.

Antes do início do ensaio foi feita a medição do nível d'água e de produto em todos os poços da área com medidor de nível d'água do tipo interface. Durante o ensaio, o nível d'água no poço de extração PE-01 e nos poços de observação PO-01, PO-02 e PO-03 foi monitorado através de *level loggers*. No container de apoio foi instalado um *Barologger* para registrar mudanças na pressão atmosférica e permitir as correções correspondentes nas variações de nível água.

Todos os *level loggers* utilizados foram programados para realizar automaticamente uma leitura a cada 60 s.

A medição de vazão da fase gasosa extraída pelo sistema DPE foi feita indiretamente com um termoanemômetro portátil para a medida da velocidade dos vapores tratados na saída da chaminé do sistema. Utilizando-se os dados de velocidade, pressão e temperatura medidos e o diâmetro da tubulação de saída, foram calculadas as vazões de extração de vapores durante o teste.

A medição de vácuo no sistema foi realizada com vacuômetro analógico instalado no tanque de vácuo. Nos cabeçotes dos poços de extração e observação,

a medição foi feita com um manômetro diferencial digital portátil, acoplado à uma válvula.

Após cada estágio do teste, os compressores foram desligados e os volumes de água e produto bombeados foram medidos com o hidrômetro e balde graduado, respectivamente.

Não foi possível variar o posicionamento da bomba pneumática de captação superior no poço de extração durante a etapa de teste escalonado, pois devido ao período de estiagem que antecedeu o teste, a coluna d'água no poço era de apenas 2,0 m. A bomba utilizada media 1,20m e, de acordo com informações do fabricante, era necessária uma coluna d'água de pelo menos 1,0m acima do ponto de captação não permitindo a alteração do posicionamento da bomba em profundidades distintas, sendo então mantida na mesma posição durante todas as etapas do teste.

As concentrações expeditas de VOC's na entrada do sistema e nos poços de extração e observação foram medidas com instrumentação portátil (Gastech e PID).

No dia 06/08/2014, a partir das 09:20 h, teve início o teste contínuo do sistema de DPE, que operou ininterruptamente até às 16:00h do dia 08/08/2014.

Os *level loggers* instalados anteriormente para o teste escalonado foram mantidos nos poços para evitar perturbações nas leituras realizadas pelos mesmos.

Nesta etapa do teste contínuo, além dos parâmetros monitorados no ensaio escalonado (vácuo nos poços, vácuo no tanque do sistema, volume de água bombeada, temperatura do compressor e da tubulação, temperatura dos gases extraídos), ao final de cada um dos três dias de teste foram coletadas amostras de gases em balões *Tedlar* para análise das concentrações de compostos orgânicos voláteis benzeno, tolueno, xilenos e etilbenzeno (BTXE), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e oxigênio (O₂). As amostras foram coletadas em válvula específica localizada na tubulação de entrada das colunas de tratamento de carvão ativado, pois neste trecho a pressão é positiva, facilitando a coleta nos balões *Tedlar*.

No final do dia 08/08/2014 foram coletadas amostras de água do tanque de vácuo para análise dos parâmetros BTEX, PAH (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), TPH (hidrocarbonetos totais de petróleo), metais totais e dissolvidos, visando à obtenção das concentrações destes compostos nos líquidos extraídos durante a realização do teste.

Os dados foram coletados a cada 15 min nas primeiras 02 h de ensaio e depois a cada 1h, durante o período diurno. No período noturno foram monitorados apenas os níveis d'água, pelos *level loggers*.

No dia 09/08/2014 às 11:00 h, os *level loggers* foram retirados dos poços. O objetivo da manutenção dos instrumentos nos poços após o termino do ensaio foi monitorar a recuperação do nível d'água no interior dos poços após o fim da extração, referente ao teste de recuperação.

No dia 11/08/2014 foi realizado um teste para comparação das vazões de extração de água subterrânea utilizando-se apenas bombeamento no PE (PM-15) durante o período da manhã (das 10:00h às 12:00h) e, posteriormente, no período da tarde (das 14:00h às 16:00h), utilizando o DPE (bombeamento mais aplicação de vácuo no cabeçote do poço de extração). O objetivo deste teste foi avaliar se as taxas de extração substancialmente maiores que as esperadas obtidas durante as etapas do ensaio piloto eram devidas a condições específicas do poço ou devido à aplicação do vácuo no cabeçote do mesmo. Os resultados obtidos serão apresentados no capítulo 4.

As **Foto 6** e **7** ilustram os equipamentos e poços utilizados no ensaio piloto de DPE na Área 1.



Foto 6- Sistema provisório utilizado no teste de DPE na área 1



Foto 7- Detalhe do poço de extração utilizado no ensaio DPE.

3.3 Materiais e Métodos Utilizados nos Ensaio Piloto de TPE, Bombeamento e DPE na Área 2

No período compreendido entre 09 e 18/12/2014 foram conduzidos testes de TPE, bombeamento e DPE em dois poços existentes na área 2.

Estes testes foram conduzidos pela autora com o objetivo de verificar se o comportamento observado nos ensaios da área 1, particularmente as alterações significativas das vazões de extração de água subterrânea com a aplicação de vácuo se confirmavam também para poços na área 2, ou se tratava de uma condição específica do poço de extração utilizado.

Conforme informado anteriormente, as áreas 1 e 2 estão dentro do mesmo local selecionado para os estudos e compreendem plumas de produto e de compostos de interesse ocasionadas pelo mesmo evento de vazamento.

Na área 2, foram aproveitadas as instalações do sistema TPE existente, alterando-se a posição do tubo extrator e acrescentadas bombas pneumáticas para o ensaio de DPE.

Os poços selecionados para o ensaio na área 2 foram os PM-28 e PE-01, ambos interligados ao sistema TPE em operação na área. Estes poços foram

selecionados por apresentarem fase livre durante as campanhas de monitoramento realizadas pela empresa que opera o sistema e por estarem em uma região afastada das atividades industriais, o que facilitou a implantação de um sistema provisório para a realização dos testes.

Durante o período de realização dos testes na área 2, os sistemas de remediação em operação (TPE na área 2 e bombeamento na área 1) foram paralisados, para não ocasionar interferências no teste.

Para o fornecimento do ar comprimido necessário para a operação das bombas pneumáticas foi utilizado o compressor de ar do sistema de bombeamento instalado na área 1. Mangueiras com especificação adequada para utilização em linhas com pressão de até 12 bar foram interligadas ao *header* de ar comprimido alimentado pelo compressor e conduzidas até um painel de controle equipado com temporizadores e válvulas solenóides para controlar a abertura e o fechamento das saídas de ar para os poços PE-01 e PM-28. Em ambas as linhas de ar comprimido, antes da entrada para as bombas pneumáticas, foram instalados: uma válvula esfera, um filtro regulador de ar comprimido provido de manômetro, um filtro coalescente e um filtro de carvão ativado para remoção de vapores de óleo eventualmente arrastados com o ar comprimido, garantido assim a qualidade do ar utilizado e permitindo os ajustes de vazões e pressões de ar necessários para a operação das bombas.

As duas bombas pneumáticas utilizadas tinham dimensões adequadas para poços de 2 polegadas de diâmetro e com pouca coluna d'água, ideais para os poços da área 2. As bombas foram construídas em aço inox 316 e possuem diâmetro de 3,8 cm, comprimento de apenas 66 cm e bocais de captação com 6,6cm, resultando em um comprimento total de 73 cm. O funcionamento destas bombas ocorre com a entrada intermitente de ar comprimido, durante um determinado período de tempo, controlado por um painel específico. A forma construtiva das bombas permite a operação das mesmas com coluna d'água suficiente para cobrir o bocal de entrada apenas, ou seja, não há necessidade de uma coluna de líquido muito grande acima do bocal de entrada, bastando que a mesma cubra este bocal completamente. Desta forma é possível utilizá-las em poços de duas polegadas de diâmetro e com colunas d'água inferiores a 1 m.

Os cabeçotes para os poços de DPE foram fabricados em nylon[®], com orifícios para entrada das linhas de ar comprimido, saída da linha de líquidos

bombeados, entrada dos sensores de nível e pressão utilizados no ensaio e orifício para encaixe do tubo extrator do sistema TPE, utilizado para gerar vácuo nos poços de DPE.

Para a coleta individual dos efluentes líquidos foram utilizadas caixas plásticas com tampa e volume de 54,3 L, possibilitando assim a medição dos volumes extraídos de cada poço individualmente. A quantificação dos volumes propriamente dita foi realizada com balde graduado e os efluentes foram transferidos manualmente para a caixa separadora água-óleo existente no sistema TPE implantado.

Os efluentes gasosos foram extraídos utilizando os equipamentos do sistema TPE implantado na área 2, sendo encaminhados diretamente para este sistema. Para a condução do teste, as válvulas das tubulações de extração de todos os poços interligados ao sistema foram fechadas, permanecendo abertas apenas as válvulas dos poços utilizados para o ensaio (PE-01 e PM-28). Desta forma, o sistema TPE foi utilizado para geração de vácuo exclusivamente nos cabeçotes destes dois poços. As vazões totais de gases extraídos foram estimadas a partir da curva de operação do compressor radial.

O monitoramento do nível d'água nos poços PE-01 e PM-28 foi feito com dois transmissores de nível, instalados 5 cm acima do fundo de cada poço, juntamente com as bombas pneumáticas.

O monitoramento de vácuo nos dois poços selecionados para o ensaio foi feita com transmissor de pressão no PM-28 e com manômetro diferencial digital no PE-01.

Os transmissores de nível e pressão foram interligados ao sistema de aquisição, equipado com "*Fieldlogger*" com oito canais de entrada. A versão do software do "*Fieldlogger*" utilizada foi a 1.5.1.

O **Quadro 10** apresenta o resumo dos equipamentos e instrumentos utilizados durante o teste na área 2.

Os testes na área 2 foram conduzidos em três etapas subsequentes: TPE, bombeamento e DPE. Os detalhes dos procedimentos adotados em cada etapa do teste serão apresentados nos capítulos a seguir.

As **Fotos 8 a 13** ilustram os ensaios de campo realizados na área 2.

Quadro 10 - Equipamentos, instrumentos e materiais utilizados nos ensaios - área 2.

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA
Bomba de vácuo	Compressor Radial (Side Channel) Rietschle Thomas, motor 13,2 kW, 420 m ³ /h
Bomba helicoidal de transferência	Modelo Nemo NM031BY, Netzsch, motor 1,5 kW
Tanques metálicos.	Fabricados com chapas de aço de 3 mm, pintados pelo processo eletrostático
Painel Elétrico de Controle do Sistema TPE	Proteções contra sobre-corrente e falta de fase, inversor de frequência, CLP, IHM
Caixa separadora de água e óleo	Tipo placas coalescentes, capacidade 2.000 l/h.
Filtro de carvão ativado para fase líquida	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Filtro de carvão ativado para fase gasosa	Montado com plástico reforçado com fibra de vidro com capacidade nominal 200 l.
Manômetros analógicos	Tipo Bourdon, escala 0-12 kgf/cm ²
Vacuômetros analógicos	Tipo Bourdon, escala -1 a 0 kgf/cm ²
Hidrômetro analógico	Soppel, modelo Aquarius, vazão nominal 1,5 m ³ /h, vazão mínima 30 l/h
Chaves de nível baixo, alto e alto-alto	Tipo bois de inserção lateral, em polipropileno
Bomba pneumática (2 unidades)	Construída em aço inox 316, diâmetro 3,8 cm, comprimento 66 cm, bocal de captação 6,6cm
Painel Elétrico de Controle de ar Comprimido	Duas entradas e 4 saídas, temporizador, válvulas reguladoras de pressão
Conjunto Filtro regulador, coalescente e carvão ativado para ar comprimido (2 unidades)	Marca Norgren, manômetros de 0 a 10 bar, 0,05 micras.
Válvulas esfera	1/2 polegada, em latão.
Compressor de ar tipo parafuso	Atlas GX 11, 78,8 m ³ /h, 7 bar
Mangueiras de ar comprimido	Capacidade para 10 bar de pressão, diâmetro 3/8 de polegada.
Mangueiras de extração de água subterrânea	Mangueiras descartáveis em polietileno, diâmetro 1/8 de polegada
Caixas para coleta de efluentes líquidos	Caixas em polietileno, capacidade 54,3 litros.
Balde graduado	Capacidade 30 litros
Bateria	Bateria de motocicleta, 12 V, 6,5 mA, para alimentação do painel de controle de ar comprimido.
Sistema de aquisição de dados SAD-TP	Equipado com 2 Fildlogger Novus, 8 canais de entrada cada
Transmissor de nível	Modelo WTPH-4030, faixa de 0 a 1 bar (10 m.c.a), sinal de saída 4 a 20 mA, alimentação 10 a 30 VAC, número de série 97879
Transmissor de nível	Modelo Sonda 01, faixa de 0 a 10 m.c.a, sinal de saída 4 a 20 mA, alimentação 10 a 30 VAC, número de série 09/2013
Transmissor de pressão	Marca Wärme, identificação: S2842/11 VAC 19M, modelo: WTP-4010, faixa 0 a -1bar, no. De série: 2842/11 alimentação 10 a 30 Vcc.
Laptop	Para instalação do software Fildlogger 1.5.1 e acompanhamento visual do monitoramento de níveis de água e vácuo em tela, durante o ensaio.
Detector de VOC's	Detector de Gases Phocheck Tiger PID para VOC, faixa de 1 ppb a 20.000 ppm
Interface	Medidor de nível de água de óleo, marca Solinst.



Foto 8- Caixas utilizadas para coleta de efluentes dos poços



Foto 9- Bomba pneumática utilizada no ensaio na área 2.



Foto 10- Sistema de aquisição de dados utilizado nos testes



Foto 11- Painel com filtro regulador de ar comprimido utilizado no ensaio



Foto 12- Poço de extração PM-28, com o cabeçote de DPE e transmissores de pressão e nível instalados.



Foto 13- PID utilizado para a medição das concentrações de VOC's nos vapores extraídos.

3.3.1 Procedimentos do ensaio de TPE na área 2

Inicialmente, na área 2, foi feito um teste de TPE utilizando todos os equipamentos do sistema que se encontrava implantado, porém restringindo a operação apenas aos poços PE-01 e PM-28.

Nesta etapa, o objetivo foi avaliar as vazões de extração de líquidos possíveis de se obter para os dois poços, com extração simultânea das fases líquida e gasosa pelo mesmo tubo extrator.

Para possibilitar a comparação das vazões de extração com as obtidas nas etapas subsequentes do ensaio, inicialmente o tanque do sistema foi drenado e as válvulas dos dois poços selecionados foram abertas alternadamente. No dia 9/12/2014 foi realizado o teste no PE-01, posicionando o tubo de extração a 5 cm abaixo do nível d'água no poço PE-01. Desta forma, a vazão de líquidos armazenada no tanque durante a duração desta etapa foi proveniente apenas do PE-01.

No dia seguinte (10/12/2014) o teste foi efetuado da mesma forma, porém com o tubo de extração 5 cm abaixo do nível d'água no PM-28, de forma que a vazão de líquidos obtida foi proveniente apenas do PM-28.

O nível d'água e de produto nos poços foi medido com “*interface*”, no início e no final do teste.

O vácuo no cabeçote dos poços PE-01 e PM-28 foi medido de 15 em 15 min durante as 4 h de duração do teste, com manômetro diferencial digital portátil.

O vácuo no tanque de vácuo localizado no interior do container do sistema TPE foi monitorado em intervalos de 1h, utilizando-se o vacuômetro dedicado instalado no referido tanque. Através do inversor de frequência existente no painel de controle, o ponto de operação do compressor de canal lateral foi ajustado para gerar vácuo de 200 mmHg no tanque de vácuo. Ressalta-se que este é o mesmo valor de vácuo utilizado na operação normal do sistema TPE implantado na área.

Os volumes de líquidos bombeados foram medidos utilizando-se o hidrômetro instalado no sistema.

O tempo de operação foi medido com cronômetro digital e as vazões de extração foram estimadas a partir das medidas de volume e tempo de operação monitorados durante o ensaio.

3.3.2 Procedimentos do ensaio de bombeamento na área 2

Nos dias 11, 12 e 15/12/2014 foram conduzidos testes de bombeamento nos dois poços selecionados na área 2 (PM-28 e PE-01). Foram utilizadas duas bombas pneumáticas de deslocamento positivo de 3,8 cm de diâmetro e 73 cm de comprimento total, adequadas para as características construtivas dos poços e para as condições do nível d'água. As bombas foram colocadas 5 cm acima do fundo de cada poço, pois os mesmos apresentavam pouca coluna d'água devido ao período de estiagem.

Nos dois poços, as pressões de ar comprimido necessárias ao funcionamento das bombas foram de 1,9 kgf/cm² e 2,0 kgf/cm², nos poços PM-28 e PE-01, respectivamente.

O teste no dia 11/12/2014 iniciou às 12:20h e terminou às 16:20h. No dia 12/12/2014 o teste de bombeamento teve duração de 4h consecutivas e no dia 15/12/2014 o teste teve duração de 2h.

Os efluentes líquidos bombeados dos poços foram encaminhados para duas caixas plásticas transparentes, para possibilitar a medição dos volumes de água e de produto extraídos de cada poço, individualmente.

A medição dos volumes foi feita com auxílio de balde graduado e os efluentes foram transferidos manualmente para a caixa separadora água-óleo do sistema TPE instalado na área.

O tempo de operação foi medido com cronômetro e as vazões de bombeamento foram calculadas com base nos volumes extraídos e tempo de operação.

3.3.3 Procedimentos do ensaio de DPE na área 2

Nos dias 17 e 18/12/2014 foram conduzidos testes de DPE nos poços PM-28 e PE-01 da área 2. Para isto foram instalados dois cabeçotes especialmente confeccionados para o ensaio e o sistema provisório foi montado utilizando-se os equipamentos do teste de bombeamento e o sistema de TPE instalado na área para gerar vácuo nos cabeçotes dos dois poços selecionados.

Em cada poço foram instalados transmissores de nível e de pressão, para monitorar continuamente o nível d'água e o vácuo aplicado em cada poço. Os

transmissores foram interligados a um sistema de aquisição de dados conectado a um *laptop*, permitindo o monitoramento dos parâmetros na tela do computador durante o ensaio.

As bombas foram mantidas exatamente nas mesmas posições utilizadas no teste de bombeamento, ou seja, 5 cm acima do fundo de cada poço e operadas com a mesma pressão de ar comprimido ($1,9 \text{ kgf/cm}^2$ no PM-28 e $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ no PE-01).

O sistema TPE foi ajustado para gerar vácuo de 200 mmHg no tanque de vácuo. As válvulas que interligavam outros poços ao sistema foram fechadas, de forma que todo o vácuo gerado foi direcionado apenas aos cabeçotes dos poços PM-28 e PE-01. Nestes poços, o tubo de extração foi posicionado na zona não saturada, próximo aos cabeçotes, de forma a configurar operação padrão de DPE.

Os efluentes líquidos bombeados de cada poço foram encaminhados para duas caixas plásticas transparentes, para possibilitar a medição dos volumes de água e de produto extraídos de cada poço, individualmente.

A medição dos volumes foi feita com auxílio de balde graduado e os efluentes foram transferidos manualmente para a caixa separadora água-óleo do sistema TPE instalado na área.

O tempo de operação foi medido com cronômetro e as vazões de bombeamento foram calculadas com base nos volumes extraídos e tempo de operação.

Os efluentes gasosos foram encaminhados ao tanque de vácuo do sistema e posteriormente a colunas de carvão ativado para adsorção dos hidrocarbonetos de petróleo antes do lançamento para a atmosfera.

Na tubulação de entrada das colunas de carvão ativado, foi coletada uma amostra de gás em um saco de polipropileno, através de uma válvula de amostragem existente. O bocal de entrada do medidor portátil (PID) foi inserido em um orifício feito no saco plástico e as concentrações de VOC's foram medidas.

A vazão de gases extraídos dos poços PM-28 e PE-01 foi estimada a partir da curva característica de operação do compressor radial utilizado no sistema.

3.4 Estimativa Teórica da Quantidade de Produto Recuperável

Para estimativa teórica da quantidade de produto recuperável na área em estudo foi utilizado o programa **LDRM2 Versão 2.0** (CHARBENEAU,2014). Os resultados teóricos foram comparados com os resultados reais obtidos durante a operação dos sistemas de remediação implantados na área em estudo.

Os parâmetros físicos do solo utilizados no modelo foram obtidos em literatura técnica especializada (API, 2007 e 2014), com exceção da porosidade efetiva e condutividade hidráulica, para os quais haviam valores específicos para a área em estudo. Para a obtenção dos dados de literatura foi considerado como tipo predominante na área o solo silto-arenoso.

Para a permeabilidade relativa foi utilizado o modelo de Mualen, para 1 camada.

O **Quadro 11** apresenta os dados de entrada utilizados nas simulações.

Para representar a área 1 foi selecionado o PM-14, relativamente próximo ao PM-15 utilizado no ensaio piloto de DPE, pois aquele poço apresentou espessuras significativas e frequentes de fase livre no período compreendido entre 2011 e 2014. Para representar a área 2 foi escolhido o PE-21, por apresentar histórico constante de ocorrência de fase livre durante o mesmo período e por ter sido um dos poços utilizados para o teste de DPE.

As espessuras de produto consideradas no modelamento foram aquelas detectadas no monitoramento realizado em junho de 2014 em toda área (abrangendo portanto as áreas 1 e 2). Não foram usadas as maiores espessuras constatadas entre 2011 e 2014, pois neste período ocorreu a operação de sistemas de bombeamento na área 1 e TPE na área 2, de forma que a utilização das maiores espessuras naquele período não corresponderia ao cenário atual da área (dezembro/2014).

Para os raios de influência e abrangência foram utilizados os resultados obtidos no ensaio piloto de DPE na área 1.

Para a calibração do modelo foram utilizados os dados de vazão média de extração e espessura média de produto obtidas no período inicial (2003 a 2005) de operação do primeiro sistema de bombeamento implantado na área. Foram testados vários cenários até que se obtivessem resultados teóricos de volumes de produto extraído próximos aos resultados reais obtidos no sistema de bombeamento. Os

parâmetros físicos deste cenário foram então utilizados em simulações considerando as espessuras de fase livre identificadas em junho de 2014 (cenário mais atual), para a previsão teórica dos volumes de fase livre remanescentes na área e passíveis de remoção.

O programa LDRM2 não permite a simulação de DPE, mas permite a simulação de “extração aumentada por vácuo”. Para a previsão teórica do volume de produto recuperável foi utilizada esta opção do programa, com os dados de vazão de extração e vácuo obtidos nos ensaios piloto de DPE nas áreas 1 e 2.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados da compilação de dados de operação de sistemas de remediação de 2003 a 2014

Desde a ocorrência do vazamento de diesel em 2003 até o momento, quatro empresas de consultoria operaram diferentes sistemas de remediação na área em estudo, com o objetivo principal de remoção da fase livre. Em 2003 a área impactada por fase livre foi estimada em 12.500m² e o volume de produto no aquífero em 300m³.

O sistema de remediação, instalado pela primeira empresa que atuou na área, operou de fevereiro de 2003 a fevereiro de 2005 e era composto por quatro bombas pneumáticas tipo “auto pump”, operando em rodízio nos poços que apresentavam fase livre. Em 2004, dois skimmers foram acrescentados ao sistema, operando em rodízio também.

De outubro de 2005 a maio de 2008, a remediação da área foi assumida pela segunda empresa de remediação, que implantou cinco sistemas TPE com um total de 26 poços de extração.

No período compreendido entre novembro de 2008 a agosto de 2010, a remediação da área foi assumida pela terceira empresa de remediação, que implantou um sistema de bombeamento composto por quinze bombas, operadas em sistema de rodízio em alguns poços e um sistema TPE composto por oito poços de extração.

De junho de 2011 a junho de 2014 a remediação foi assumida pela quarta empresa de remediação, que implantou um sistema de bombeamento composto por dez bombas (área 1) e um sistema TPE composto por oito poços de extração (área 2). Durante este período (36 meses de operação), a operação foi intermitente (8h/dia, de segunda a sexta-feira).

O Quadro 12 apresenta o resumo dos volumes de água e de produto extraídos pelas quatro empresas, com diferentes sistemas de remediação e as respectivas taxas de extração água/produto.

Quadro 12- Taxas de extração de produto ao longo da operação de diferentes sistemas de remediação implantados na área de interesse.

Empresa Responsável pela Remediação	Período de Operação	Tipos de Sistemas	Número de Poços de Bombeamento / Extração	Volume Extraído de Água Subt. (m ³)	Volume de Produto Extraído (m ³)	Taxa de Extração Água/Produto
Empresa 1	fevereiro/2003 a fevereiro/2005	Bombeamento	4	1.816,50	51,4	35,34 : 1
	fevereiro/2004 a fevereiro/2005	Skimmer	2	-	2,93	-
Empresa 2	outubro/2005 a maio/2008	TPE	26	75.600,00 ^(*)	71,8	1.053 : 1
Empresa 3	novembro/2008 a agosto/2010	Bombeamento	15	2.439,76	0,498	4.899 : 1
		TPE	8			
Empresa 4	junho/2011 a junho/2014	Bombeamento	10	1366,00 ^(**)	0,0036	379.444 : 1
		TPE	8	685,88 ^(**)	0,506	1.355,5 : 1

(*) Volume estimado pela autora, com base na informação de vazão média de extração e tempo de operação.

(**) Operação intermitente, 8h/dia.

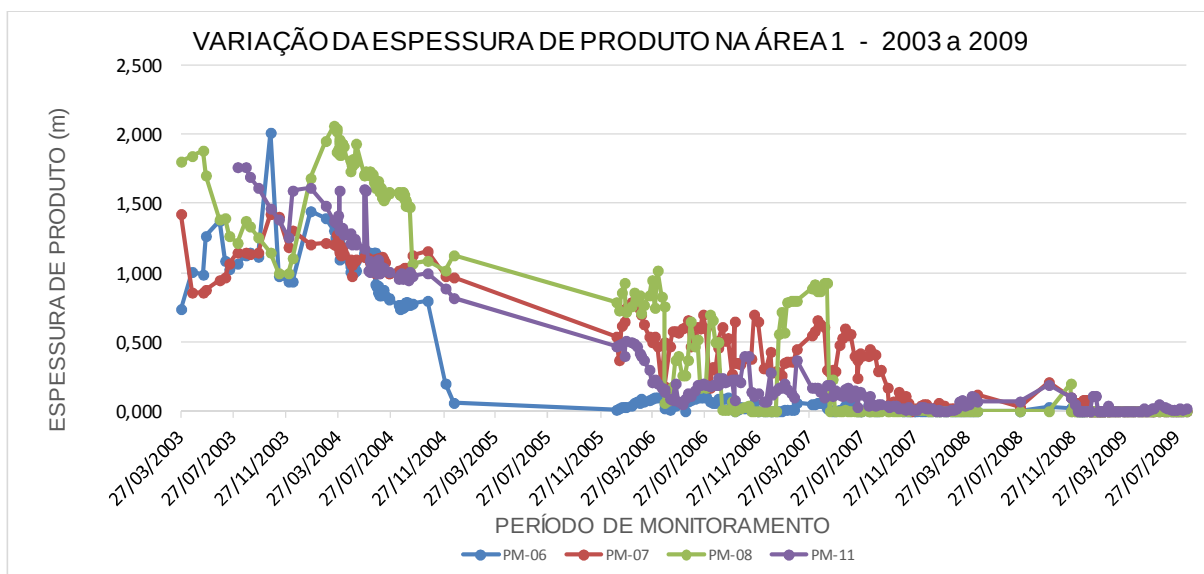
Ressalta-se que as taxas de extração de produto apresentadas no Quadro 12 foram calculadas através de valores médios de volumes extraídos reportados em relatórios de operação dos sistemas por diferentes empresas de consultoria, ou por estimativas baseadas em médias de vazão durante os períodos de operação. No entanto, ocorreram diversas paradas para manutenção dos sistemas e a partir de 2011 os sistemas passaram a operar de forma intermitente, devido à questões contratuais e principalmente pelo aumento da população local e maior proximidade de residências da área, o que restringiu a utilização de motores durante o período noturno para evitar incômodos aos moradores locais.

No período em que a remediação foi conduzida pela empresa 3, os relatórios de operação não indicaram a quantidade de produto extraído por bombeamento e por TPE individualmente, limitando-se à apresentação dos volumes totais extraídos pelos dois sistemas simultaneamente, impossibilitando a comparação entre os mesmos.

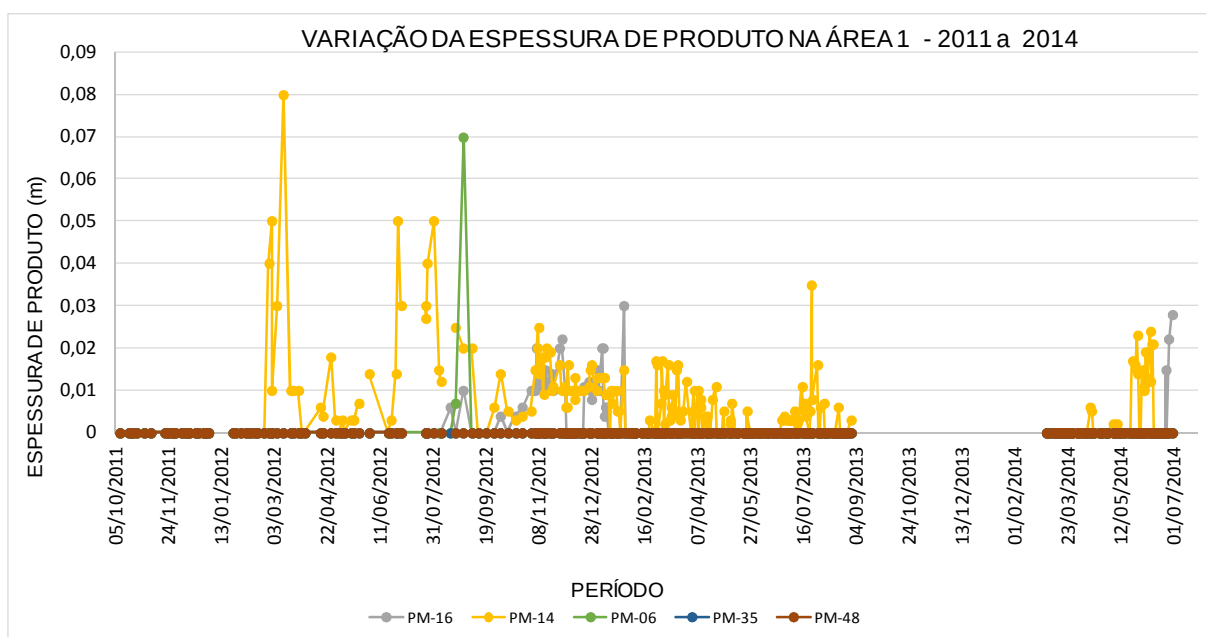
As empresas de remediação não efetuaram medição de vazões para a fase gasosa para os sistemas TPE, impossibilitando a análise da massa total de contaminantes removidos ao longo de todo o período de remediação.

Os Gráficos 1 e 2 apresentam a evolução das espessuras de fase livre em alguns poços durante a operação dos sistemas de remediação de 2003 a 2014, para as áreas 1 e 2, respectivamente. Foram selecionados apenas os poços de monitoramento, bombeamento ou extração que apresentaram espessuras de fase livre no início da operação maiores que 0,5m e que se mantiveram instalados durante estes 11 anos de operação, uma vez que muitos poços foram construídos posteriormente ao início da remediação e alguns deles, com o passar do tempo, foram destruídos ou inutilizados.

Os Gráficos 3 e 4 apresentam a variação do nível d'água em poços selecionados, no período de 2003 a 2014.

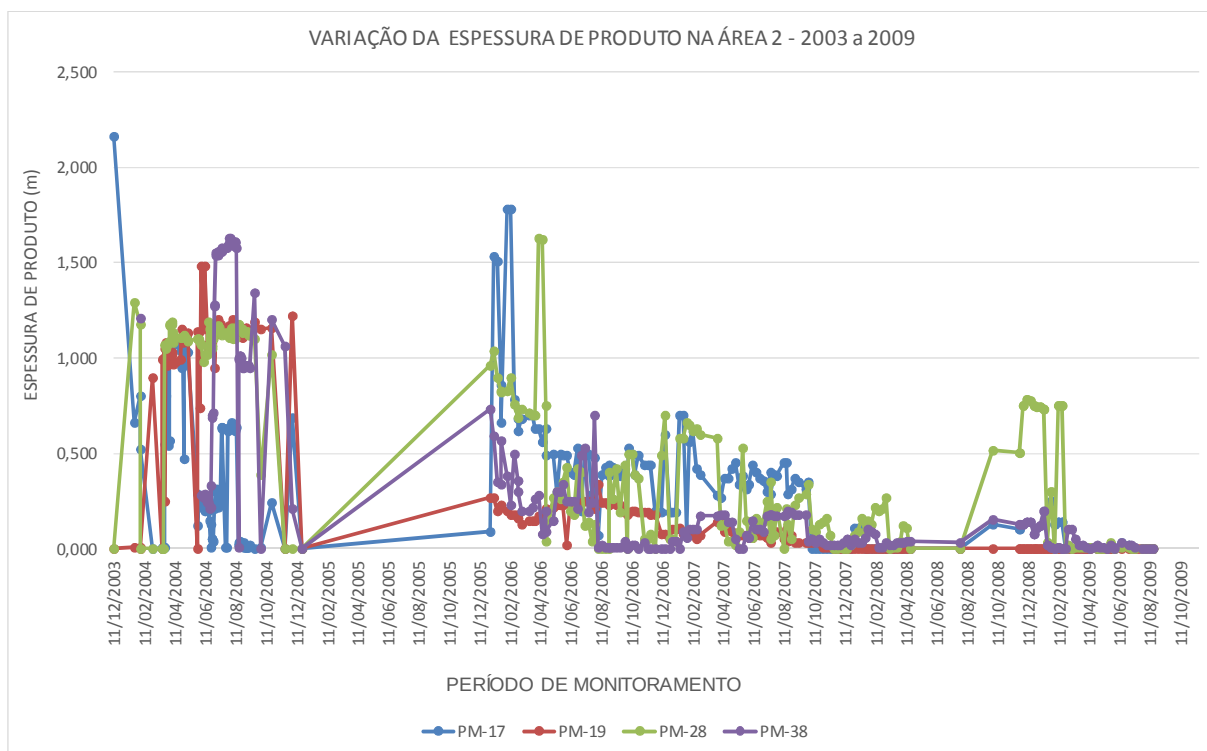


(a)

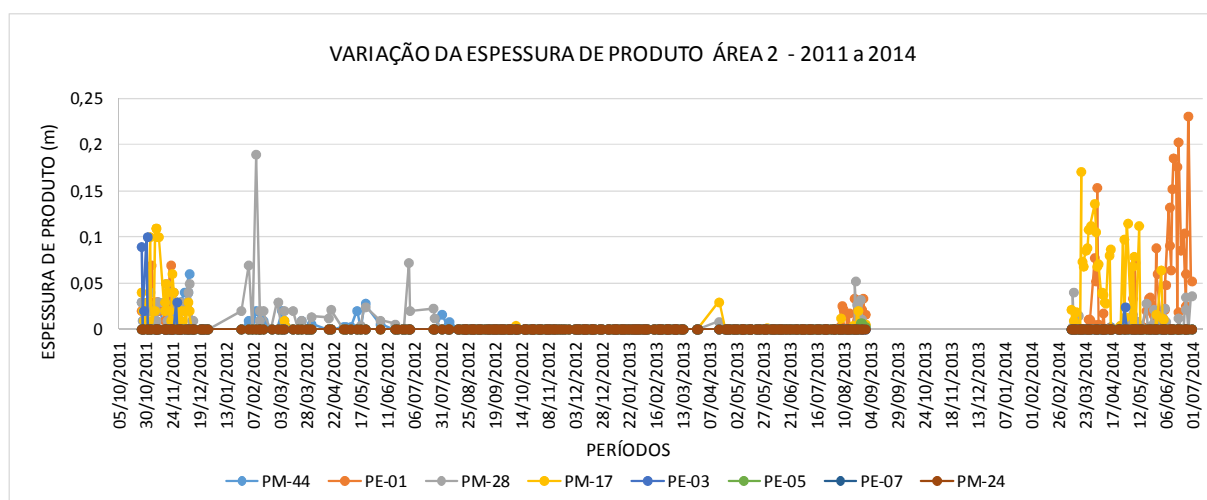


(b)

Gráfico 1 – Variação da espessura de fase livre nos poços de monitoramento da área 1 nos períodos de (a) 2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014.

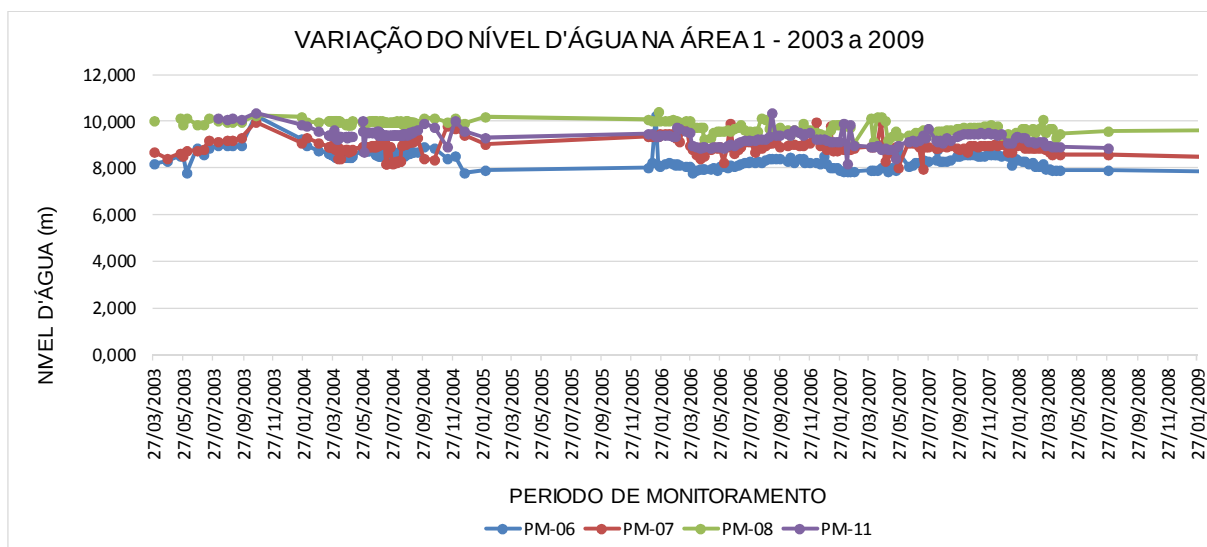


(a)

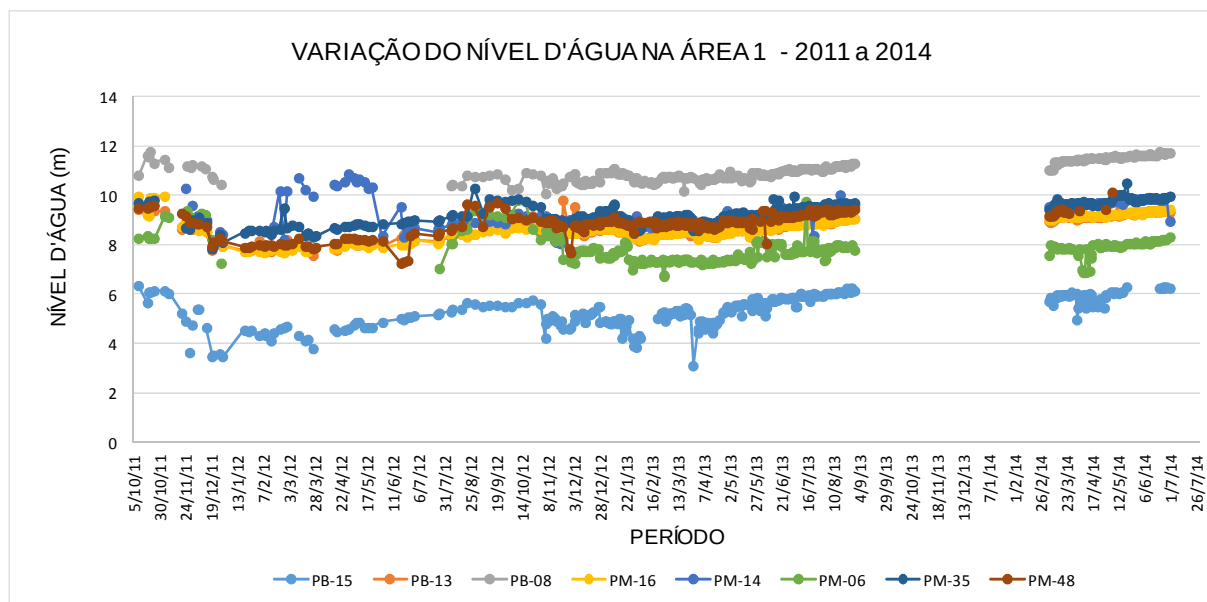


(b)

Gráfico 2- Variação da espessura de fase livre nos poços de monitoramento da área 2 nos períodos de (a)2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014

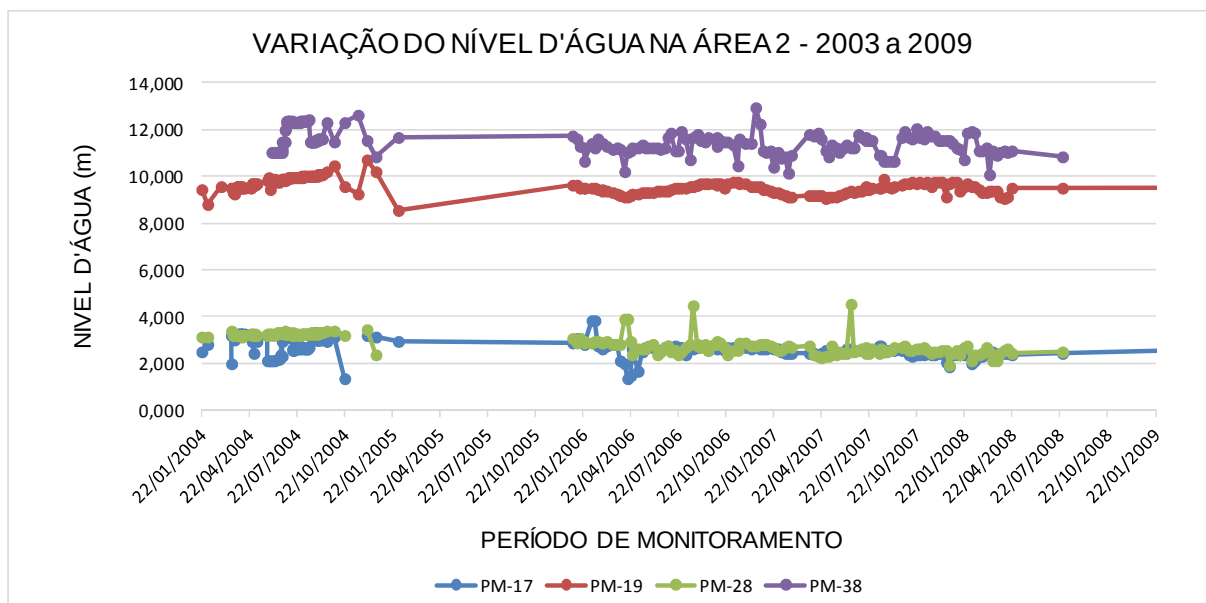


(a)

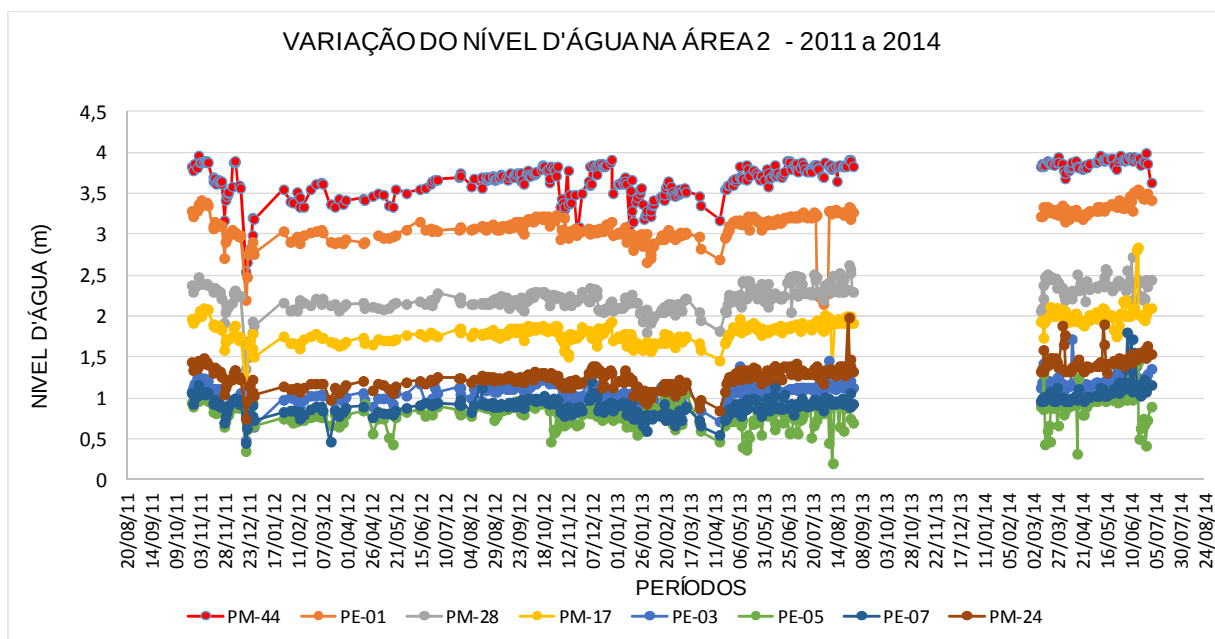


(b)

Gráfico 3 - Variação do nível d'água nos poços de monitoramento da área 1 nos períodos de (a) 2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014.



(a)



(b)

Gráfico 4- Variação do nível d'água nos poços de monitoramento da área 2 nos períodos de (a) 2003 a 2009 e (b) 2011 a 2014.

Ressalta-se que os nos Gráficos 1 a 4 há alguns períodos para os quais não foram apresentados dados. Estes períodos correspondem a períodos de paralização dos sistemas para manutenção ou a períodos correspondentes á troca de empresa de remediação responsável pela operação dos sistemas.

Os Quadros 13 e 14 apresentam os volumes de água e produto extraídos pelo sistema de bombeamento na área 1 e TPE na área 2, bem como as taxas de extração água/óleo mensais e total para os dois sistemas, no período de outubro de 2011 a junho de 2014. Este período foi selecionado porque a partir de outubro de 2011 a composição dos sistemas em operação era semelhante a dos sistemas utilizados nos testes pilotos realizados nas duas áreas, possibilitando assim a comparação dos dados obtidos nas duas etapas do trabalho.

Os Quadros 15 e 16 apresentam as concentrações nos efluentes líquidos do sistema de bombeamento e TPE, respectivamente, para o período compreendido entre outubro de 2011 a junho de 2014. As amostras foram coletadas mensalmente nos dois sistemas e os resultados apresentados representam as concentrações em uma amostra pontual.

Durante a operação do sistema TPE não foram realizadas análises químicas no efluente gasoso, bem como não foram monitoradas as vazões dos mesmos. Estes dados não foram monitorados pois os sistemas em questão operavam de forma provisória, por questões inerentes ao contrato entre o proprietário da área e as empresas de consultoria.

Quadro 13. Volume de água e produto e taxas de extração água/óleo no sistema de bombeamento – área 1.

Período	Volume de água (m3)	Volume de óleo (L)	Taxa de extração água / óleo
junho a setembro /2011	110	0	-
outubro / 2011	13	0	-
novembro / 2011	50	0	-
dezembro / 2011	21	0	-
janeiro / 2012	146	0	-
fevereiro / 2012	94	0	-
março / 2012	133	0	-
abril / 2012	131	0	-
maio / 2012	143	0	-
junho / 2012	69	0	-
julho/2012	15	0	-
agosto/2012	166	1,2	138.333 : 1
setembro/ 2012	131	0,1	-
outubro / 2012	48	0,3	160.000 : 1
novembro / 2012	20	0	-
dezembro / 2012	13,58	0,25	54.320 : 1
janeiro / 2013	1,32	0,1	13.200 : 1
fevereiro / 2013	6,76	0	-
março / 2013	3,83	0	-
abril / 2013	11,47	0	-
maio / 2013	3,09	0	-
junho / 2013	6,91	3	2.303 : 1
julho/2013	2,9	0	-
agosto/2013	3,06	0,55	5.564 : 1
setembro/ 2013	-	-	-
outubro / 2013	-	-	-
novembro / 2013	-	-	-
dezembro / 2013	-	-	-
janeiro / 2014	-	-	-
fevereiro / 2014	-	-	-
março / 2014	0,43	0	-
abril / 2014	0,15	0	-
maio / 2014	0,39	0	-
junho / 2014	0	0	-
TOTAL	1343,89	5,5	244.344 : 1

Quadro 14- Volumes de água e óleo e taxas de extração obtidos no sistema TPE – área 2

Período	Volume de água (m3)	Volume de óleo (L)	Taxa de extração água / óleo
junho a setembro /2011	58,1	130	447 : 1
outubro / 2011	15,27	22	694 : 1
novembro / 2011	21,18	43	493 : 1
dezembro / 2011	34,09	49	696 : 1
janeiro / 2012	35,79	120	298 : 1
fevereiro / 2012	49,41	80	618 : 1
março / 2012	18,23	25	729 : 1
abril / 2012	0	0	-
maio / 2012	0	0	-
junho / 2012	0	0	-
julho/2012	18,66	0	-
agosto/2012	35,14	0,65	54.062 : 1
setembro/ 2012	34,55	0	-
outubro / 2012	51,06	3	17.020 : 1
novembro / 2012	2,79	2,5	1.116 : 1
dezembro / 2012	21,65	1,2	18.042 : 1
janeiro / 2013	32,18	0,25	128.720 : 1
fevereiro / 2013	34,98	0,15	233.200 : 1
março / 2013	15,16	0,5	30.320 : 1
abril / 2013	9,38	0,25	37.520 : 1
maio / 2013	23,29	0	-
junho / 2013	16,77	0,6	27.950 : 1
julho/2013	16,72	2,25	7.431 : 1
agosto/2013	11,01	7	1.573 : 1
setembro/ 2013	-	-	-
outubro / 2013	-	-	-
novembro / 2013	-	-	-
dezembro / 2013	-	-	-
janeiro / 2014	-	-	-
fevereiro / 2014	-	-	-
março / 2014	11,74	0	-
abril / 2014	10,06	0	-
maio / 2014	6,43	1,7	3.782 : 1
junho / 2014	17,46	1,9	9.189 : 1
TOTAL	601,1	490,95	1.224 : 1

Quadro 15- Concentrações dos compostos de interesse no efluente do sistema de bombeamento – área 1.

Data	Composto	Unidade	Limite de Quantificação	Concentração no efluente Líquido	Data	Composto	Unidade	Limite de Quantificação	Concentração no efluente Líquido
24/08/2011	Benzeno	µg/L	< 3	18,00	Novembro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	195,90
	Tolueno	µg/L	< 3	nd		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	nd		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	nd		Xilenos	µg/L	< 3	779,80
	TPH total	µg/L	< 300	nd		TPH total	µg/L	< 300	132,31
Outubro/2011	Benzeno	µg/L	< 3	18,00	Dezembro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	17,04
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	97,73
Novembro/2011	Benzeno	µg/L	< 3	27,30	Janeiro/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	392,00
Dezembro/2011	Benzeno	µg/L	< 3	22,70	Fevereiro/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	667,00
Janeiro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	37,40	Março/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	7,58		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	431,00
Fevereiro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	13,90	Abril/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	256,00
Março/2012	Benzeno	µg/L	< 3	60,90	Maio/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	10,10		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	5,74		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	24,80		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	109,70		TPH total	µg/L	< 300	2.928,00
Abril/2012	Benzeno	µg/L	< 3	95,90	Junho/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	14,50		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	10,30		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	49,40		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	685,70		TPH total	µg/L	< 300	157,00
Maio/2012	Benzeno	µg/L	< 3	99,20	Julho/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	15,00		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	12,60		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	57,70		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	15,60		TPH total	µg/L	< 300	202,00
Junho/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Agosto/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	778,00		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	14.445,00		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	3.886,00
Julho/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Março/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	2,66		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	15,88		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	21,07		TPH total	µg/L	< 300	2.916,00
Agosto/2012	Benzeno	µg/L	< 3	59,47	Abril/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	8,93		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	3,93		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	57,56		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	162,41		TPH total	µg/L	< 300	187,00
Setembro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	3,67	Maio/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	3,89		TPH total	µg/L	< 300	< 300
Outubro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	42,13	Junho/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	55,50		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	65,73		TPH total	µg/L	< 300	< 3

Quadro 16- Concentrações dos compostos de interesse no efluente do sistema TPE – área 2.

Data	Composto	Unidade	Limite de Quantificação	Concentração no efluente Líquido	Data	Composto	Unidade	Limite de Quantificação	Concentração no efluente Líquido
24/08/2011	Benzeno	µg/L	< 3	19,10	Novembro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	3,32
	Tolueno	µg/L	< 3	nd		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	17,00		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	9,37		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	225.328,00		TPH total	µg/L	< 300	682,34
Outubro/2011	Benzeno	µg/L	< 3	19,10	Dezembro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	17,00		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	9,37		Xilenos	µg/L	< 3	4,38
	TPH total	µg/L	< 300	225.327,40		TPH total	µg/L	< 300	< 300
Novembro/2011	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Janeiro/2013	Benzeno	µg/L	< 3	86,00
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	126,00
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	10,00
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	102,00
	TPH total	µg/L	< 300	90.775,70		TPH total	µg/L	< 300	2.811,00
Dezembro/2011	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Fevereiro/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	6,43		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	279.652,10		TPH total	µg/L	< 300	26.077,00
Janeiro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Março/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	15.644,80		TPH total	µg/L	< 300	355.074,00
Fevereiro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Abril/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	10.758,50		TPH total	µg/L	< 300	60.033,00
Março/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Maio/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	174,30		TPH total	µg/L	< 300	84,00
Abril/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Junho/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	8,20
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	4,70
	TPH total	µg/L	< 300	28.270,40		TPH total	µg/L	< 300	94.858,00
Maio/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Julho/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	3,31		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	14.817,60		TPH total	µg/L	< 300	11.904,00
Junho/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Agosto/2013	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	24,00
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	4,80
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	5,40
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	886.905,00
Julho/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Março/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	< 300		TPH total	µg/L	< 300	160.618,00
Agosto/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Abril/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	55,66		TPH total	µg/L	< 300	187,00
Setembro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	3,67	Maio/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	1,60
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	373,68		TPH total	µg/L	< 300	22.059,12
Outubro/2012	Benzeno	µg/L	< 3	< 3	Junho/2014	Benzeno	µg/L	< 3	< 3
	Tolueno	µg/L	< 3	< 3		Tolueno	µg/L	< 3	< 3
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3		Etilbenzeno	µg/L	< 3	< 3
	Xilenos	µg/L	< 3	< 3		Xilenos	µg/L	< 3	< 3
	TPH total	µg/L	< 300	511,71		TPH total	µg/L	< 300	36.721,20

Como explicado anteriormente, as amostras de efluentes líquidos foram coletadas mensalmente em cada sistema, para representar a qualidade da água subterrânea extraída durante o período de um mês. Desta forma, para avaliar a massa dos compostos de interesse (BTXE e TPH) removidos em fase dissolvida, foi feita uma estimativa, admitindo-se que as concentrações obtidas na amostra mensal são representativas para todo o volume de efluentes gerados durante o mês. Os resultados obtidos pela multiplicação das concentrações dos compostos de interesse pelo volume bombeado mensalmente são apresentados no Quadro 17.

Quadro 17- Massa dos compostos de Interesse Extraídos em Fase Dissolvida pelos Sistemas de Bombeamento (Área 1) e TPE (Área 2).

Data	Volume de Líquido Extraído por Bombeamento (m³)	Massa de Contaminantes Extraída por Bombeamento (g)	Volume de Líquido Extraído por TPE (m³)	Massa de Contaminantes Extraída por TPE (g)
Outubro/2011	13	0,23	15,27	3.441,44
Novembro/2011	50	1,37	21,18	1.922,63
Dezembro/2011	21	0,48	34,09	9.533,56
Janeiro/2012	146	6,57	35,79	559,93
Fevereiro/2012	94	1,31	49,41	531,58
Março/2012	133	28,09	18,23	3,18
Abril/2012	131	112,11	0	0,00
Mai/2012	143	28,61	0	0,00
Junho/2012	69	1.050,39	0	0,00
Julho/2012	15	0,59	18,66	0,00
Agosto/2012	166	48,52	35,14	1,96
Setembro/2012	131	0,99	34,55	13,04
Outubro/2012	48	7,84	51,06	26,13
Novembro/2012	20	22,16	2,79	1,91
Dezembro/2012	13,58	1,56	21,65	0,09
Janeiro/2013	1,32	0,52	32,18	100,88
Fevereiro/2013	6,76	4,51	34,98	912,17
Março/2013	3,83	1,65	15,16	5.382,92
Abril/2013	11,47	2,94	9,38	563,11
Mai/2013	3,09	9,05	23,29	1,96
Junho/2013	6,91	1,08	16,77	1.590,98
Julho/2013	2,9	0,59	16,72	199,03
Agosto/2013	3,06	11,89	11,01	9.765,20
Março/2014	0,43	1,25	11,74	1.885,66
Abril/2014	0,15	0,03	10,06	1,88
Mai/2014	0,39	0,00	6,43	141,85
Junho/2014	0	0,00	17,46	641,15
TOTAL	1.233,89	1.344,33	543	37.222,25

A comparação de volumes de água, massa dos compostos de interesse e volumes produto extraídos pelos dois sistemas em operação, de 2011 a 2014, podem ser observados nos Gráficos 5 a 7, respectivamente.

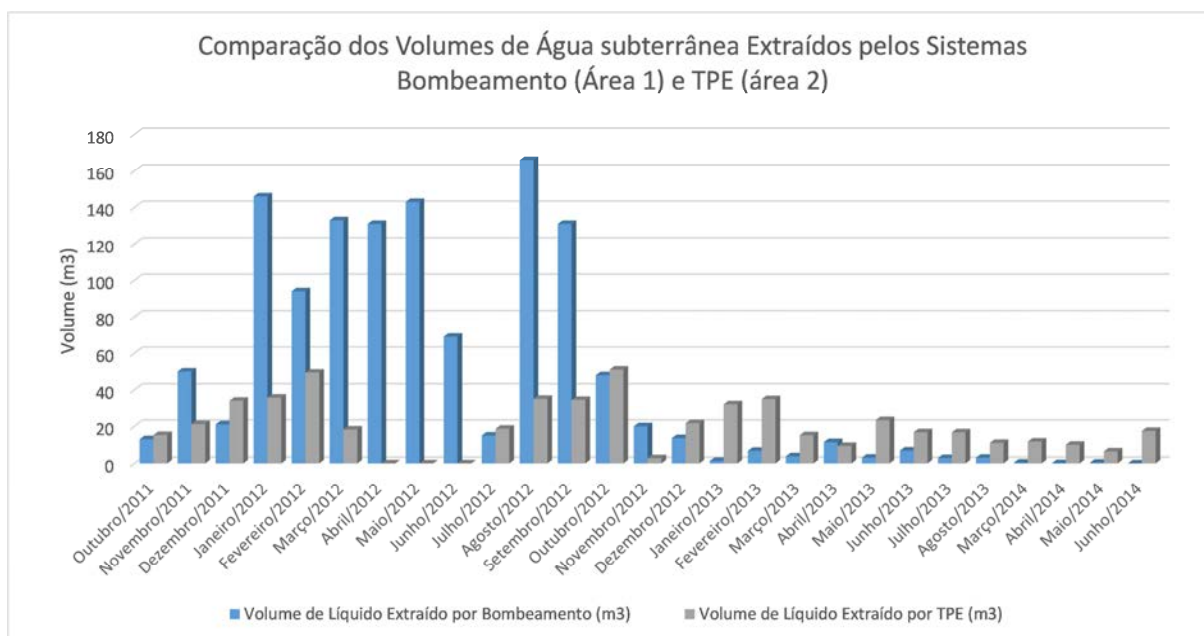


Gráfico 5- Comparação dos volumes de água subterrânea extraídos pelos sistemas de bombeamento (área 1) e TPE (área 2).

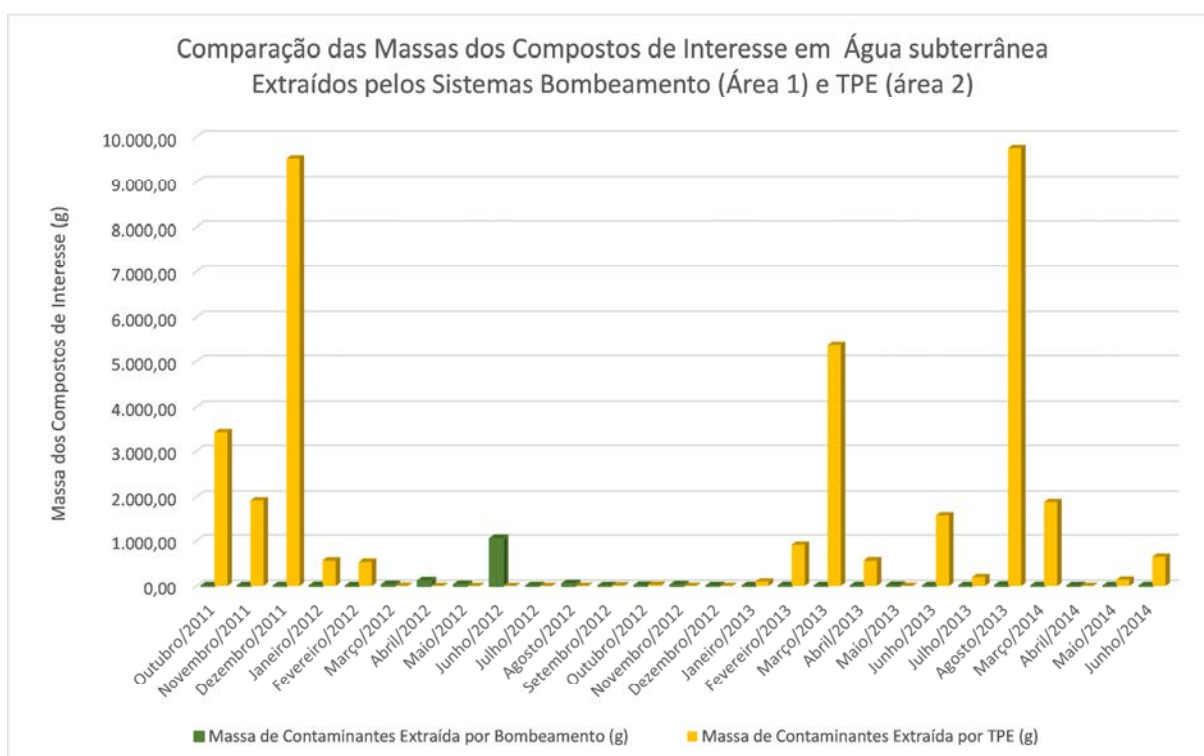


Gráfico 6 - Comparação das massas de compostos de interesse em água subterrânea extraídos pelo sistema de bombeamento (área 1) e TPE (área 2).

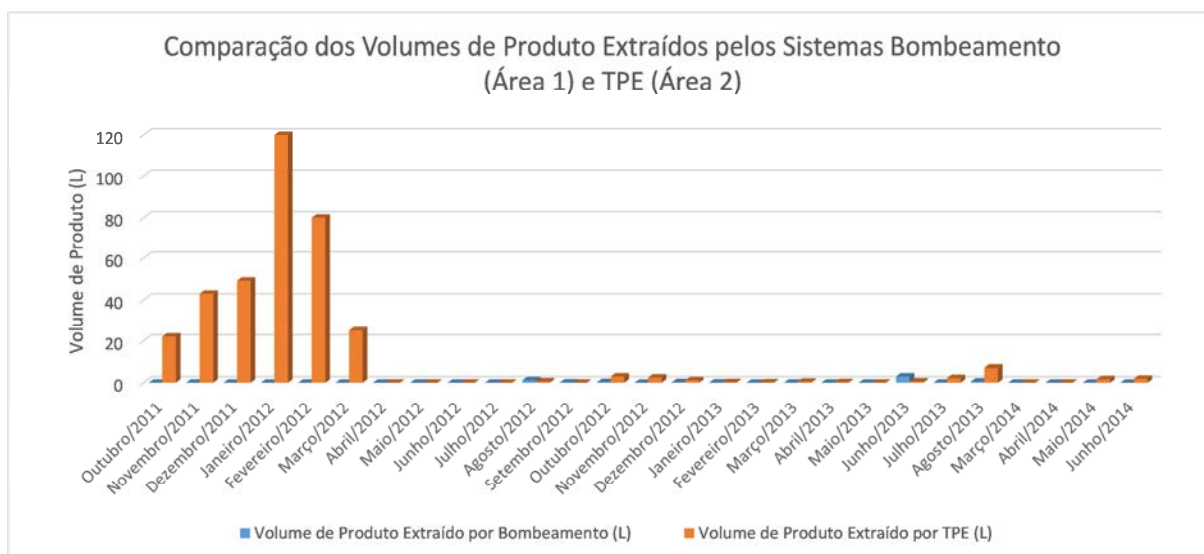


Gráfico 7- Comparação dos Volumes de Produto Extraídos pelos Sistemas de Bombeamento (área 1) e TPE (área 2).

O Quadro 18 apresenta a totalização dos volumes de água e produto e da massa de contaminantes extraídos pelos sistemas de bombeamento e TPE. A diferença nos volumes em relação aos apresentados nos capítulos anteriores, deve-se ao período de operação considerado. Nas primeiras tabelas foram considerados os volumes extraídos de junho a setembro de 2011, quando os procedimentos de monitoramento não estavam completamente implantados. Assim, nas tabelas que apresentaram balanços de massa e no Quadro 18 a seguir, foi considerado apenas o período compreendido entre outubro de 2011 e junho de 2014, para o qual havia dados analíticos mensais disponíveis.

Quadro 18- Resumo dos Parâmetros para Comparação dos Sistemas de Bombeamento e TPE, totalizados para o período de outubro de 2011 a junho de 2014.

PARÂMETROS	BOMBEAMENTO (ÁREA 1)	TPE (ÁREA 2)
Volume de produto extraído (L)	5,5	361,0
Volume de água subterrânea extraída (m ³)	1.233,9	543,0
Massa de contaminantes extraída em fase dissolvida (g)	1.344,3	37.222,2
Taxa global de extração água/óleo	224.344 : 1	1.504 : 1

Considerando 32 meses de operação, com número médio de 23 dias por mês e operação diária de 8h/dia, totalizando 5.888 h de operação no período considerado (outubro de 2011 a junho de 2014), as vazões médias de um poço de

bombeamento e de um poço de TPE seriam, respectivamente, de 20,96 L/h e 11,53 L/h.

4.2 Resultados Obtidos nos Ensaios de Campo na área 1

Antes do início do teste escalonado foram medidos os níveis d'água e de óleo nos poços de extração e observação. No poço de extração (PM-15) o nível d'água era de 9,195 m e o nível de óleo era de 9,169 m, havendo, portanto, uma espessura de 2,6 cm de produto no poço.

A primeira etapa do teste escalonado, utilizando vácuo de 100mmHg no tanque de vácuo do sistema, durou uma hora. Neste ponto de operação, o vácuo no cabeçote do poço de extração se manteve praticamente constante, com média de 46,5 mmHg e o rebaixamento do nível d'água ocasionado pelo bombeamento foi de 1,68 m. Nos poços de observação, houve a constatação de influência de vácuo no poço de observação PO-03, distante 15 m do poço de extração. No cabeçote deste poço foram obtidos vácuos variando de 0,7 a 0,8 mmHg, enquanto no PO-01 e no PO-02, distantes 5 e 10 m do PE, respectivamente, não foi constatada a influência de vácuo. Embora o tempo de ensaio tenha sido curto, aparentemente o sistema já se encontrava estabilizado e o fato da observação de vácuo no poço mais distante e a não observação nos poços mais próximos possivelmente indicou a presença de heterogeneidades no meio físico, uma vez que os poços de observação foram posicionados em direções distintas em relação ao poço de extração. Além disto, indicou a existência de um caminho preferencial na direção do PO-03 em relação às demais direções.

Na primeira etapa do teste escalonado foi obtida a vazão média de extração de 197 L/h.

Na segunda etapa do teste escalonado foi aplicado um vácuo de 200 mmHg no sistema, resultando num vácuo médio de 69 mmHg no cabeçote do poço de extração. A bomba foi mantida no mesmo local no interior do poço e, nestas condições de ensaio, obteve-se rebaixamento do nível d'água de 1,77 m e vazão de extração de água de 159 L/h. Foi observada a influência do vácuo nos poços de observação PO-01 (1,4 mmHg) e PO-03 (1,0 mmHg), distantes 5 e 15m do poço de extração, respectivamente. No entanto, o PO-02, localizado a 10m do poço de

extração, continuou não apresentando vácuo, repetindo o mesmo comportamento da etapa anterior do teste.

Nos 3 poços de observação foram verificadas variações médias centimétricas do nível d'água (8 cm no PO-01, 2 cm no PO-02 e 3 cm no PO-03) durante o período do teste escalonado.

Na etapa contínua do teste o sistema operou com 200 mmHg de vácuo durante três dias consecutivos, operando 24 h/dia.

O Quadro 19 apresenta os vácuos medidos nos cabeçotes dos poços de extração e observação, durante os três dias de teste.

O rebaixamento médio no PO-01 (5,0 m de distância do PE) foi de aproximadamente 14,0 cm em relação ao nível d'água do início do ensaio. O rebaixamento médio do PO-02 (10,0 m de distância do PE) foi de aproximadamente 9,0 cm durante o período do ensaio, e o rebaixamento médio do PO-03 (15,0 m de distância do PE) foi de 7,0 cm durante o ensaio.

Além dos PO-01 a PO-03 foram monitorados diariamente o PB-11 e o PM-36, distantes 3,4 e 6,4 m respectivamente do PE, os quais apresentaram rebaixamentos de 37 e 39 cm, respectivamente, entre o início e o final do teste. O poço PM-32, distante 7,7 m do PE, apresentou um aumento de 15 cm do NA durante o teste.

O ensaio contínuo teve duração de 54 horas, nas quais foram extraídos 4,385 m³ de água subterrânea, resultando em uma vazão média de extração de 81,2 L/h. A vazão média de vapores extraídos foi de 128,7 m³/h.

O Quadro 20 apresenta um resumo dos resultados obtidos no teste piloto de DPE da área 1.

As análises laboratoriais das amostras de gases analisadas para os compostos BTEX coletadas no final de cada dia do ensaio contínuo indicaram concentrações apenas de Benzeno, conforme pode ser observado no Quadro 21.

Os resultados das análises expeditas de VOC's dos gases extraídos encontram-se no Quadro 22.

Quadro 19- Vácuo gerado nos cabeçotes dos poços de extração e observação durante o ensaio de DPE.

HORA	PO-01	PO-02	PO-03	PO-04 (PB-11)	PO-05 (PM-32)	PE (PM-15)
06/08/2014						
09:45	0,9	0	0,1	0,3	N.M.	75
10:00	0,9	0	1,1	0,3	N.M.	72
10:15	1	0	1,1	0,2	N.M.	68,2
10:30	0,9	0	1,1	0,2	N.M.	66,7
10:45	0,6	0	1,1	0,2	N.M.	66,3
11:00	0,9	0	1,2	0,1	N.M.	66
11:15	0,7	0	1,1	0,2	N.M.	65,5
11:30	0,8	0	1,2	0,3	N.M.	64,9
11:45	0,9	0	1,2	0,1	N.M.	64,7
12:00	0,9	0	1,1	0,1	N.M.	64,5
14:00	0,7	0	1,1	0,3	N.M.	67,5
14:30	0,6	0	1,1	0,3	N.M.	61,9
15:00	0,7	0	1,2	0,3	N.M.	61,5
15:30	0,6	0	1,2	0,4	N.M.	61,5
16:00	0,5	0	1,2	0,5	N.M.	61,1
07/08/2014						
09:20	0,6	0	1,3	1,2	N.M.	57,6
09:50	0,7	0	1,3	1,3	1,7	57,2
10:20	0,7	0	1,3	1,5	1,7	56,5
10:50	0,8	0	1,3	1,3	1,6	56,4
11:20	0,7	0	1,3	1,2	1,7	56,1
11:50	0,7	0	1,3	1,3	1,7	56,3
13:20	0,6	0	1,3	1,3	1,6	56,2
13:50	0,6	0	1,4	1,2	1,7	55,9
14:20	0,7	0	1,3	1,1	1,7	55,9
14:50	0,7	0	1,4	1,1	1,7	55,9
15:20	0,8	0	1,4	1,1	1,7	56
15:50	0,6	0	1,4	1,1	1,7	56,1
16:20	0,6	0	1,5	1,1	1,7	56,1
08/08/2014						
09:20	0,6	0	1,4	1,2	1,7	55,4
09:50	0,6	0	1,4	1,3	1,7	54,8
10:20	0,6	0	1,4	1,3	1,7	54,6
10:50	0,7	0	1,3	1,3	1,6	54,6
11:20	0,7	0	1,5	1,2	1,7	54,5
11:50	0,6	0	1,3	1,3	1,7	53,6
12:20	0,6	0	1,3	1,3	1,6	53,2
13:00	0,7	0	1,3	1,3	1,7	53,2
14:00	0,8	0	1,3	1,4	1,7	53,6
15:00	0,7	0	1,4	1,3	1,8	53,3
16:00	0,5	0	1,4	1,3	1,8	53,8
Médias	0,71		1,25	0,87	1,69	59,34

Quadro 20– Resultados do teste piloto de DPE na área 1.

Etapa do Teste	Vácuo no Sistema (mmHg)	Vácuo no PE (mmHg)	Rebaixamento do NA no PE (m)	Rebaixamento do NA no PO-01 (m)	Rebaixamento do NA no PO-02 (m)	Rebaixamento do NA no PO-03 (m)	Rebaixamento do NA no PB-11 (m)	Rebaixamento do NA no PM-36 (m)	Rebaixamento do NA no PM-32 (m)	Vazão de líquido (L/h)	Vazão de gás (m³/h)
Teste escalonado	100	46,6	1,68	0,01	0	0	-	-	-	197	-
Teste escalonado	200	69	1,77	0,08	< 0,02	0,03	-	-	-	159	-
Teste contínuo	200	59	1,8	0,14	0,09	0,07	0,37	0,39	(aumento de 0,15)	81,2	128,7

Quadro 21- Resultados Analíticos das Amostras de Vapores extraídos pelo sistema durante o teste contínuo de DPE.

PARÂMETRO	UNIDADE	LQ	06/ago	07/ago	08/ago
Benzeno	ppmv	10	43	43	42
Etilbenzeno	ppmv	20	ND	ND	ND
Tolueno	ppmv	10	ND	ND	ND
Xilenos	ppmv	20	ND	ND	ND

Quadro 22- Concentrações de VOC's nos gases extraídos durante o ensaio de DPE.

Hora	Concentrações de VOC (ppm)
07/08/2014	
09:00	980
10:00	850
11:00	830
12:00	870
13:10	940
14:00	1.100
15:00	1.270
16:00	1.100
08/08/2014	
09:00	1.770
10:00	1.910
11:00	1.720
12:00	1.840
13:10	1.810
14:00	1.730
15:00	1.690
16:00	1.840

Utilizando o método de NEUMAN (1972), o Software AquiferTest (SCHLUMBERGER, 2011), e os dados obtidos através dos *level loggers*, obteve-se para os valores de transmissividade a média de $1,29 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$. O coeficiente entre a condutividade hidráulica vertical (K_v) e condutividade horizontal (K_y) foi de $1,0 \times 10^{-2}$ para os poços de observação.

As condutividades hidráulicas obtidas no ensaio foram de $4,12 \times 10^{-6}$ e $2,268 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

No último dia de ensaio foi coletada uma amostra do efluente líquido extraído pelo sistema DPE. Os resultados analíticos para os compostos de interesse no efluente líquido, coletado no último dia do ensaio, são apresentados no Quadro 23.

Quadro 23- Resultados analíticos para o efluente líquido extraído durante o teste de DPE.

Data	Composto	Unidade	Limite de Quantificação	Concentração no efluente Líquido
08/08/2014	Benzeno	$\mu\text{g/L}$	< 3	29,00
	Tolueno	$\mu\text{g/L}$	< 8	< 8
	Etilbenzeno	$\mu\text{g/L}$	< 3	1,18
	Xilenos	$\mu\text{g/L}$	< 3	3,02
	TPH total	$\mu\text{g/L}$	< 43	1.807,00

Não foi possível contabilizar a fase livre extraída no teste, pois havia uma pequena espessura inicialmente no poço de extração e o óleo recuperado ficou emulsionado na água subterrânea e aderido às paredes e placas corrugadas da caixa-separadora água-óleo do sistema.

Após o término do ensaio de DPE, no dia 11/08/2014 foi conduzido um teste com duração de 6 h, sendo que nas primeiras 3 h o sistema operou apenas com bombeamento no PM-15 e, nas 3 h subsequentes, o sistema operou com vácuo no cabeçote do poço, nas mesmas condições do ensaio, mantendo-se vácuo de 200 mmHg no sistema e obtendo-se vácuo médio de 70 mmHg no cabeçote do poço de extração (PM-15). As vazões médias obtidas foram de 96 L/h para o ensaio de DPE e 59 L/h para o ensaio de bombeamento, indicando portanto um aumento de 38,5% na vazão de extração de água subterrânea com a aplicação de vácuo no cabeçote do poço.

Assim como no ensaio anterior, não foi possível medir o volume de fase livre removido, pois o mesmo provavelmente foi emulsionado na água subterrânea (fato

observado através da aparência oleosa da água extraída) e aderência nas paredes de tubulações e equipamentos do processo.

No período subsequente à realização do ensaio piloto de DPE na área 1, o sistema de bombeamento, interligado a 10 poços, continuou em operação. Nos meses de outubro e novembro de 2014, as vazões médias extraídas por este sistema de bombeamento foram de 37 L/h e 22 L/h, respectivamente (de acordo com dados das planilhas de campo da empresa 4).

4.3 Resultados dos testes de TPE, Bombeamento e DPE na Área 2.

Nos meses de outubro e novembro de 2014, as vazões médias extraídas por cada um dos 8 poços do sistema TPE implantado na área 2 foram de 16 L/h e 17,8 L/h, respectivamente.

No período compreendido entre 9 e 18 de dezembro foram realizados ensaios de TPE, bombeamento e DPE em dois poços da área 2, com o objetivo de se comparar as vazões de extração de líquidos com as diferentes técnicas e verificar se o aumento da vazão de extração de água subterrânea observado no ensaio piloto de DPE na área 1 ocorria também na área 2, ou se foi um comportamento isolado do poço utilizado no ensaio.

Os resultados do monitoramento dos níveis d'água e espessura de produto, durante o período de ensaio, nos poços PM-28 e PE-01, selecionados para o ensaio na área 2, são apresentados no **Quadro 24**.

Quadro 24. Resultado do Monitoramento dos níveis d'água e espessura de produto nos poços selecionados para ensaio

Data	PE-01			PM-28		
	Profundidade (m)	NA (m)	Espessura de óleo (m)	Profundidade (m)	NA (m)	Espessura de óleo (m)
08/12/2014	5,230	3,166	0,000	3,550	2,099	0,010
09/12/2014		3,184	0,000		2,115	0,011
10/12/2014		3,220	0,000		2,251	0,000
11/12/2014		3,233	0,000		2,322	0,028
12/12/2014		3,280	0,000		2,330	película
15/12/2014		2,982	0,000		2,590	0,000
17/12/2014		3,030	0,000		2,153	0,009
18/12/2014		3,160	0,000		2,249	0,002

Nota: ocorrência de chuva nos dias 14 e 17/12/2014.

4.3.1 Resultados do teste de TPE na Área 2

Nos dias 9 e 10 e dezembro de 2014 foi conduzido ensaio de TPE utilizando o sistema existente, operando apenas os poços selecionados para ensaio (PE-01 e PM-28). No dia 09/12 foi extraído líquido apenas do PE-01 e no dia 10/12 a extração ocorreu apenas no PM-28, para possibilitar a contabilização do volume individual de líquido extraído de cada poço.

O Quadro 25 apresenta os resultados obtidos nesta etapa do teste.

Quadro 25. Vazões de Extração de Líquidos no Ensaio TPE – área 2

Data	Vácuo aplicado no sistema (mmHg)	Vácuo no cabeçote dos Poços (mmHg)	Volume (L)	Poço de Extração	Horas de ensaio	Vazão média (L/h)
09/12/2014	240	0,63	129	PE-01	5	25,80
10/12/2014	230	6,96	65	PM-28	4	16,13

Observações importantes durante o ensaio, com relação à aparência da fase líquida extraída, foram forte odor, coloração âmbar, brilho característico da presença de óleo na superfície.

4.3.2 Resultados do Teste de Bombeamento na Área 2

Os resultados das vazões obtidas durante o ensaio de bombeamento, conduzido nos dias 11, 12 e 15 de dezembro de 2014, nos poços PE-01 e PM-28 são apresentados no Quadro 26.

Quadro 26- Vazões de Extração de Líquidos no ensaio de Bombeamento – área 2

Data	Poço	Tempo de ensaio (h)	Volume (L)	Vazão Média (L/h)
11/12/2014	PE-01	4	104	26
	PM-28	4	54	13,5
12/12/2014	PE-01	3,16	70	22,15
	PM-28	3,16	39,5	12,50
15/12/2014	PE-01	2	48	24,00
	PM-28	2	38	19,00

No dia 11/12/2014 foi coletada uma amostra de efluente líquido para análise dos compostos de interesse em fase dissolvida (BTXE e TPH). Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 27.

Quadro 27 - Composição do Efluente de saída do sistema TPE (operando apenas com bombeamento nos poços PE-01 e PM-28)

Data	Composto	Unidade	Limite de Quantificação	Concentração no efluente Líquido
11/12/2014	Benzeno	µg/L	< 3	0,00
	Tolueno	µg/L	< 8	0,00
	Etilbenzeno	µg/L	< 3	0,00
	Xilenos	µg/L	< 3	8,53
	TPH total	µg/L	< 43	59.938,00

4.3.3 Resultados do Teste de DPE na Área 2

Nos dias 17 e 18 de dezembro de 2014 foram conduzidos testes de DPE nos poços PE-01 e PM-28, na área 2.

O Quadro 28 apresenta as vazões médias diárias de extração de líquidos obtidas durante o ensaio e as condições de operação do teste.

Quadro 28 - Vazões médias de extração de líquidos obtidas durante o ensaio de DPE na área 2

Data	Vácuo aplicado no sistema (mmHg)	Poço de Extração	Vácuo médio no cabeçote dos Poços (mmHg)	Rebaixamento médio do NA (m)	Tempo de ensaio (h)	Volume (L)	Vazão média (L/h)
17/12/2014	230	PE-01	7,56	0,58	1,13	48	42,48
		PM-28	37,37	0,09	1,13	36	31,86
18/12/2014	200	PE-01	4,32	0,582	4,17	180	43,05
		PM-28	30,50	0,04	4,17	124	29,74

Os efluentes coletados nas caixas utilizadas de coleta apresentaram iridescência, forte odor e gotículas de óleo sobrenadante.

As vazões de extração de líquidos obtidas com a utilização das três técnicas: TPE, bombeamento e DPE, são sumarizadas no Quadro 29.

Quadro 29 - Comparação das vazões de extração de água subterrânea pelas técnicas de bombeamento, TPE e DPE na área 2.

Sistema	Vazões no PE-01 (L/h)	Vazões médias por processo no PE-01 (L/h)	Vazões no PM-28 (L/h)	Vazões médias por processo no PM-28 (L/h)
TPE	25,80	25,80	16,13	16,13
Bombeamento	26,00	24,05	13,50	15,00
	22,15		12,50	
	24,00		19,00	
DPE	42,48	42,77	31,86	30,80
	43,05		29,74	

4.4 Resultados obtidos com modelo teórico

Utilizando a vazão média de bombeamento em um poço igual a 0,438 L/min (26,28 L/h, no período de 2003 a 2005, correspondente à operação do primeiro sistema instalado na área), espessura de produto de 2m, raio de influência de 7m e os parâmetros médios apresentados no Quadro 11, o resultado obtido para o volume recuperável de LNPL foi de 13.618L por poço. Considerando os 4 poços em operação na área, no período de 2003 a 2005, o volume recuperável seria de 54,5 m³, muito próximo dos 51,4m³ efetivamente recuperados, indicando portanto um bom ajuste dos parâmetros.

Utilizando os parâmetros médios e os resultados obtidos no teste piloto de DPE da área 1 (vazão de extração de líquidos de 1,33L/min, vácuo no cabeçote do poço de 0,092atm, raio de influência de 10m), e a espessura de 0,02m de produto nos poços, o modelo prevê a possibilidade de extração de 3L de produto por poço, abrangendo área de 314m². Considerando a abrangência atual da área com fase livre na área 1, correspondente a aproximadamente 5.312,5m², de acordo com as previsões do modelo LDRM seria possível recuperar aproximadamente 51L de produto.

Utilizando os parâmetros médios e os resultados obtidos no teste piloto de DPE da área 2 (vazão de extração de líquidos de 42,77L/h por poço, vácuo no cabeçote do poço de 0,078atm, raio de influência de 10m), e a espessura de 0,02m de produto nos poços, o modelo prevê a possibilidade de extração de 42L de produto por poço, abrangendo área de 314m². Considerando a abrangência atual da área com fase livre na área 2, correspondente a aproximadamente 1250m², de

acordo com as previsões do modelo LDRM seria possível recuperar aproximadamente 167L de produto.

Portanto, na área impactada (áreas 1 e 2) seria possível recuperar o total de aproximadamente 218L de produto.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As comparações de eficiência entre as técnicas são apresentadas na literatura de diferentes formas: taxa de extração água/óleo (volumes de água extraído para um volume de óleo), massa total extraída pelos sistemas nas diferentes fases (produto, fase dissolvida e vapores) ou pelo custo associado ao volume de produto ou de água extraído. Nesta dissertação foram utilizados para comparação entre as técnicas apenas a taxa de extração água/óleo e vazões de água subterrânea extraída, devido aos dados existentes só permitirem a utilização destes indicadores.

5.1 Discussão dos resultados da compilação de dados de operação de sistemas de remediação de 2003 a 2014

Apesar das incertezas envolvidas nos dados, observando-se o Quadro 12 é possível verificar que a taxa de remoção de produto foi muito maior no início da operação em 2003 comparadas às taxas nos períodos subsequentes, independentemente da técnica de remediação utilizada. Este comportamento pode ser atribuído à existência inicial de espessuras de fase livre superiores a 2m, condição favorável à extração do óleo por bombeamento ou por outras técnicas, como *skimmer* e TPE.

Outra possibilidade para explicar as maiores taxas de remoção no início da operação poderia ser atribuída às diferentes formas de distribuição dos contaminantes em subsuperfície ao longo do tempo. Inicialmente o produto distribuiu-se em subsuperfície predominantemente em fase livre, a qual apresenta maior facilidade de movimentação para o interior dos poços de bombeamento, sendo, portanto de mais fácil remoção. A medida que o tempo passa, especialmente se houver variações sazonais significativas no nível d'água, a distribuição do produto torna-se predominante na fase residual, que dificilmente pode ser removida fisicamente, de forma que há uma redução na quantidade de produto extraído pelos sistemas. No entanto, para a área em estudo, conforme pode ser observado nos Gráficos 3 e 4, não ocorreram grandes variações no nível d'água, de forma que a

redução nas taxas de extração água/óleo não poderia ser justificada somente pelo trapeamento da fase livre.

Na área estudada, apesar do elevado volume total removido nos primeiros três anos de operação ($54,33\text{m}^3$), foram utilizadas apenas quatro bombas e dois skimmers em sistema de rodízio entre poços, numa área impactada estimada em 12.500m^2 . Isto significa que cada um dos seis pontos de extração teria que ter influência sobre uma área de 2083m^2 para abranger toda a área impactada, ou seja, o raio de influência de cada ponto teria que ser de 25,75m. Obviamente este raio de influência não é obtido com a utilização de skimmers, de forma que o raio de influência de bombeamento com as quatro bombas teria que ser muito maior. Considerando apenas 4 poços de bombeamento, o raio de influencia de cada um teria que ser de aproximadamente 32m. Em suma, a utilização de um maior número de poços de bombeamento no início da operação possivelmente teria contribuído para extração de maior volume de fase livre, consequentemente, reduzindo a porcentagem dos compostos de interesse particionadas e distribuídas em outras fases (fase dissolvida, fase gasosa, fase residual em solo) e, em última análise, o tempo para a completa remediação da área poderia ser significativamente menor.

No sistema de remediação mais recente, operado pela empresa 4, nota-se que a taxa de extração de produto é significativamente maior no sistema TPE quando comparado ao bombeamento. Nota-se também que, mesmo com a redução das espessuras de fase livre, as taxas de extração com o sistema TPE continuam na mesma ordem de grandeza das taxas obtidas com o sistema TPE operado pela empresa 2 até maio de 2008. Considerando ainda que o sistema operado pela empresa 4 operava em regime intermitente (8h/dia, 5 dias por semana) e que o sistema anterior operava 24h/dia, aparentemente o sistema da empresa 4 apresenta melhor eficiência que os sistemas operados pelas empresas 2 e 3.

No entanto, é possível observar que a taxa de remoção água/produto do sistema operado pela empresa 4 é muito menor que a da empresa 1. Este fato se deve principalmente à redução da espessura de fase livre ocorrida entre 2003 a 2014, conforme pode ser observado nos Gráficos 1 e 2, que dificulta a extração nesta fase pelos sistemas de remediação. Esta redução da espessura ocorreu devido à operação dos sistemas de remediação na área ao longo dos anos, mas também pelo espalhamento da pluma e pela distribuição da contaminação para outras fases (fase dissolvida, fase gasosa, fase residual em solo). A baixa eficiência

dos sistemas na remoção de fase livre também pode ter sido afetada por problemas operacionais.

Observando-se os Gráficos 3 e 4, nota-se que na área não ocorrem grandes variações no nível d'água dos poços selecionados, especialmente na área 2. No entanto, este comportamento não é unânime para todos os poços da área, havendo inclusive histórico de alguns poços que secaram completamente em períodos de estiagem. Esta diferença de comportamento pode ser explicada possivelmente pela existência de heterogeneidades na área.

Comparando-se as taxas médias de extração água/óleo obtidas de outubro de 2011 a junho de 2014 para o sistema de bombeamento na área 1 (244.344:1) e para o sistema TPE na área 2 (1.244:1), conclui-se que o sistema TPE foi muito mais eficiente na remoção de fase livre que o bombeamento. Este fato que pode ser explicado não apenas pelo aumento do gradiente causado pela aplicação de vácuo na técnica TPE, mas pela extração na interface líquido – LNAPL, que prioriza a remoção da fase oleosa em relação à água subterrânea, sem causar um rebaixamento significativo no aquífero.

Os volumes de óleo extraídos pelos dois sistemas no mesmo período de operação foram de 5,5 litros no bombeamento e 361 litros no TPE. As vazões médias de um poço de bombeamento e de um poço de TPE foram, respectivamente, de 20,96 L/h e 11,53 L/h, no período considerado.

Embora as vazões de água subterrânea extraídas fossem muito maiores no sistema de bombeamento (volume total: 1.233,9 m³) que no sistema TPE (volume total: 543 m³), as concentrações dos compostos de interesse foram substancialmente maiores nos efluentes do sistema TPE, resultando em uma maior extração em massa dos compostos de interesse (37.222,2 g) quando comparada com a extração de massa obtida pelo bombeamento (1.344,3 g). Portanto, o sistema TPE foi mais eficiente que o bombeamento tanto na extração de produto quanto na remoção de massa dos compostos de interesse em fase dissolvida, sem contabilizar a massa removida em fase vapor e a massa removida por biorremediação, estimulada pela maior ventilação do meio causada pela aplicação de vácuo.

O aumento das concentrações dos compostos de interesse em fase dissolvida pode ser explicado possivelmente pelas alterações no equilíbrio da partição dos contaminantes entre as diferentes fases, ocasionada pela aplicação do vácuo. O aumento da extração de produto, por sua vez, possivelmente é decorrente

da aplicação de vácuo ocasionar a força motriz necessária para mobilizar a fase livre para o interior dos poços. Outra possibilidade é a ocorrência de liberação de substâncias surfactantes pelo metabolismo dos microorganismos (que é acelerado pela maior aeração do meio causada pela aplicação de vácuo), que facilitariam a dissolução e o arraste destes contaminantes juntamente com a água, para o interior dos poços de extração. Além disto, as diferenças litológicas e heterogeneidades apresentadas nas áreas 1 e 2 podem ter favorecido a operação do TPE em relação ao bombeamento.

5.2 Discussão dos resultados obtidos nos ensaios de campo na área 1

O ensaio contínuo de DPE na área 1 teve duração de 54 horas, nas quais foram extraídos 4,385 m³ de água subterrânea, resultando em uma vazão média de extração de 81,2 L/h. Para a fase vapor, a vazão média de extração foi de 128,7 Nm³/h. O raio máximo de influência do vácuo aplicado foi de 15 m, havendo diferenças nos diferentes sentidos em relação ao poço de extração.

A área em estudo apresenta fluxo preferencial no sentido Sudeste-Noroeste, e nesta direção os rebaixamentos obtidos nos poços de observação foram maiores. Embora coincidente com a direção preferencial de fluxo, este comportamento também pode indicar a presença de heterogeneidades, associada à diferença de litologias presentes na área, fato não estudado nesta dissertação.

No sentido preferencial de fluxo, a zona de influência alcançou mais de 15,0 m. Já no sentido de menor fluxo o alcance da zona de influência foi inferior a 10,0 m, situação esperada se considerada a influência do sentido preferencial de fluxo.

As concentrações dos compostos de interesse foram muito maiores na fase líquida que na gasosa, o que é esperado para compostos como o diesel, que possuem menor quantidade de voláteis em sua composição quando comparados à gasolina, por exemplo. De forma geral, quanto mais volátil for o contaminante maior será a concentração na fase vapor. Neste caso específico, na amostra gasosa foram analisados apenas BTXE e na amostra de líquido, BTXE, TPH e PAH.

Não foi possível contabilizar a fase livre extraída no teste, pois havia uma pequena espessura inicialmente no poço de extração e o óleo recuperado ficou emulsionado na água subterrânea e aderido às paredes e placas corrugadas da caixa-separadora água-óleo do sistema.

Após o término do ensaio de DPE, no dia 11/08/2014 foi conduzido um teste com duração de 6 horas, sendo que nas primeiras 3 horas o sistema operou apenas com bombeamento no PM-15 e, nas 3 horas subsequentes, o sistema operou com vácuo no cabeçote do poço, nas mesmas condições do ensaio, mantendo-se vácuo de 200 mmHg no sistema e obtendo-se vácuo médio de 70 mmHg no cabeçote do poço de extração (PM-15). As vazões médias obtidas foram de 96 L/h para o ensaio de DPE e 59 L/h para o ensaio de bombeamento, indicando portanto um aumento de 38,5% na vazão de extração de água subterrânea com a aplicação de vácuo no cabeçote do poço.

Considerando apenas a vazão de extração de líquido, o teste demonstrou para a área 1, maior eficiência do DPE em relação ao bombeamento.

5.3 Discussão dos resultados obtidos nos ensaios de campo na área 2

De acordo com os dados apresentados no Quadro 23 foi possível observar, durante o período de testes na área 2, variações máximas do nível d'água de 29,8 cm no PE-01 e de 49,1 cm no PM-28. Assim como ocorre na área 1, na área 2 também foi observada rápida resposta do meio às variações impostas pela operação dos sistemas de remediação e também devido a períodos chuvosos. É importante ressaltar que ocorreram chuvas intensas durante as noites do período de teste, particularmente mais intensas entre 14 e 17 de dezembro, que possivelmente causaram estas variações de nível d'água observadas nos poços.

5.3.1 Discussão dos resultados do teste de TPE na área 2

Comparando-se as vazões médias obtidas no ensaio de TPE nos poços PE-01 e PM-28 (25,8 e 16,13 L/h, respectivamente) com as vazões médias de extração no período de outubro (16,7 L/h) e novembro de 2014 (17,8 L/h), nota-se que durante o ensaio a vazão de extração no PE-01 foi 45% maior que a média em novembro e 124% maior que a média nos anos de 2011 a 2014. No PE-28, apesar da vazão ter sido inferior à média de novembro, foi 39,9% maior que a média das vazões no período de 2011 a 2014.

Este aumento das vazões de extração pode ser explicado provavelmente pelo aumento de vácuo aplicado durante o ensaio, uma vez que o sistema

inicialmente interligado a 8 poços tenha sido utilizado para 2 poços durante o ensaio, havendo portanto a aplicação de um vácuo maior no cabeçotes destes dois poços. Este comportamento indica que o aumento do vácuo aplicado pode ter ocasionado o aumento nas taxas de extração de líquido por TPE.

Não foi possível realizar a medição das vazões gasosas, pois não havia instrumento instalado no sistema disponível para esta finalidade. Esta foi uma limitação do ensaio, que não permitiu a realização de balanço de massas no efluente gasoso. Embora o objetivo do ensaio para este trabalho tenha sido a comparação das taxas de extração apenas em fase líquida, o monitoramento da fase gasosa seria uma recomendação importante para testes futuros e para a operação dos sistemas instalados na área.

5.3.2 Discussão dos resultados do teste de bombeamento na área 2

O ensaio de bombeamento na área 2 indicou vazão média de extração de líquido de 24 L/h para o PE-01 e de 15 L/h para o PM-28.

As bombas pneumáticas foram colocadas 5 cm acima do fundo de cada poço. O PE-01 apresenta profundidade total de 5,230 m e nível d'água médio durante o ensaio de 3,157 m, havendo portanto uma coluna de líquido de 2,073 m. O PM-28 apresenta profundidade total de 3,550 m e nível d'água médio durante o ensaio de 2,264 m, havendo apenas 1,286 m de coluna d'água.

Considerando a altura total da bomba (73 cm) e os 5 cm deixados entre o fundo do poço e o fundo da bomba, a coluna de líquido acima do bocal de captação da bomba era de 1,293 m no PE-01 e de apenas 0,506 m no PM-28, o que pode explicar as maiores vazões obtidas no PE-01, comparadas as do PM-28, observadas no Quadro 26.

5.3.3 Discussão dos resultados do teste de DPE na área 2

No ensaio de DPE realizado na área 2 foram obtidas vazões médias de extração de líquido de 42,77 L/h no PE-01 e de 30,8 L/h no PM-28.

Não foi possível medir a quantidade de produto extraída ao longo do ensaio, porém, os efluentes coletados nas caixas utilizadas de coleta apresentaram iridescência, forte odor e gotículas de óleo sobrenadante. Esta característica, apesar

de qualitativa, é indicador de que a técnica é mais eficiente do que as demais, porque mobilizou LNAPL (mesmo que em gotículas), fato que não ocorreu no teste das demais variações da técnica.

Observando-se os resultados obtidos nos testes realizados na área 2 (Quadro 29), constatou-se um aumento significativo na vazão de extração de líquidos quando se utilizou o sistema DPE, em relação aos valores obtidos nos mesmos poços com as técnicas de TPE e bombeamento.

Para o PE-01, a vazão média de extração com DPE foi 39,68 % maior que a vazão no TPE e 43,77 % maior que no bombeamento. Notou-se também pouca diferença nas vazões obtidas com bombeamento e TPE.

Para o PM-28, a vazão média de extração obtida com DPE foi 47,63 % maior em relação ao TPE e 51,30 % maior em relação ao bombeamento.

Como as bombas no ensaio de DPE operaram exatamente nas mesmas condições que no ensaio de bombeamento, sendo mantidas as mesmas posições no interior dos poços, mesma pressão de ar comprimido, mesmo intervalo de injeção de ar comprimido e tempos de operação semelhantes, o incremento observado nas vazões de extração estão fortemente correlacionados à aplicação do vácuo nos cabeçotes dos poços.

Outra observação importante é que os vácuos aplicados aos cabeçotes dos poços foram praticamente iguais nos ensaios de TPE e DPE e, no segundo caso, as vazões de extração foram substancialmente maiores.

Desta forma, conclui-se que a aplicação de vácuo no cabeçote dos poços juntamente com o bombeamento, que constitui a prática da aplicação da metodologia DPE, é responsável pelo aumento nas vazões de extração, fato que foi igualmente observado no teste piloto realizado na área 1, onde o PM-15 apresentou vazões de extração de líquido 39,9% maior com o DPE quando comparado ao bombeamento simples nas mesmas condições de ensaio, valor bastante similar ao observado nos testes da área 2.

Mesmo não havendo dados experimentais para a fase livre, é presumível que o aumento da vazão de extração de fase líquida aumente também a remoção de compostos orgânicos na fase dissolvida, além da massa removida também na fase gasosa, de forma que seja presumível uma redução no tempo total para remediação da área com a utilização do DPE.

5.4 Comparação dos resultados obtidos com previsões de modelos teóricos

O aumento da vazão de água observada nos testes de DPE nas áreas 1 e 2 pode ser explicado pelo aumento do gradiente de pressão causado pela aplicação do vácuo e este resultado é compatível com a previsão teórica, considerando a Lei de Darcy (equação 11 do capítulo 2.3.1.). De acordo com esta equação, o aumento do gradiente de pressão aplicado ao poço seria transmitido para cada uma das fases i e causariam o aumento do fluxo em direção ao poço. Desta forma, a previsão teórica foi confirmada pelos resultados obtidos nos testes.

O aumento na taxa de extração de óleo não pôde ser observado nos ensaios realizados, provavelmente devido à pequena espessura de LNAPL predominante no cenário de contaminação no momento dos testes. No entanto, a observação da equação de Hubbert (equação 7) e da equação 10 apresentadas no capítulo 2.3.1., mostram que a migração de LNAPL é influenciada pelo gradiente hidráulico associado ao movimento da água, no caso dos efeitos da pressão capilar poderem ser desprezados. Esta condição poderia ser assumida particularmente para a área 2, onde os níveis d'água são rasos e portanto a zona capilar é estreita. Desta forma, como houve um aumento significativo da vazão de extração de água, presume-se que ocorresse também um aumento significativo na vazão de extração de óleo, caso houvesse espessuras maiores do mesmo durante a realização dos testes.

Quanto à previsão das quantidade recuperável de óleo, No caso específico das áreas em estudo (áreas 1 e 2), há ausência de parâmetros físicos de solo específicos para as áreas e muitos dados inseridos no software LDRM2 foram obtidos de literatura, o que pode gerar um desvio importante nas informações calculadas pelo programa em relação às reais condições das áreas.

De acordo com as simulações para a condição inicial (2003 a 2005), a utilização dos valores médios para os parâmetros físicos do solo, apresentados no Quadro 11, foram os que mais se ajustaram ao cenário real, pois resultaram em volumes de LNAPL recuperável próximos aos obtidos durante o período de bombeamento. Isto indica que os valores reais destes parâmetros possivelmente estão dentro das faixas de valores obtidas em literatura.

Embora o raio de influência de 15m tenha sido observado no ensaio piloto de DPE realizado em 2014 na área 1, este valor não foi o que apresentou os melhores resultados na simulação, pois implicariam em rebaixamentos maiores,

efetivamente não aplicáveis para a área. Por este motivo, embora os resultados obtidos para a previsão de volume extraído de LNAPL sejam elevados, este raio não é representativo para a área como um todo. Este fato pode indicar que os raios obtidos nos ensaios de campo estejam mais relacionados a existência de caminhos preferenciais. Desta forma, foram simulados os mesmos cenários, mas com raios de captura de 7m, o que ocasionou rebaixamentos menores, mais adequados à realidade da área em estudo. Portanto o raio de influência real deve estar na faixa de 7 a 15 m, porém mais próximo do limite inferior deste intervalo.

Para o cenário inicial (correspondente aos dados obtidos entre 2003 a 2005, para 1 poço de bombeamento, com raio de influência igual ao de captura 7m, parâmetros de solo médios e vazão real de 0,438 L/mim), apesar de obtidos resultados para LNAPL extraído muito próximo ao valor real em campo (13.618 L e 12.850L, respectivamente), indicando que os parâmetros utilizados para caracterização do solo foram próximos aos valores reais, o rebaixamento necessário apresentou valores superiores a 5m, que não podem ser efetivamente observados em campo.

Embora haja várias limitações do software, conforme discutido anteriormente, as simulações indicaram diferenças importantes nos tipos de solo das áreas 1 e 2, que são condizentes com as diferentes condutividades hidráulicas destas duas áreas. Isto significa que o sistema de remediação não poderá considerar um raio de influência único para as duas áreas, bem como as taxas de extração e o rebaixamento do nível d'água deverão ser ajustadas para cada poço, individualmente.

6 CONCLUSÃO

O objetivo do presente trabalho foi atingido, pois a partir da compilação de dados de sistemas de remediação em operação e da realização de ensaios de campo, foi possível confirmar o aumento significativo das vazões de extração utilizando a técnica de DPE em relação às vazões obtidas com as técnicas de bombeamento e TPE.

Para a área 1, a utilização do DPE resultou em vazão de extração de líquido 38,5% maior que a obtida por bombeamento.

Nos testes realizados na área 2, a utilização do DPE no poço de extração PE-01 resultou em aumentos de 39,68% na vazão de líquido em relação ao TPE e de 43,77% em relação ao bombeamento. Já para o poço PM-28, a vazão média obtida com o DPE foi 47,63% maior em relação ao TPE e 51,3% maior em relação ao bombeamento.

A maior efetividade do DPE em relação ao bombeamento convencional pode ser explicada pelo aumento do gradiente de pressão, que ocasiona maior mobilidade de água e de LNAPL para o interior do poço. Em relação ao TPE, o DPE também foi mais efetivo, e, neste caso, as maiores vazões de líquido obtidas podem ser explicadas pelo rebaixamento causado pelo bombeamento, somado ao aumento de fluxo causado pelo maior gradiente causado pela aplicação do vácuo.

A maior eficiência do DPE em relação às outras técnicas ensaiadas, evidenciada na bibliografia apresentada, pode ser explicada pela maior exposição da zona saturada ao gradiente de pressão aplicado, pois o rebaixamento causado pelo bombeamento permite a maior drenagem de uma porção anteriormente saturada com água. Se o conceito de molhabilidade for considerado, a fase oleosa inicialmente presente na zona saturada, com a redução da saturação de água, aumentaria a molhabilidade do óleo em relação ao ar e fluiria para o poço com maior facilidade. Desta forma, uma maior quantidade de óleo poderia fluir para o interior do poço e isto explicaria as maiores taxas de extração obtidas com o DPE.

Uma conclusão importante e aplicável não apenas ao caso estudado, mas a todos os casos de remediação utilizando aplicação de vácuo é a necessidade de monitoramento de vazões e concentrações para as fases líquida e gasosa. Sem o monitoramento adequado de vazões e concentrações na fase gasosa, não é

possível fazer um balanço de massa para o sistema e, considerando que para hidrocarbonetos de petróleo os principais compostos de interesse são voláteis (BTXE), uma parcela bastante significativa da massa de contaminantes é preferencialmente extraído nesta fase. Portanto, a ausência destas informações podem subestimar a eficiência dos processos de remediação.

De forma geral, desde a ocorrência de vazamento até a realização dos testes abordados neste estudo, várias empresas de consultoria operaram diferentes sistemas de remediação na área estudada e monitoraram diferentes parâmetros de processo. A ausência da padronização do monitoramento e a consequente ausência de dados importantes ao longo de todo o tempo de remediação dificultou a comparação entre as técnicas de remediação efetivamente utilizadas na área. Embora a operação por empresas diferentes ao longo do tempo seja uma característica de mercado, é importante que o proprietário da área, como gestor principal da remediação, estabeleça um protocolo único de monitoramento a ser seguido, independentemente das empresas de consultoria que operem os sistemas de remediação.

Recomenda-se ainda a utilização de processos contínuos de operação em detrimento à operação intermitente, mantendo-se o rebaixamento nos poços praticamente constante, de forma que os processos de embebição e drenagem sejam minimizados, pois mantendo a drenagem na porção rebaixada e expondo-na continuamente ao vácuo, a porção recuperável de óleo poderá fluir mais facilmente para os poços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Bivaldo Gomes de. **Métodos Alternativos de Determinação de Parâmetros Físicos do Solo e Uso de Condicionantes Químicos no estudo da Qualidade do Solo**. Tese de Doutorado. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008. 103p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15495**: poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - parte 1: projeto e construção. Rio de Janeiro, 2007. 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15492**: sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental - procedimento. Rio de Janeiro, 2007. 31 p.

BRASIL.CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo: CETESB, 2001. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/7-manual-de-gerenciamento-das--acs>>. Acesso em: 16 jun. 2015.

BRASIL.CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Texto Explicativo: Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2013/texto_explicativo.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2015.

CHARBENEAU, Randall J. **Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport**. 1th Ed. Long Grove: Waveland Press, 2006. 589p.

CHARBENEAU Randall J. **Groundwater Hidraulics and Pollutant Transport**,.EPA United States environmental Protection Agency. Superfund Remedy Report - 14th Edition. EPA 542-R-13-016. 2013. 44p.

CHARBENEAU, Randall. **LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM) Media**. Austin: API, 2007. 68p. (API PUBLICATION 4760). Disponível em <http://www.api.org/environment-health-and-safety/cleanwater/groundwater/lnapl/~media/Files/EHS/Clean_Water/Ground_Water_Quality/LNAPL/4760-v1.pdf>. Acesso em 16 jun. 2015.

CHARBENEAU, Randall. **LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM) Volume 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media**. API PUBLICATION 4760. 2007. 68p. Disponível em: <http://www.api.org/environment-health-and-safety/cleanwater/groundwater/lnapl/~media/Files/EHS/Clean_Water/Ground_Water_Quality/LNAPL/4760-v1.pdf> Acesso em: 14 jun.2015

ESTADOS UNIDOS. U.S. Army Corps of Engineers. **Engineering and Design Multi-Phase Extraction**. 1thed. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, 1999. 286p. (EM-1110-1-4010). Disponível em: <http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-1-4010.pdf>. Acesso em: 14 jun.2015.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Army Corps of Engineers. **Engineering and Design Soil Vapor Extraction and Bioventing**. 1thed. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, 2002. 424p. (EM 1110-1-4001). Disponível em: <http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-1-4001.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2015.

ESTADOS UNIDOS.EPA, Environmental Protection Agency.. **Coast and Performance Report for LNAPL Recovery - Multi-Phase Extraction and Dual-Pump Recovery of LNAPL at the BP Former Amoco Refinery, Sugar Creek, MO**. [S.I.] Environmental Protection Agency, 2005. 47p. (EPA 542-R-05-016). Disponível em: < <http://www.epa.gov/superfund/remedytech/pubitech.htm>> Acesso em: 14 jun. 2015.

ESTADOS UNIDOS.EPA, Environmental Protection Agency. **Federal Remediation Technologies Roundtable. Remediation Case Studies and Technology Assessment Reports Fact Sheet**. [S.I.]: EPA, 2006. 44p. (EPA-542-F-06-004). Disponível em: <<http://www.epa.gov/tio/download/frtr/2006frtrfactsheet.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2015.

ESTADOS UNIDOS. EPA, Environmental Protection Agency. **Presumptive Remedy: Supplemental Bulletin Multi-Phase Extraction (MPE) Technology for VOCs in Soil and Groundwater**. [S.I.]: EPA, 1997. 11p. (EPA 540-F-97-004). Disponível em: <<http://www.clu-in.org/download/toolkit/finalapr.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2015.

FERREIRA, Mozart Martins et al. **Física do Solo Prática – Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas**. Departamento de Ciência do Solo, Setor de Física do Solo – Universidade Federal de Lavras. 2000.34p. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/82866673/Apostila-de-Fisica-Do-Solo-Pratica-UFLA>> Acesso em: 14 jun. 2015.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 3rd ed. New York.: Macmillan College Publishing, Inc.,1994. , 616 p

MACHADO, Marcely F. e SILVA, Sandra F. **Geodiversidade do Estado de Minas Gerais**. [S.I.]. CPRM, 2010. 131p. Disponível em :
<http://www.cprm.gov.br/publique/media/Geodiversidade_MG.pdf> Acesso em: 14 jun. 2015

MARTINS,S. and GREGORY,S. **Effects of Natural Environmental Changes on Soil-Vapor Extraction Rates**. UCRL-CONF-220094 - Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Monterey, CA, United States May 22, 2006 through May 25, 2006.

McDOWELL, A.Scott. and BARBEE, Gibson V. **Removal of Petroleum Using Dual Phase Extraction**. AREMA Conference, 2001. 22p. Disponível em:.
<https://www.arena.org/files/library/2001_Conference_Proceedings/00047.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2015.

MELLO, Marcio S. at all. **Betim Caracterização de Ecossistemas**. EMATER-MG, 2006.46p. Disponível em:
http://www.betim.mg.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/relatoriobetim%3B0724280503%3B20070213.pdf. Acesso em: 14 jun. 2015

PETROBRAS. Ficha de Informação de segurança de Produto Químico. **FISPQ - Óleo Diesel**. Disponível em:
<<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/f69c2f0043a796c4b3f4bfecc2d0136c/fispq-oleodiesel-s500.pdf?MOD=AJPERES>> Acesso em: 14 jun. 2015

PEDE, Marco Aurélio. **Flutuação do Lençol Freático e sua Implicação na Recuperação de Hidrocarbonetos: Um Estudo de Caso**. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, 2009.129p.

PEHLIVAN, Mehmet. **MTBE and BTEX Stripping During BUBBLEXSM Two-Phase Extraction**. Poster Presentation, Group II, No. 55, Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, The Second International Conference, Monterey, California, May 22-25, 2000.

RISER-ROBERTS, E. **Remediation of Petroleum Contaminated Soils: Biological, Physical and Chemical Processes**. 1thed. Florida: CRC Press LLC, 1998. 414p.

RUZSIN, Thomas E. **Dual Phase System Design Pilot Study Report - Gasoline Fueling Station – Royal Farms #96 - AEC Project Number: 05-056 RF096.** Advantage Environmental Consultants, LLC (AEC), 2012.124p.

RAWLS, W.J.. **Pedotransfer Functions for the United States.** Developments in Soil Science, Volume 30, Chapter 23,[S.I.]. Elsevier B.V. 2004.11p.

SOLC,Jaroslav. **JV Task 59 – Demosntration of Accelerated In Situ Contaminant Degradation vy Vacuum-Enhanced Nutrient Distribution.** US Department of Energy, Report 2007-EERC-04-08. 2007. 74p.

THOMSON, Neil R. and FLYNN, David J. **Soil Vacuum Extraction of Perchloroethylene from the Borden Aquifer.** Ground Water, Vol.35, No.5, September – October 2000.pages 673-688.

ANEXOS

ANEXO 1 Especificações técnicas do óleo diesel



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 1 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

1 - IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA

Nome do produto: ÓLEO DIESEL S500
Código interno de identificação: BR0109
Principais usos recomendados para a substância ou mistura: Utilizado como combustível.
Nome da empresa: PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A.
Endereço: Rua Correa Vasques 250
20211-140 - Cidade Nova - Rio de Janeiro (RJ).
Telefone: 0800 78 9001
Telefone para emergências: 08000 24 44 33

2 - IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS

PERIGOS MAIS IMPORTANTES: Líquidos e vapores inflamáveis. Causa irritação à pele. Suspeito de causar câncer. Pode causar irritação respiratória (irritação da área respiratória). Pode causar sonolência e vertigem (efeitos narcóticos). Pode ser mortal em caso de ingestão e por penetração nas vias respiratórias. Este produto contém gás sulfídrico, extremamente tóxico e inflamável.

EFEITOS DO PRODUTO:

Efeitos adversos à saúde humana: O produto pode causar irritação das vias aéreas superiores se inalado. Pode causar efeitos narcóticos. Causa irritação à pele e pode causar leve irritação aos olhos. Suspeito de causar câncer. Pode causar a morte se aspirado.

Efeitos ambientais: O produto pode ser perigoso para o meio ambiente em caso de grandes derramamentos.

Perigos físicos e químicos: Líquidos e vapores inflamáveis.

Perigos específicos: Líquido inflamável. Recipientes podem explodir se aquecidos. Quando aquecidos, este líquido libera gases irritantes e tóxicos.

Principais sintomas: Vermelhidão e dor na pele. Tosse, dor de garganta e falta de ar. Tontura, náusea, dor de cabeça, confusão mental, perda de consciência.

Classificação de perigo do produto: Líquidos inflamáveis – Categoria 3
Corrosivo/irritante à pele – Categoria 2
Carcinogenicidade – Categoria 2
Toxicidade sistêmica ao órgão-alvo após única exposição – Categoria 3
Perigo por aspiração – Categoria 1

Sistema de classificação adotado: Norma ABNT-NBR 14725-Parte 2:2009.



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 2 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

Visão geral das emergências:

Adoção do Sistema Globalmente Harmonizado para a Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos, ONU.

LÍQUIDO ALTAMENTE INFLAMÁVEL E PERIGOSO PARA A SAÚDE HUMANA.

ELEMENTOS APROPRIADOS DA ROTULAGEM

Pictogramas:



Palavra de advertência:

PERIGO

Frase de advertência:

Líquido combustível.

Causa irritação à pele.

Suspeito de causar câncer.

Pode causar irritação respiratória (irritação da área respiratória).

Pode causar sonolência e vertigem (efeitos narcóticos).

Pode ser mortal em caso de ingestão e por penetração nas vias respiratórias.

Frase de precaução:

Mantenha afastado de calor [faíscas] [e chama] [não fume].

Armazene em local fresco/baixa temperatura, em local bem ventilado [seco] [afastado de fontes de calor e de ignição].

Quando em uso não [fume] [coma] [ou beba].

Não use em local sem ventilação adequada.

Evite contato com olhos e pele.

Use equipamento de proteção individual apropriado.

Se ingerido, lave a boca com água [somente se a vítima estiver consciente].

Em caso de indisposição, consulte um médico.

Use meios de contenção para evitar contaminação ambiental.

Não permita o contato do produto com corpos d'água.



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 3 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

3 - COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÃO SOBRE OS INGREDIENTES

>>> SUBSTÂNCIA DE PETRÓLEO

Grupo de substância de petróleo:

Gasóleos: Óleo diesel

Gasóleos e óleos destilados são misturas complexas de petróleo, compostas primariamente de hidrocarbonetos saturados (parafínicos ou naftênicos) ou aromáticos com cadeia carbônica composta de 9 a 30 átomos de carbono e ponto de ebulição entre 150 e 471°C.

Número de registro CAS:

68334-30-5

Impurezas que contribuam para o perigo:

Ingredientes	Concentração (%)	CAS
Hidrocarbonetos aromáticos	---	NA
Hidrocarbonetos parafínicos	---	NA
Hidrocarbonetos naftênicos;	---	NA
Enxofre	Máx 500 mg/kg	7704-34-9, orgânico

4 - MEDIDAS DE PRIMEIROS SOCORROS

Inalação:

Remova a vítima para local arejado e mantenha-a em repouso. Monitore a função respiratória. Se a vítima estiver respirando com dificuldade, forneça oxigênio. Se necessário aplique respiração artificial. Procure atenção médica. Leve esta FISPQ.

Contato com a pele:

Remova as roupas e sapatos contaminados. Lave a pele exposta com grande quantidade de água, por pelo menos 15 minutos. Procure atenção médica. Leve esta FISPQ.

Contato com os olhos:

Lave com água corrente por pelo menos 15 minutos, mantendo as pálpebras abertas. Retire lentes de contato quando for o caso. Procure atenção médica imediatamente. Leve esta FISPQ.

Ingestão:

Lave a boca da vítima com água em abundância. NÃO INDUZA O VÔMITO. Procure atenção médica. Leve esta FISPQ.

Proteção do prestador de socorros e/ou notas para o médico:

Evite contato com o produto ao socorrer a vítima. Mantenha a vítima em repouso e aquecida. Não forneça nada pela boca a uma pessoa inconsciente. O tratamento sintomático deve compreender, sobretudo, medidas de suporte como correção de distúrbios hidroeletrólíticos, metabólicos, além de assistência respiratória.

5 - MEDIDAS DE COMBATE A INCÊNDIO

Meios de extinção apropriados:

Líquido inflamável. Compatível com espuma para hidrocarbonetos, neblina d'água, pó químico e dióxido de carbono (CO₂).

Meio de extinção não recomendados:

Jatos d'água. Água diretamente sobre o líquido em chamas.



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 4 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

Perigos específicos:

Os vapores são mais densos que o ar e tendem a se acumular em áreas baixas ou confinadas, como bueiros, porões, etc. Podem deslocar-se por grandes distâncias provocando retrocesso da chama ou novos focos de incêndio tanto em ambientes abertos como confinados. Os contêineres podem explodir se aquecidos. Este produto contém gás sulfídrico, extremamente inflamável.

Métodos especiais de combate:

Contêineres e tanques envolvidos no incêndio devem ser resfriados com jatos d'água.

Proteção de bombeiro/brigadista:

Equipamento de proteção respiratória do tipo autônomo (SCBA) com pressão positiva e vestuário protetor completo.

6 - MEDIDAS DE CONTROLE PARA DERRAMAMENTO OU VAZAMENTO

Precauções pessoais

Remoção de fontes de ignição:

Produto inflamável. Remova todas as fontes de ignição. Impeça faúlhas ou chamas. Não fume.

Prevenção da inalação e do contato com a pele, mucosas e olhos:

Não toque nos recipientes danificados ou no material derramado sem o uso de vestimentas adequadas. Evite inalação, contato com os olhos e com a pele. Utilize equipamento de proteção individual conforme descrito na seção 8.

Precauções ao meio ambiente::

Evite que o produto derramado atinja cursos d'água e rede de esgotos.

Métodos para limpeza:

Procedimentos a serem adotados:

Colete o produto derramado e coloque em recipientes próprios. Adsorva o produto remanescente, com areia seca, terra, vermiculite, ou qualquer outro material inerte. Coloque o material adsorvido em recipientes apropriados e remova-os para local seguro.

Prevenção de perigos secundários:

Não descarte diretamente no meio ambiente ou na rede de esgoto. A água de diluição proveniente do combate ao fogo pode causar poluição.

7 - MANUSEIO E ARMAZENAMENTO

Medidas técnicas apropriadas - MANUSEIO

Prevenção da exposição do trabalhador:

Evite inalação e o contato com a pele, olhos e roupas. Evite respirar vapores/névoas do produto. Utilize equipamento de proteção individual ao manusear o produto, descritos na seção 8.

Precauções e orientações para manuseio seguro:

Manuseie o produto somente em locais bem arejados ou com sistemas de ventilação geral/local adequado. Evite formação de vapores ou névoas.

Medidas de higiene:

Não coma, beba ou fume durante o manuseio do produto. Lave bem as mãos antes de comer, beber, fumar ou ir ao banheiro. Roupas



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 5 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

contaminadas devem ser trocadas e lavadas antes de sua reutilização.

Medidas técnicas apropriadas – ARMAZENAMENTO

Apropriadas:

Mantenha o produto em local fresco, seco e bem ventilado, distante de fontes de calor e ignição. Mantenha os recipientes bem fechados e devidamente identificados. O local de armazenamento deve ter piso impermeável e com dique de contenção para reter em caso de vazamento. O local de armazenamento deve conter bacia de contenção para reter o produto, em caso de vazamento.

Inapropriadas:

Temperaturas elevadas. Fontes de ignição. Contato com materiais incompatíveis.

Materiais seguros para embalagens

Recomendados:

Não especificado.

8 - CONTROLE DE EXPOSIÇÃO E PROTEÇÃO INDIVIDUAL

Parâmetros de controle específicos

Limite de exposição ocupacional:

Ingredientes	TLV – TWA (ACGIH)	TLV – STEL (ACGIH)
Névoa de óleo	5mg/m ³	10mg/m ³

Medida de controle de engenharia:

Promova ventilação combinada com exaustão local, especialmente quando ocorrer formação de vapores/névoas do produto. É recomendado tornar disponíveis chuveiros de emergência e lava olhos na área de trabalho.

Equipamento de proteção individual apropriado

Proteção respiratória:

Recomenda-se a utilização de respirador com filtro para vapores orgânicos para exposições médias acima da metade do TLV-TWA. Nos casos em que a exposição exceda 3 vezes o valor TLV-TWA, utilize respirador do tipo autônomo (SCBA) com suprimento de ar, de peça facial inteira, operado em modo de pressão positiva. Siga orientação do Programa de Prevenção Respiratória (PPR), 3ª ed. São Paulo: Fundacentro, 2002.

Proteção das mãos:

Luvas de proteção de PVC.

Proteção dos olhos:

Óculos de proteção com proteção lateral.

Proteção da pele e corpo:

Vestimenta impermeável.

Precauções especiais:

Evite usar lentes de contato enquanto manuseia este produto.



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 6 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

9 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Aspecto:	Líquido límpido (isento de material em suspensão)
Odor:	Característico
Ph:	Não aplicável.
Ponto de fusão/ponto de congelamento:	- 40 – 6°C
Ponto de ebulição inicial e faixa de temperatura de ebulição:	150 – 471°C
Ponto de fulgor:	38 °C Mín.; Método NBR 7974.
Taxa de evaporação:	Não disponível.
Inflamabilidade:	Não aplicável.
Limite inferior/superior de inflamabilidade ou explosividade:	Não disponível.
Pressão de vapor:	0,4 kPa a 40°C
Densidade de vapor:	Não disponível.
Densidade relativa:	0,820-0,865 a 20 °C (Método NBR-7148)
Solubilidade:	Insolúvel em água. Solúvel em solventes orgânicos.
Coeficiente de partição – n-octanol/água:	Log kow: 7,22 (dado estimado).
Temperatura de auto-ignição:	≥ 225°C
Temperatura de decomposição:	400°C
Viscosidade:	2,5–5,5 cSt a 40°C (Método: ASTM D-445)
Faixa de destilação:	100 - 400 °C @ 101,325 kPa (760 mmHg); Método: NBR-9619.

10 - ESTABILIDADE E REATIVIDADE

Estabilidade química:	Estável sob condições usuais de manuseio e armazenamento. Não sofre polimerização.
Materiais/substâncias incompatíveis:	Agentes oxidantes fortes como peróxidos, cloratos e ácido crômico.



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 7 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

Produtos perigosos da decomposição: Em combustão libera hidrocarbonetos leves e pesados e coque.

11 - INFORMAÇÕES TOXICOLÓGICAS

Toxicidade aguda:

Como depressor do sistema nervoso central, pode causar efeitos narcóticos como dor de cabeça e tontura. Pode causar confusão mental e perda de consciência em altas concentrações. O produto pode causar irritação das vias aéreas superiores se inalado causando tosse, dor de garganta e falta de ar. Causa irritação a pele com vermelhidão e dor no local atingido. Pode causar leve irritação ocular. Pode ser fatal se aspirado. Pode causar a morte se ingerido ou inalado. Este produto contém gás sulfídrico, extremamente tóxico.

DL₅₀(oral, ratos): > 7500 mg/kg

DL₅₀ (dérmica, coelhos): > 4100 mg/kg

Toxicidade crônica:

Pode causar dermatite após contato repetido e prolongado com a pele.

Efeitos específicos:

Carcinogenicidade: Possível carcinógeno humano (Grupo 2B - IARC).

12 - INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS

Efeitos ambientais, comportamentos e impactos do produto

Ecotoxicidade:

Em caso de grandes derramamentos o produto pode ser perigoso para o meio ambiente devido à possível formação de uma película do produto na superfície da água diminuindo os níveis de oxigênio dissolvido.

Persistência e degradabilidade:

É esperada baixa degradação e alta persistência.

Potencial bioacumulativo:

É esperado potencial de bioacumulação em organismos aquáticos.

Log kow: 7,22 (dado estimado).

13 - CONSIDERAÇÕES SOBRE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO

Métodos recomendados para tratamento e disposição aplicados ao

Produto:

Evite a exposição ocupacional ou a contaminação ambiental. Recicle qualquer parcela não utilizada do material para seu uso aprovado ou retorná-lo ao fabricante ou ao fornecedor. Outros métodos consultar legislação federal e estadual: Resolução CONAMA 005/1993, NBR 10.004/2004.

Restos de produtos:

Manter restos do produto em suas embalagens originais, fechadas e dentro de tambores metálicos, devidamente fechados, de acordo com a legislação aplicável. O descarte deve ser realizado conforme o estabelecido para o produto, recomendando-se as rotas de processamento em cimenteiras e a incineração.

Embalagem usada:

Nunca reutilize embalagens vazias, pois elas podem conter restos do produto e devem ser mantidas fechadas e encaminhadas para serem destruídas em local apropriado. Neste caso, recomenda-se envio



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 8 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

para rotas de recuperação dos tambores ou incineração.

14 - INFORMAÇÕES SOBRE TRANSPORTE

Regulamentações nacionais e internacionais

Terrestre:

Decreto nº 96.044, de 18 de maio de 1988: Aprova o regulamento para o transporte rodoviário de produtos perigosos e dá outras providências.

Agência Nacional de transportes terrestres (ANTT): Resoluções Nº. 420/04, 701/04, 1644/06, 2657/08, 2975/08 e 3383/10.

Hidroviário:

DPC – Diretoria de Portos e Costas (Transporte em águas brasileiras)

Normas de Autoridade Marítima (NORMAM)

NORMAM 01/DPC: Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto.

NORMAM 02/DPC: Embarcações Empregadas na Navegação Interior.

IMO – “International Maritime Organization” (Organização Marítima Internacional)

International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG Code) – Incorporating Amendment 34-08;2008 Edition.

Aéreo:

DAC -Departamento de Aviação Civil: IAC 153-1001.

Instrução de Aviação Civil – Normas para o transporte de artigos perigosos em aeronaves civis.

IATA – “ International Air Transport Association” (Associação Nacional de Transporte Aéreo)

Dangerous Goods Regulation (DGR) - 51

Número ONU:

1202

Nome apropriado para embarque:

ÓLEO DIESEL

Classe e subclasse de risco principal e subsidiário:

3

Número de risco:

30

Grupo de embalagem:

III

15 - REGULAMENTAÇÕES

Regulamentações:

Regulamentações: Decreto Federal nº 2.657, de 3 de julho de 1998

Norma ABNT-NBR 14725-4:2012

16 - OUTRAS INFORMAÇÕES

Informações importantes:

Esta FISPQ foi elaborada baseada nos conhecimentos atuais do produto químico e fornece informações quanto à proteção, à segurança, à saúde e ao meio ambiente.



Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ

PRODUTO: **ÓLEO DIESEL S500**

Página 9 de 9

Data: 09/10/2014

Nº FISPQ: BR0109

Versão: 4

Anula e substitui versão: todas anteriores

Adverte-se que o manuseio de qualquer substância química requer o conhecimento prévio de seus perigos pelo usuário. Cabe à empresa usuária do produto promover o treinamento de seus empregados e contratados quanto aos possíveis riscos advindos do produto.

Siglas:

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists

CAS - Chemical Abstracts Service

DL50 - Dose letal 50%

STEL – Short Term Exposure Level

TLV - Threshold Limit Value

TWA - Time Weighted Average

Bibliografia:

ECB] EUROPEAN CHEMICALS BUREAU. Diretiva 67/548/EEC (substâncias) e Diretiva 1999/45/EC (preparações). Disponível em: <http://ecb.jrc.it/>. Acesso em: outubro de 2010.

[EPI-USEPA] ESTIMATION PROGRAMS INTERFACE Suite - United States Environmental Protection Agency. Software.

[HSDB] HAZARDOUS SUBSTANCES DATA BANK. Disponível em: <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>. Acesso em: outubro de 2010.

[IARC] INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. Disponível em: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>. Acesso em: outubro de 2010.

[IPCS] INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY – INCHEM. Disponível em: <http://www.inchem.org/>. Acesso em: outubro de 2010.

[IPIECA] INTERNATIONAL PETROLEUM INDUSTRY ENVIRONMENTAL CONSERVATION ASSOCIATION. Guidance on the application of Globally Harmonized System (GHS) criteria to petroleum substances. Version 1. June 17th 2010. Disponível em: http://www.ipieca.org/system/files/publications/ghs_guidance_17_june_2010.pdf. Acesso em: outubro de 2010.

[IUCLID] INTERNATIONAL UNIFORM CHEMICAL INFORMATION DATABASE. [s.l.]: European chemical Bureau. Disponível em: <http://ecb.jrc.ec.europa.eu>. Access in: outubro de 2010.

[NIOSH] NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL AND SAFETY. International Chemical Safety Cards. Disponível em: <http://www.cdc.gov/niosh/>. Acesso em: outubro de 2010.

[NITE-GHS JAPAN] NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY AND EVALUATION. Disponível em: http://www.safe.nite.go.jp/english/ghs_index.html. Acesso em: outubro de 2010.

[PETROLEUM HPV] PETROLEUM HIGH PRODUCTION VOLUME. Disponível em: <http://www.petroleumhpv.org/pages/petroleumsubstances.html>. Acesso em: outubro de 2010.

[REACH] REGISTRATION, EVALUATION, AUTHORIZATION AND RESTRICTION OF CHEMICALS. Commission Regulation (EC) No 1272/2008 of 16 December 2008 amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals.

[SIRETOX/INTERTOX] SISTEMA DE INFORMAÇÕES SOBRE RISCOS DE EXPOSIÇÃO QUÍMICA. Disponível em: <http://www.intertox.com.br>. Acesso em: outubro de 2010.

[TOXNET] TOXICOLOGY DATA NETWORKING. ChemIDplus Lite. Disponível em: <http://chem.sis.nlm.nih.gov/>. Acesso em: outubro de 2010.