



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Estudos de Casos de Remediação de Áreas Contaminadas por Derivados de Petróleo em Postos Revendedores de Combustíveis

Autor: Luis Otávio Capelari Rosin

Orientador: Dra. Mariliz Gutterres Soares

Porto Alegre, novembro de 2021

Autor: Luis Otávio Capelari Rosin

Estudos de Casos de Remediação de Áreas Contaminadas por Derivados de Petróleo em Postos Revendedores de Combustíveis

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química*

Orientador: Dra. Mariliz Gutterres Soares

Banca Examinadora:

Dra. Caroline Trevisan Weber, UFRGS

Dra. Tatiana Calvete, UFRGS

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo carinho e apoio incondicionais durante toda a minha vida.

À professora Dra. Mariliz Gutterres Soares, pela orientação deste trabalho.

À Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM), pela disponibilização dos materiais necessários para realização deste trabalho.

Aos excelentes professores do Departamento de Engenharia Química da UFRGS, pelos valiosos ensinamentos.

RESUMO

Muitas áreas são contaminadas em decorrência da atividade de postos revendedores de combustíveis, que estão localizados em todo território nacional e comercializam grandes quantidades de derivados de petróleo. Dessa maneira, o presente trabalho visou apresentar o estudo de dois empreendimentos do ramo varejista de combustíveis, onde houve a necessidade de se empregar técnicas de remediação. O trabalho foi baseado em documentos contidos nos processos de licenciamento ambiental dos postos selecionados. A escolha dos empreendimentos foi feita através de consulta ao banco de dados da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM). Em ambos os casos de postos de combustíveis no estado do Rio Grande do Sul se utilizou a combinação das técnicas de extração multifásica seguida por oxidação química *in situ*, com percarbonato de sódio como agente oxidante. Embora a contaminação tenha sido limitada a área do próprio empreendimento para ambos os casos, o Caso I apresentou níveis de contaminantes muito menores, e, devido a este fato, a duração do processo de remediação foi menor do que a do Caso II. Os dois empreendimentos obtiveram resultados satisfatórios, visto que eliminaram por completo a presença de fase livre (material oleoso sobrenadante) e passaram a apresentar concentrações de hidrocarbonetos inferiores aos padrões legais. Ambos os locais foram reclassificados como área em monitoramento para reabilitação (AMR). Pela análise dos casos apresentados, ficou evidenciada a necessidade de monitoramento contínuo em empreendimentos potencialmente poluidores e a importância da atuação do órgão ambiental para controle da qualidade do meio ambiente.

Palavras-chave: *remediação, contaminação ambiental, postos revendedores de combustíveis, contaminantes.*

ABSTRACT

Many areas are contaminated as a result of the activity of fuel reseller stations, which are located throughout the national territory and sell large quantities of oil derivatives. Thus, the present work aimed to present the study of two enterprises in the fuel retail sector, where there was a need to employ remediation techniques. The work was based on documents contained in the environmental licensing processes of the selected fuel stations. The choice of cases was made by consulting Henrique Luiz Roessler State Foundation for Environmental Protection (FEPAM) database. A combination of the remediation techniques multiphase extraction and in situ chemical oxidation (ISCO) was used in both cases of gas stations in the state of Rio Grande do Sul. The oxidizing agent used on the ISCO procedures was sodium percarbonate. Although the contamination was limited to the area of the enterprise itself for both cases, Case I had much lower levels of contaminants and, due to this fact, the duration of the remediation process was shorter than the duration of the Case II. Both projects achieved satisfactory results, as they completely eliminated the presence of the free phase (supernatant oily material) and began to present hydrocarbon concentrations below legal standards. Both locations were reclassified as areas under monitoring for rehabilitation (AMR). The analysis of the presented cases showed the need for continuous monitoring in potentially polluting enterprises and the importance of the environmental agency's role in controlling the quality of the environment.

Keywords: remediation, environmental contamination, fuel stations, contaminants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das zonas hidrogeológicas do subsolo.....	12
Figura 2: Migração de LNAPLs (esquerda) e DNAPLs (direita) no subsolo.....	13
Figura 3: Classificação de áreas contaminadas no Estado de São Paulo.....	14
Figura 4: Origem da contaminação de áreas em processo de remediação no Estado de São Paulo.....	15
Figura 5: Técnicas de remediação de áreas degradadas devido à operação.....	16
Figura 6: Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis em posto revendedor.....	20
Figura 7: Croqui do empreendimento I.....	23
Figura 8: Pluma de contaminação de TPH em água subterrânea.....	25
Figura 9: Fluxograma simplificado do método de extração multifásica.....	25
Figura 10: Croqui do empreendimento II.....	28
Figura 11: Película de fase livre no PM-04.....	29
Figura 12: Gráfico que relaciona os parâmetros operacionais da extração multifásica ...	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores Orientados para Investigação Ambiental para solo e água subterrânea	11
Tabela 2: Quantidade de empreendimentos do ramo “Comércio Varejista	21
Tabela 3: Espessura (cm) da fase livre durante a operação da extração multifásica	26
Tabela 4: Resultados analíticos de hidrocarbonetos dissolvidos em água subterrânea, durante o processo de remediação.....	26
Tabela 5: Resultados analíticos para água subterrânea – Fase AMR.....	27
Tabela 6: Espessura da fase livre (cm) entre setembro de 2015 até julho de 2017	30
Tabela 7: Concentrações dos poluentes detectados nas coletas amostrais na água subterrânea (em µg/L).....	31
Tabela 8: Informações sobre a etapa de Oxidação Química <i>in Situ</i>	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Área Contaminada sob Intervenção
AI	Área Contaminada sob Investigação
AMR	Área em Monitoramento para Reabilitação
AR	Área Reabilitada
AS	Área Suspeita de Contaminação
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSAO	Caixa Separadora de Água e Óleo
DNALP	Líquido denso imiscível em água, <i>dense non-aqueous phase liquid</i>
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
ISCO	Oxidação Química <i>In Situ</i> , <i>In Situ Chemical Oxidation</i>
LD	Limite de Detecção
LNAPL	Líquido leve imiscível em água, <i>light non-aqueous phase liquid</i>
LO	Licença de Operação
NBR	Norma Brasileira
NC	Não contaminado(a)
nd	Não Detectado(a)
PAHs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos, <i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbon</i>
PM	Poço de Monitoramento
POAs	Processos Oxidativos Avançados
PR	Poço de Remediação
SASC	Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis
SQI	Substância(s) química(s) de interesse
TPH	Hidrocarbonetos totais de petróleo, <i>Total Petroleum Hydrocarbon</i>
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis, <i>Volatile Organic Compounds</i> .
VR	Valor de Referência

SUMÁRIO

1	Introdução	9
2	Revisão Bibliográfica	10
2.1	Contaminação ambiental	10
2.1.1	Limites legais para derivados de petróleo	10
2.2	Aspectos gerais do subsolo	11
2.3	Comportamento dos contaminantes no meio ambiente	12
2.4	Remediação de áreas contaminadas	13
2.5	Cenário atual da remediação ambiental de áreas contaminadas por hidrocarbonetos	14
2.6	Técnicas de remediação para contaminação por hidrocarbonetos	16
2.6.1	Extração multifásica	16
2.6.2	Bombeamento e tratamento	17
2.6.3	Oxidação química in situ	17
2.6.4	Remoção e disposição do solo	18
2.6.5	Biorremediação	18
2.6.6	Extração de vapores do solo (SVE)	19
2.6.7	Air sparging	19
2.7	Estruturas de prevenção a contaminação de um posto de combustível	19
3	Materiais e Métodos	21
4	Estudo de Casos e Discussão dos Resultados	23
4.1	Estudo de Caso I	23
4.2	Estudo de Caso II	27
4.3	Comparação entre os casos	36
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	37
	REFERÊNCIAS	38
	ANEXO A	41

1 Introdução

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2021a), dentre as áreas licenciadas por esta instituição, mais de 70% dos locais que se encontravam em processo de remediação durante o ano de 2020 foram contaminadas pela atividade de postos revendedores de combustíveis. Apesar de expressivo, este número não é surpreendente, tendo em vista a quantidade de produtos comercializados e a distribuição geográfica em que se localizam esses empreendimentos.

Embora o setor automobilístico esteja passando por diversas mudanças, através da introdução de novas tecnologias e novos combustíveis, é seguro afirmar que os postos revendedores de combustíveis tradicionais permanecerão no país pelos próximos anos ou, até mesmo, décadas. Isso porque, segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) (2021), durante o período de janeiro a setembro de 2021, apenas 1,6% dos licenciamentos de veículos novos foram referentes a carros elétricos. Mesmo com o aumento esperado desta taxa, será necessário um longo período para ocorrer a substituição total da frota brasileira, que hoje é composta majoritariamente por veículos de motor à combustão.

Sendo assim, é imperativo que a os postos revendedores adotem políticas de prevenção à poluição e, caso necessário, tomem medidas adequadas para remediação de sítios afetados. Dessa maneira, o presente trabalho tem por objetivo apresentar e discutir dois estudos de casos de postos de combustíveis nos quais foram realizados processos de remediação, a fim de verificar a aplicabilidade das técnicas adotadas e a assertividade das escolhas de gestão dos tratamentos adotados para a manutenção da qualidade do meio ambiente.

A escolha dos empreendimentos apresentados foi feita através de consulta ao banco de dados da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM). O conteúdo fático do trabalho, tal como descrição dos empreendimentos, técnicas de remediação adotadas, procedimentos operacionais, resultados obtidos, entre outros, foram baseados em documentos contidos nos autos dos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos selecionados. Tais documentos foram elaborados por consultorias ambientais, laboratórios cadastrados na FEPAM e pelos próprios analistas do órgão ambiental. Por questões de confidencialidade, nenhum deles será identificado. Os textos e tabelas apresentados neste trabalho são de autoria própria, com base nos documentos citados.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo aborda os conceitos básicos necessários para o entendimento deste trabalho, definindo o que é contaminação ambiental e as principais legislações associadas, os valores de referência para as substâncias de interesse, aspectos gerais do subsolo e a migração dos contaminantes no meio ambiente. Além disso, esta seção contempla o cenário atual da remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos e breve explanação das principais técnicas de tratamento para sítios degradados por derivados de petróleo.

2.1 Contaminação ambiental

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), define-se como área contaminada a área, local, terreno, edificação, instalação ou benfeitoria onde há, comprovadamente, a presença de substâncias em quantidades ou em concentrações capazes de causar danos à saúde humana. A contaminação pode ocorrer de forma planejada, acidental ou natural e pode estar concentrada no solo, águas subterrâneas e atmosfera (CETESB, 2021b).

No mesmo sentido, a NBR 15515-1 define áreas contaminadas como sendo sítios que apresentam concentrações de substâncias químicas de interesse (SQI) superiores a um valor de referência, que representa risco a saúde humana ou ao meio ambiente. A norma em questão trata sobre procedimentos para avaliação preliminar de passivos ambientais em solo e água subterrânea e foi elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2007).

2.1.1 Limites legais para derivados de petróleo

Geralmente, em casos de contaminação por derivados de petróleo, as substâncias químicas de interesse (SQI) são os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAHs - *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*), Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH - *Total Petroleum Hydrocarbon*) e os compostos BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos). Os valores de referência para estes compostos advêm de diferentes legislações (Correa, 2017).

Para a série BTEX e para PAHs, os valores orientados de investigação são determinados pela Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Esta resolução é comumente denominada de CONAMA 420. Os valores padrão estão mostrados na Tabela 1. Tendo em vista que a resolução CONAMA 420 não aborda TPH, utiliza-se como referência para este parâmetro a Lista Holandesa de Valores de Qualidade do Solo e Água Subterrânea – Valores STI. O documento publicado pelo governo holandês foi introduzido como referência para TPH no “Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, elaborado pela CETESB e, após este fato, outros órgãos ambientais passaram a adotar a mesma referência, como é o caso da FEPAM. A lista estabelece como limite de intervenção para TPH os valores de 600 µg. L⁻¹ em água subterrânea e de 5.000 mg. kg⁻¹ em solo (CETESB, 2001)

Tabela 1: Valores Orientados para Investigação Ambiental para solo e água subterrânea

Substância	Solo (mg. kg ⁻¹ de peso seco)			Água subterrânea (µg. L ⁻¹)	
	Agrícola	Residencial	Industrial		
BTEX	Benzeno	0,06	0,08	0,15	5
	Tolueno	30	30	75	700
	Etilbenzeno	35	40	95	300
	Xilenos	25	30	70	500
PAHS	Benzo(a)antraceno	9	20	65	1,75
	Benzo(a)pireno	0,40	1,50	3,50	0,70
	Dibenzo(a,h)antraceno	0,15	0,60	1,30	0,18
	Fenantreno	15	40	95	140
	Ideno(1,2,3-c,d)pireno	2	25	30	0,17
	Naftaleno	30	60	90	140

Fonte: Adaptado de CONAMA (2009)

2.2 Aspectos gerais do subsolo

De acordo com suas características hidrogeológicas, o subsolo pode ser simplifiadamente dividido em duas regiões: zona saturada e zona não saturada. A zona saturada localiza-se abaixo da superfície freática¹ e é caracterizada pelo completo preenchimento dos espaços vazios do terreno por água. Já a zona não saturada está situada acima da zona saturada, entre a superfície freática e a superfície do terreno, e apresenta seus poros parcialmente preenchidos por água e gases (Feitosa et al., 2008). Uma representação esquemática é apresentada na Figura 1.

¹Superfície freática: lugar geométrico dos pontos em que a água subterrânea se encontra submetida à pressão atmosférica (Feitosa et al., 2008).

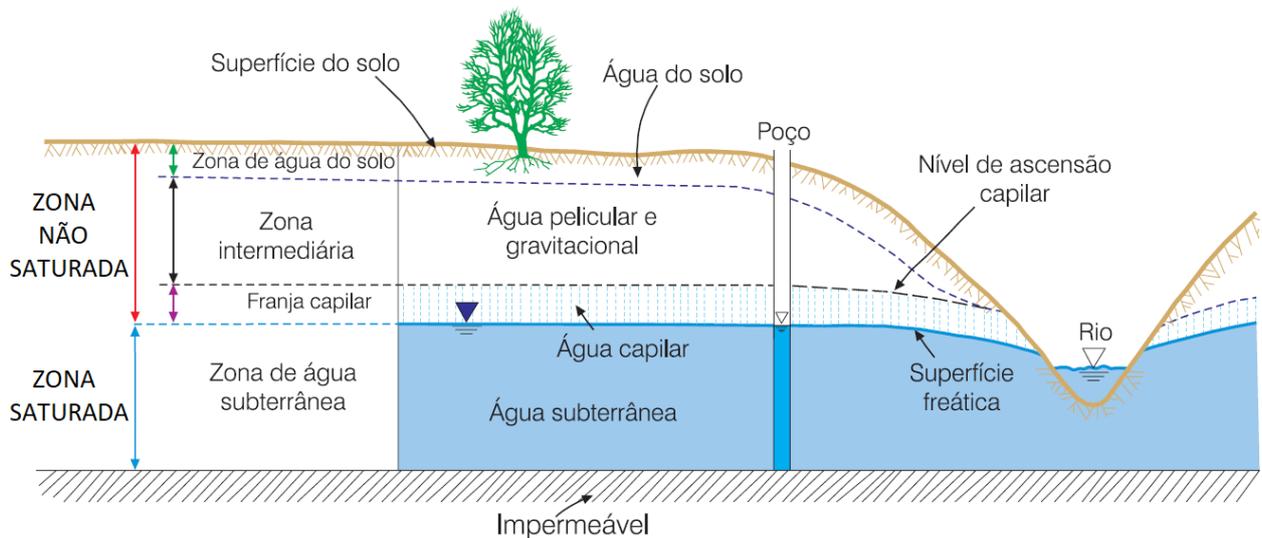


Figura 1: Representação das zonas hidrogeológicas do subsolo
 Fonte: Adaptado de (Feitosa *et al.*, 2008)

2.3 Comportamento dos contaminantes no meio ambiente

A contaminação oriunda de combustíveis derivados de petróleo difere-se daquela causada por outros produtos, principalmente porque a maioria dos hidrocarbonetos é imiscível em água (Hansen, 2013). Além disso, o comportamento dos contaminantes varia de acordo com as características físico-químicas dos hidrocarbonetos e da composição do solo, possibilitando a formação de contaminação limitada a regiões próximas à origem ou que afete localidades distantes do foco inicial (Calijuri *et al.*, 2013).

Se o volume de contaminante for suficiente para que a zona não saturada seja totalmente percorrida, o comportamento dos poluentes dependerá, fundamentalmente, da própria densidade. Os compostos menos densos (LNAPLs – *light non-aqueous phase liquids*) tendem a formar uma fase livre, como sobrenadante. Já as substâncias mais densas (DNAPLs – *dense non-aqueous phase liquids*) acumulam-se majoritariamente na parte inferior da zona saturada, percolando a água subterrânea (Calijuri *et al.*, 2013).

O comportamento dos líquidos densos e leves estão comparativamente apresentados na Figura 2.

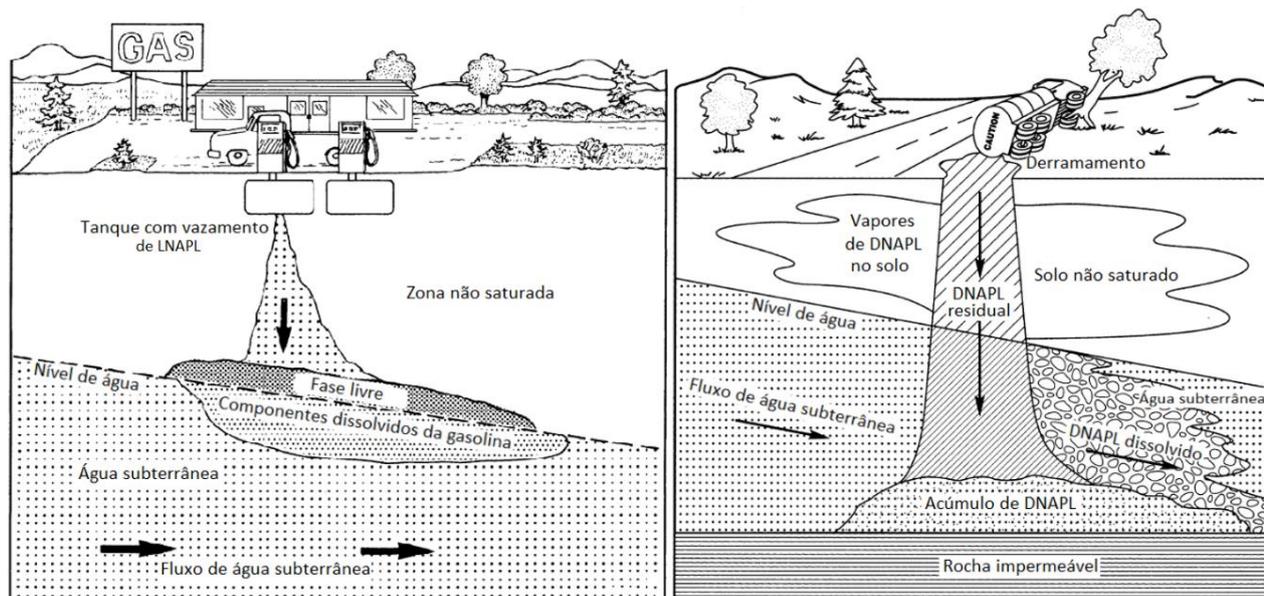


Figura 2: Migração de LNAPLs (esquerda) e DNAPLs (direita) no subsolo

Fonte: Adaptado de Fetter (2001)

2.4 Remediação de áreas contaminadas

Remediação ambiental pode ser definida como um conjunto de medidas de intervenção para reabilitação de uma área contaminada. As técnicas empregadas visam a remoção, contenção ou redução das concentrações de contaminantes para que se obtenha um risco tolerável para o uso presente e futuro da área (Maximiano e Moraes, 2014).

Paralelamente às medidas de remediação, empregam-se medidas de engenharia e de controle institucional. Diferentemente das medidas de remediação, que visam à diminuição das substâncias químicas de interesse no ambiente, estas almejam mitigar o risco de exposição de um receptor aos contaminantes. Exemplos destas medidas são escavação ou encapsulamento da região contaminada, restrições de acesso ao terreno e restrições de uso da área (Yoshikawa e Maximiano, 2014).

A remediação ambiental pode ser categorizada pelo local de aplicação, da seguinte maneira (Maximiano e Moraes, 2014):

- I) **In situ**: a técnica de remediação é aplicada sem remoção física do meio contaminado.
- II) **Ex situ**: quando ocorre remoção física do meio contaminado, podendo dar-se de duas formas:
 - On site**: o meio contaminado que foi removido é remediado na área onde ocorreu a contaminação.
 - Off site**: o meio contaminado que foi removido é enviado para tratamento em outra localidade.

2.5 Cenário atual da remediação ambiental de áreas contaminadas por hidrocarbonetos

A resolução CONAMA nº 273, de 29 de novembro de 2000, afirma que toda a instalação de armazenamento de derivados de petróleo e outros combustíveis é considerada como potencialmente poluidora e potencialmente geradora de acidentes ambientais. Dessa maneira, o empreendimento deverá ser licenciado pelo órgão ambiental competente (CONAMA, 2000).

Como o órgão ambiental competente varia de acordo com a região geográfica em que o empreendimento se localiza, as informações sobre contaminação e remediação de postos de combustíveis não são integradas nacionalmente. A CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – é um dos órgãos ambientais que fornece dados mais completos sobre áreas contaminadas. Dessa maneira, as informações apresentadas nesta seção do trabalho foram divulgadas por esta entidade.

No ano de 2020, 6.434 localidades foram contabilizadas no sistema de cadastro de áreas contaminadas no estado de São Paulo. Destas, 1.463 encontravam-se em processo de remediação ativa, ou seja, aproximadamente 22,7% do total de áreas deterioradas. Isso é mostrado na Figura 3.

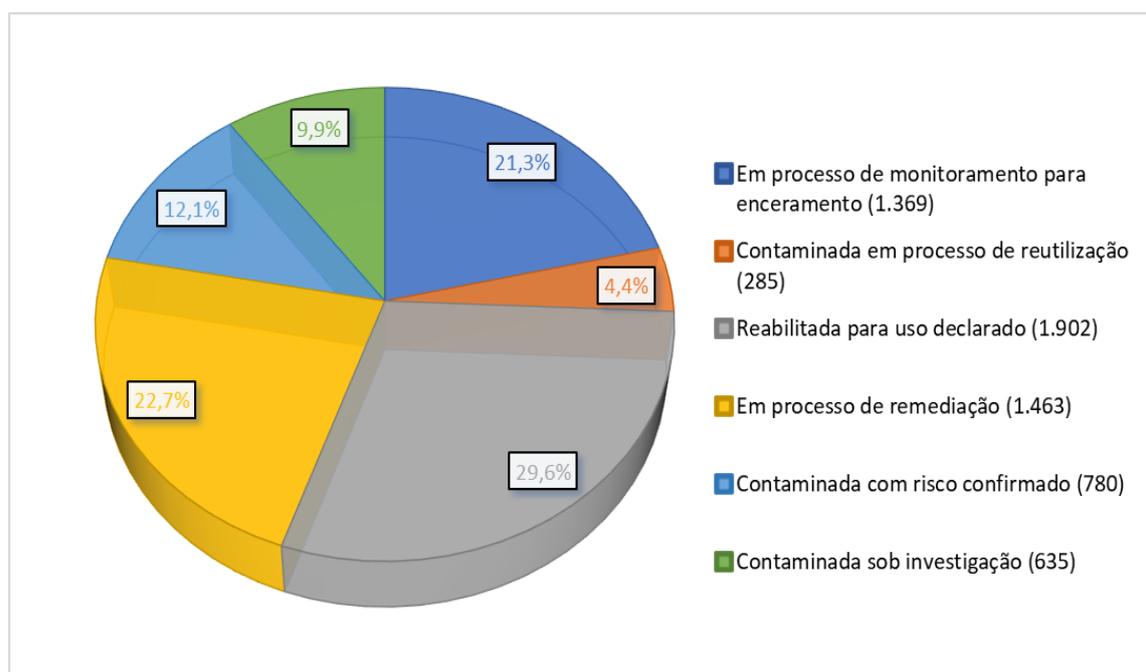


Figura 3: Classificação de áreas contaminadas no Estado de São Paulo

Fonte: Adaptado de CETESB (2021a)

É possível verificar na Figura 4 que, dentre as 1.463 áreas em processo de remediação, 1.054 foram contaminadas devido a atividade de postos de combustíveis. Isto representa mais de 70% do total de empreendimentos com remediação ativa.

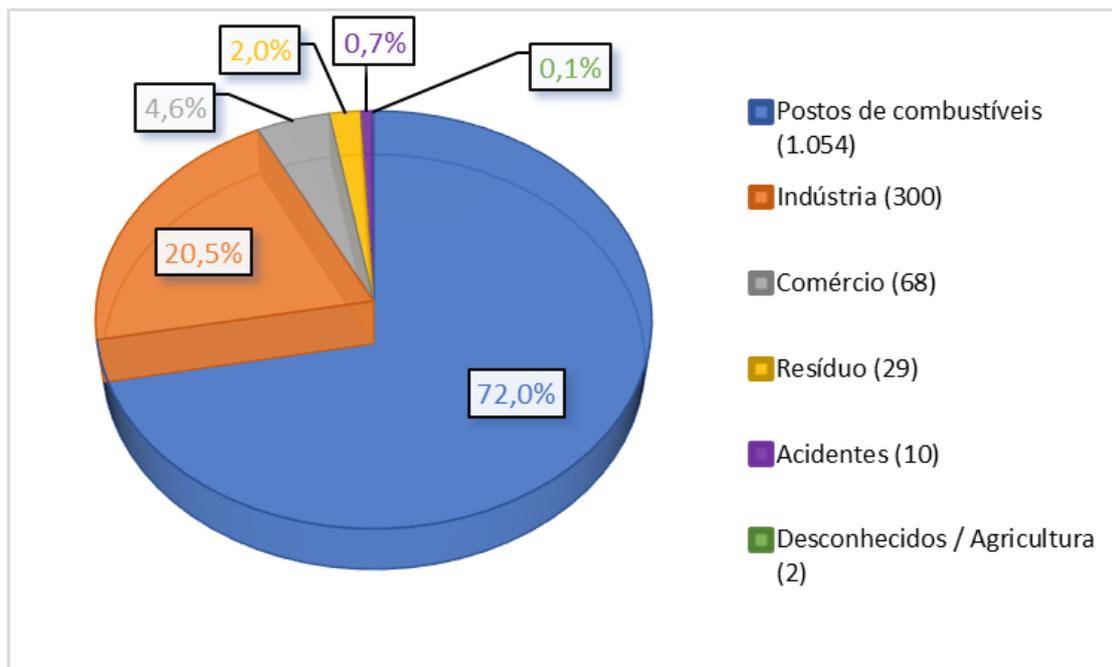


Figura 4: Origem da contaminação de áreas em processo de remediação no Estado de São Paulo

Fonte: Adaptado de CETESB (2021a)

Dentro do universo de áreas contaminadas pela atividade de postos de combustíveis em processo de remediação, destacam-se 5 técnicas: extração multifásica, bombeamento e tratamento, oxidação química, remoção de solo/resíduos e extração de vapores. Essas técnicas foram utilizadas em grande parte das áreas em remediação ativa no estado de São Paulo em 2020, como apresentado na Figura 5. É importante ressaltar que um sítio contaminado pode fazer uso de mais de uma técnica de remediação e que o efeito combinado de técnicas pode ser muito mais satisfatório do que o uso exclusivo de uma técnica, dependendo das condições específicas da contaminação.

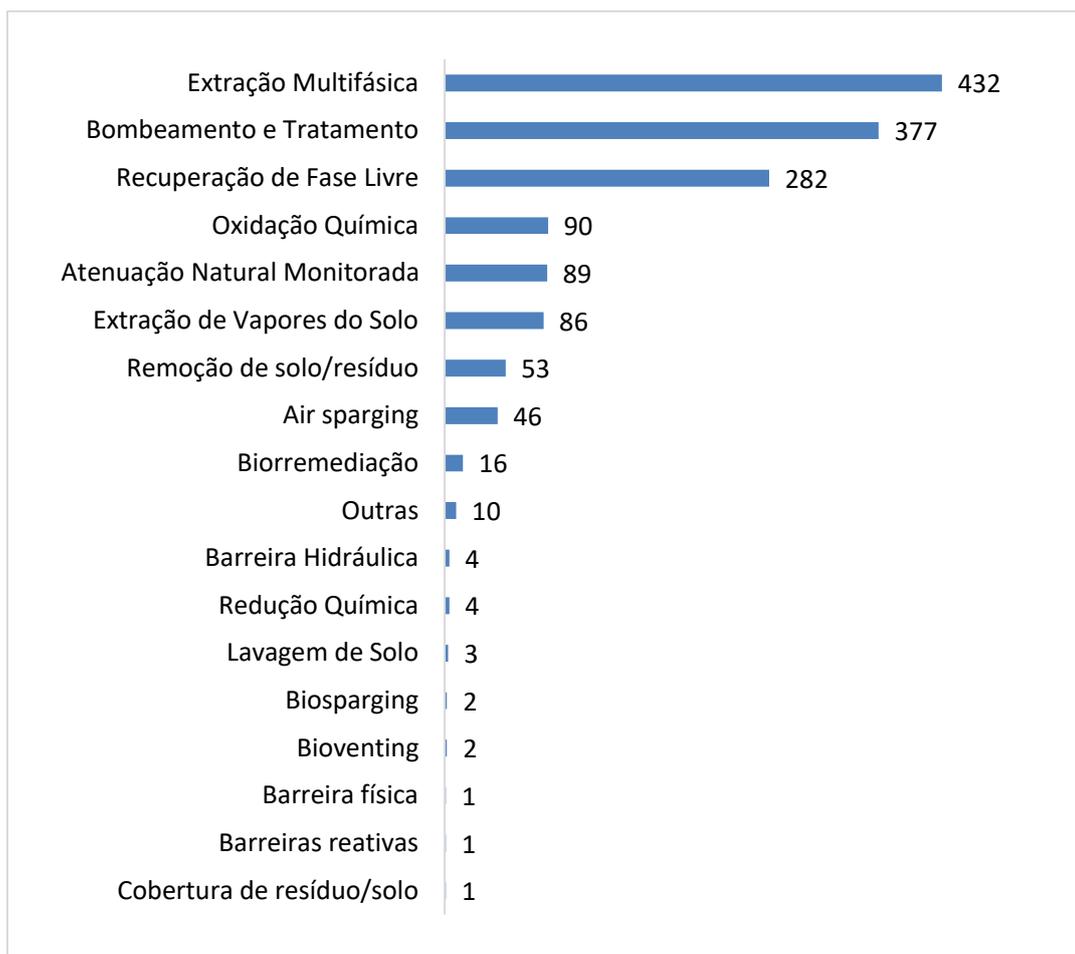


Figura 5: Técnicas de remediação de áreas degradadas devido à operação de postos de combustíveis no estado de São Paulo

Fonte: Adaptado de CETESB (2021a)

2.6 Técnicas de remediação para contaminação por hidrocarbonetos

Diversas técnicas podem ser utilizadas para remediação de um sítio contaminado, todavia a escolha do método mais adequado dependerá de uma série de fatores. São eles: tipo de contaminante, tipo de solo e a interação entre eles, grau de contaminação, viabilidade técnica e econômica, uso pretendido do terreno, entre outros (FIESP e CIESP, 2014). Ademais, outro fator a ser considerado para escolha da técnica são as propriedades físico-químicas dos contaminantes, que são mostradas na Tabela A.1 do Anexo A.

A seguir serão apresentadas algumas das técnicas mais utilizadas em áreas contaminadas por combustíveis derivados de petróleo.

2.6.1 Extração multifásica

Esta técnica consiste na instalação de poços de extração no local contaminado, seguido pela aplicação de vácuo nos mesmos. O gradiente de pressão gerado permite a remoção simultânea de vapores orgânicos, fase livre e água subterrânea (Correa, 2017).

O material removido é encaminhado para um tanque onde ocorre a separação da fase líquida e gasosa. Os gases passam por filtros de carvão ativado e são liberados na atmosfera. Já a fase líquida é encaminhada para uma caixa separadora, gerando um efluente oleoso e outro aquoso. O material oleoso é reservado para destinação adequada e a fase aquosa é encaminhada para tratamento convencional de efluentes líquidos (Hansen, 2013).

Este método se apresenta como alternativa de remediação eficiente, segura e de baixo custo. Todavia, a técnica perde eficiência em solos com pouca permeabilidade e, devido ao bombeamento simultâneo de fases, existe a possibilidade de formação de emulsão, o que dificulta a separação dos contaminantes (Hansen, 2013).

2.6.2 *Bombeamento e tratamento*

Consiste na remoção física da água contaminada até a superfície, por meio de poços de extração, para posterior tratamento convencional. Após esta etapa, a água tratada pode ser devolvida ao subsolo ou descartada em um corpo hídrico receptor. A técnica pode ser utilizada para remoção efetiva dos contaminantes, quando os poços de extração se localizam no centro da pluma de contaminação ou pode ser usada para conter a migração dos poluentes, quando os poços de extração estão situados nos limites da pluma, junto à sua fronteira de expansão (Correa, 2017; Dos Santos et al., 2021).

Esta metodologia é uma das mais antigas e amplamente utilizadas para remediação da zona saturada. O bombeamento é mais eficiente na remoção de grandes volumes de poluentes, no início da remediação pois, a partir de um período, a taxa de remoção das substâncias nocivas tende a um valor baixo e a concentração de poluentes no meio se estabiliza (Correa, 2017). O sistema de bombeamento e tratamento não é recomendado para solos heterogêneos e é mais eficaz quando utilizado em conjunto com outras técnicas (Tavares, 2013).

2.6.3 *Oxidação química in situ*

Também conhecida como ISCO (*In Situ Chemical Oxidation*), a técnica consiste na injeção de um oxidante químico diretamente no meio contaminado, convertendo os poluentes em espécies químicas menos perigosas. O mecanismo do processo está baseado na redução do agente oxidante e na oxidação dos contaminantes. Os agentes oxidantes mais utilizados são permanganato, persulfato, peróxido de hidrogênio e ozônio (Dos Santos et al., 2021).

A oxidação química *in situ* pode ser aplicada no tratamento de água subterrânea e de diferentes tipos de solo. A técnica se apresenta como alternativa de baixo custo quando comparada a outros métodos de remediação. Adicionalmente, o tempo de recuperação da área degradada geralmente é menor, visto que a velocidade da reação química é determinada pela escolha do agente oxidante (Correa, 2017; Hansen, 2013).

Quando utilizado na zona não saturada, o sucesso do tratamento dependerá da localização dos poços de injeção do agente oxidante. Isso porque, caso a dispersão do reagente não seja maximizada, a remediação ocorrerá por caminhos preferenciais e não atingirá toda a porção de solo contaminado (CETESB, 2001).

Uma categoria de oxidação química que vem atraindo o interesse de muitos pesquisadores e tem se mostrado uma alternativa de tratamento de contaminações é a classe denominada Processos Oxidativos Avançados (POAs). Essas técnicas envolvem reações específicas que geram espécies químicas oxidantes altamente reativas, em especial o radical livre hidroxila ($\cdot\text{OH}$) (Bartolomeu et al., 2018; Correa, 2017).

Os POAs são utilizados para remediação de substâncias tóxicas e recalcitrantes que podem ser resistentes a agentes oxidantes convencionais. Este método promove, frequentemente, a completa mineralização de compostos orgânicos. Por tratar-se de uma técnica não seletiva, os processos oxidativos avançados podem degradar uma enorme variedade de contaminantes, independente da presença de outros compostos (Teixeira e Jardim, 2004).

2.6.4 Remoção e disposição do solo

Técnica consagrada de recuperação ambiental que consiste na escavação e remoção do solo contaminado, seguido de seu transporte, tratamento *ex situ* e disposição final. Uma grande vantagem do método é a rápida remoção do foco de contaminação da zona não saturada (Correa, 2017).

Em contrapartida, o custo destas etapas pode tornar o procedimento economicamente inviável. Ademais, caso a etapa de remoção do solo não respeite os devidos procedimentos de segurança, a contaminação pode se propagar para áreas inicialmente não atingidas e também aumentar a exposição dos contaminantes, agravando o risco à humanos (Correa, 2017).

2.6.5 Biorremediação

É o processo no qual microrganismos e suas enzimas, em condições favoráveis, degradam contaminantes, transformando-os em substâncias atóxicas ou menos tóxicas. Os produtos mais comuns gerados na degradação são água, dióxido de carbono e metano. Esta técnica pode ser aplicada *in situ* ou *ex situ* e em diferentes tipos de solo. Em contrapartida, altas concentrações de contaminantes podem ser nocivas aos microrganismos, inibindo seu crescimento e prejudicando a técnica (Correa, 2017; Hansen, 2013).

Para aumentar a eficiência da técnica é possível realizar intervenções planejadas, tal como a própria introdução de microrganismos no meio contaminado, ou ações que promovam o aumento da capacidade metabólica das populações microbianas existentes, por exemplo a disponibilização de uma fonte de carbono ou fornecimento de oxigênio. Quando estas intervenções forem aplicadas abaixo da superfície freática, o procedimento é denominado *biosparging*, e quando elas ocorrem na zona não saturada, o procedimento é chamado de *bioventing* (CETESB, 2001).

Caso a biodegradação ocorra sem interferência humana, diz-se que há atenuação natural. A atenuação natural é uma forma passiva de biorremediação, e costuma iniciar lentamente, pois os microrganismos nativos precisam se adaptar à presença do novo contaminante. Então, os microrganismos passam a utilizar os poluentes como fonte de carbono e energia para criação de biomassa, diminuindo a concentração das substâncias nocivas no meio. Após a seleção e

adaptação dos microrganismos frente aos contaminantes, a taxa de biodegradação aumenta (Santana et al., 2020).

2.6.6 Extração de vapores do solo (SVE)

Esta metodologia de reabilitação *in situ* consiste na aplicação de vácuo em poços de extração localizados na zona não saturada. Isso gera uma circulação de ar através do subsolo, causando a volatilização dos contaminantes. Além de compostos orgânicos voláteis (VOCs), a técnica pode ser utilizada para compostos não voláteis que sofrem biodegradação aeróbica. A técnica é muito usada para a recuperação de sítios contaminados com BTEX, visto que estes são os componentes mais voláteis e solúveis da gasolina (Correa, 2017).

De maneira geral, a extração de vapores do solo pode ser utilizada quando o poluente possuir pressão de vapor superior a 0,5 mmHg e constante de Henry acima de 0,01. Também é possível realizar a injeção de ar quente para volatilização de produtos mais pesados de petróleo. Entretanto, o custo energético para o aquecimento pode tornar a técnica, aplicada desta maneira, economicamente inviável (Hansen, 2013).

A técnica de extração de vapores do solo pode ser considerada equivalente à técnica de bombeamento e tratamento para a região não saturada do subsolo.

2.6.7 Air sparging

Também denominada *in situ air stripping*, a técnica constitui-se na injeção de ar na zona saturada, gerando bolhas que migram vertical e horizontalmente, facilitando a transferência de contaminantes em fase residual e dissolvida para a fase vapor. Muitas vezes a técnica de air sparging é realizada em conjunto com um sistema de extração de vapores, aumentando a eficiência da remediação (Hansen, 2013).

Esta metodologia é indicada para solos com alta permeabilidade hidráulica e elevada porosidade. Os poluentes devem ser voláteis e de fácil remoção em fluxo gasoso. Pode-se realizar a injeção de ar quente para maior remoção de contaminantes. A profundidade da contaminação e do nível da água subterrânea podem limitar a aplicabilidade e eficiência da técnica (Coutinho e Gomes, 2014).

2.7 Estruturas de prevenção a contaminação de um posto de combustível

O Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC) de um posto revendedor é composto pelos tanques, tubulações e acessórios que são interligados entre si, abaixo da superfície do terreno, conforme mostrado na Figura 6. O SASC tem por objetivo realizar, de forma segura, o armazenamento do combustível e o abastecimento de veículos, reduzindo a ocorrência de vazamentos e derramamentos. Além disso, minimiza o risco destes incidentes serem agravados pela ocorrência de incêndios e explosões (Correa, 2017).

Os elementos de segurança que devem estar presentes no SASC estão descritos na ABNT NBR 13786:2005. Esta norma prevê a existência de equipamentos que previnem vazamentos, transbordamentos, derrames e corrosão do SASC. Alguns exemplos são: tanque duplo com monitoramento intersticial e revestimento interno anticorrosivo, alarme de transbordamento, válvulas de alívio de pressão, caixa separadora de água e óleo, canaletas periféricas de contenção, entre outros (ABNT, 2005).

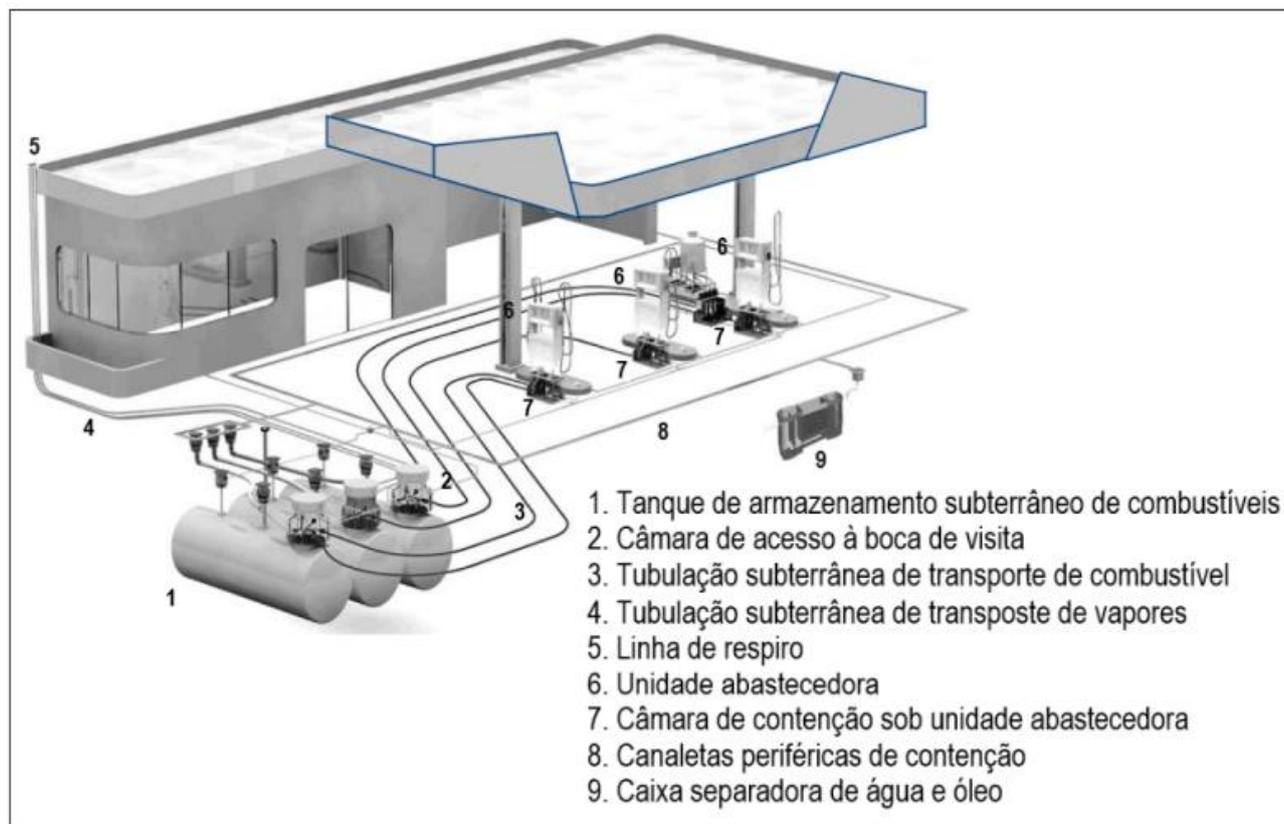


Figura 6: Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis em posto revendedor
Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2020)

3 Materiais e Métodos

Foram realizados dois estudos de casos de áreas contaminadas por derivados de petróleo em postos de combustíveis que necessitaram de remediação. As fontes utilizadas para o trabalho foram documentos presentes nos autos dos processos de licenciamento ambiental e informações contidas no banco de dados da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM). Para acesso a tais materiais, solicitou-se autorização formal à essa Fundação, que deferiu o pedido. Os textos e tabelas apresentados neste trabalho são de autoria própria, com base nos documentos citados.

Por questões de confidencialidade, os empreendimentos não são identificados neste trabalho. Igualmente, os laboratórios encarregados pelas análises químicas e empresas de consultoria responsáveis pelos processos de remediação também são mantidos anônimos. Vale destacar que todos os laboratórios envolvidos são cadastrados na FEPAM, conforme exigência desta Fundação.

Os empreendimentos considerados pertencem ao ramo de atividade denominado “Comércio Varejista de Combustíveis”. A Tabela 2 demonstra a quantidade de empreendimentos deste ramo, cadastrados no Estado do Rio Grande do Sul, classificados quanto ao nível de contaminação, na data de 07/10/2021.

Tabela 2: Quantidade de empreendimentos do ramo “Comércio Varejista de Combustíveis”, cadastrados no Estado do Rio Grande do Sul, classificados quanto ao nível de contaminação

Descrição	Quantidade
Área não contaminada (NC)	3950
Área Suspeita de Contaminação (AS)	18
Área Contaminada sob Investigação (AI)	44
Área Contaminada sob Intervenção (ACI)	171
Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação (AMR)	89
Área Reabilitada (AR)	455

Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

Optou-se por limitar a escolha a empreendimentos classificados como AMR ou AR, tendo em vista que nestas duas categorias as etapas de gerenciamento de áreas contaminadas já teriam sido concluídas. Isso possibilita a comparação entre as técnicas de tratamento utilizadas e uma análise mais aprofundada da gestão do processo de remediação.

É importante ressaltar que o banco de dados da FEPAM não permite a realização de pesquisas avançadas, ou seja, é possível usar apenas um filtro por busca. Dessa maneira, foi realizada a pesquisa filtrada pelos níveis de contaminação AMR e AR, que totalizaram 544 processos. Dentro deste universo, de maneira aleatória, foram escolhidos cerca de 40 processos para serem submetidos a uma análise preliminar, com o objetivo de excluir casos cujos processos de remediação eram anteriores a 2015 e encontrar dois casos que utilizaram as mesmas técnicas de tratamento.

Além disso, a análise preliminar serviu para excluir os casos em que se verificou a extrapolação de um valor de referência para um contaminante, mas que não houve necessidade

de implementação de um sistema de gerenciamento de área contaminada. Um exemplo comum deste tipo de situação é a identificação de contaminação no solo durante a substituição de um tanque subterrâneo, onde todo material contaminado é removido do ambiente no ato da troca do equipamento, não sendo detectada contaminação posterior. Nestes cenários, o órgão ambiental classifica o empreendimento como AMR, todavia, esses casos não foram incluídos entre os considerados para composição deste trabalho.

Após a análise prévia, dois casos foram selecionados. Ambos os empreendimentos escolhidos estavam classificados como AMR e optaram por remediar suas áreas através de extração multifásica seguida por oxidação química *in situ*, cujo agente oxidante empregado foi percarbonato de sódio.

4 Estudo de Casos e Discussão dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os empreendimentos escolhidos como estudos de casos, bem como as etapas de remediação adotadas e os resultados obtidos. Também são apresentados comentários sobre a assertividade da escolha da técnica empregada em cada caso e sobre a gestão da remediação ambiental desenvolvida.

4.1 Estudo de Caso I

O empreendimento do Estudo de Caso I localiza-se na cidade de Restinga Seca, região central do Estado do Rio Grande do Sul, e possui área útil de 653,22 m². O estabelecimento está situado em uma zona urbana mista, sendo sua vizinhança composta por edificações residenciais, comerciais e industriais. O croqui do empreendimento é apresentado na figura 7.

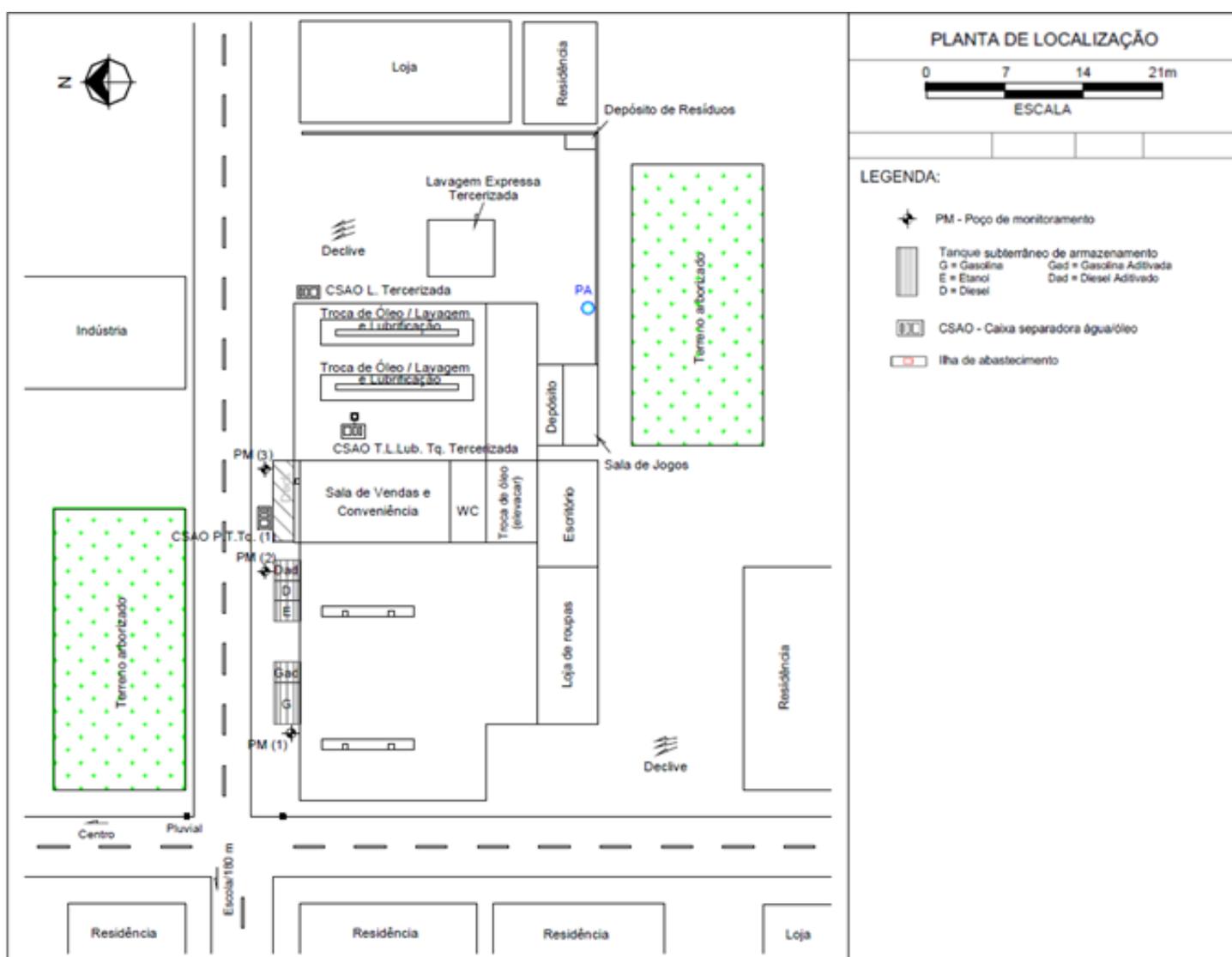


Figura 7: Croqui do empreendimento I
Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

O SASC é composto de dois tanques subterrâneos de 30.000 L, sendo um deles bipartido, que armazena gasolina comum e aditivada, e o outro tripartido, que contém diesel comum, diesel S-10 e etanol. Além do serviço de abastecimento de combustíveis, o local realiza a troca de óleo do motor e conta com o serviço de lavagem de veículos leves, prestado por empresa terceirizada.

O empreendimento possui todos os sistemas de prevenção à contaminação, necessários segundo as legislações vigentes, com destaque às válvulas de alívio de pressão para cada compartimento dos tanques subterrâneos, piso impermeável circundado por canaletas periféricas nas áreas de tancagem, troca de óleo e pista de abastecimento, tanques com revestimentos anticorrosivos e duas caixas separadoras de água e óleo.

Mesmo com todos estes sistemas de prevenção, durante uma campanha rotineira de amostragem de água subterrânea, em outubro de 2017, foi verificada a presença de uma película (espessura < 0,5 cm) de fase livre² no ponto PM-02. Este fato demonstra a importância do monitoramento contínuo da qualidade do ambiente em locais onde estão instalados empreendimentos potencialmente poluidores.

A fim de avaliar a situação de forma mais aprofundada, o empreendedor realizou uma Investigação Ambiental Confirmatória, em janeiro de 2018. Na data, foram coletadas amostras dos poços de monitoramento existentes e de mais 03 sondagens executadas no dia, totalizando 06 pontos de coleta. Novamente, foi constatada a presença de fase livre no PM-02 e, através das análises laboratoriais de TPH, PAHs e BTEX, verificou-se a extrapolação do valor de referência para o parâmetro TPH em dois pontos de coleta. A pluma de contaminação de TPH em água subterrânea é mostrada na Figura 8.

Embasada nestes resultados, a consultoria ambiental recomendou, na conclusão do Relatório de Investigação Confirmatória, que houvesse implementação do processo de remediação ativa no local. Em abril de 2018, o órgão ambiental oficiou o empreendimento, solicitando início imediato do processo de remediação da área degradada. A instalação do sistema de remediação ocorreu em julho de 2018.

Tendo em vista a presença de fase livre, o empreendedor optou por realizar a técnica de extração multifásica, que permite a remoção simultânea da fase dissolvida, fase livre e vapores no solo. Um esquema simplificado da técnica de extração multifásica é apresentado na Figura 9. Inicialmente, o material removido do subsolo é destinado a um tanque, onde ocorre a separação da fase líquida e gasosa. Os gases são direcionados através de filtros de carvão ativado e liberados na atmosfera. A fase líquida é encaminhada a uma caixa separadora, gerando um efluente oleoso e outro aquoso. O material oleoso é armazenado para posterior destinação e a parcela aquosa é filtrada e lançada na caixa separadora do próprio posto de combustíveis, para polimento final.

² Fase Livre: material oleoso não dissolvido, encontrado como sobrenadante na água subterrânea.

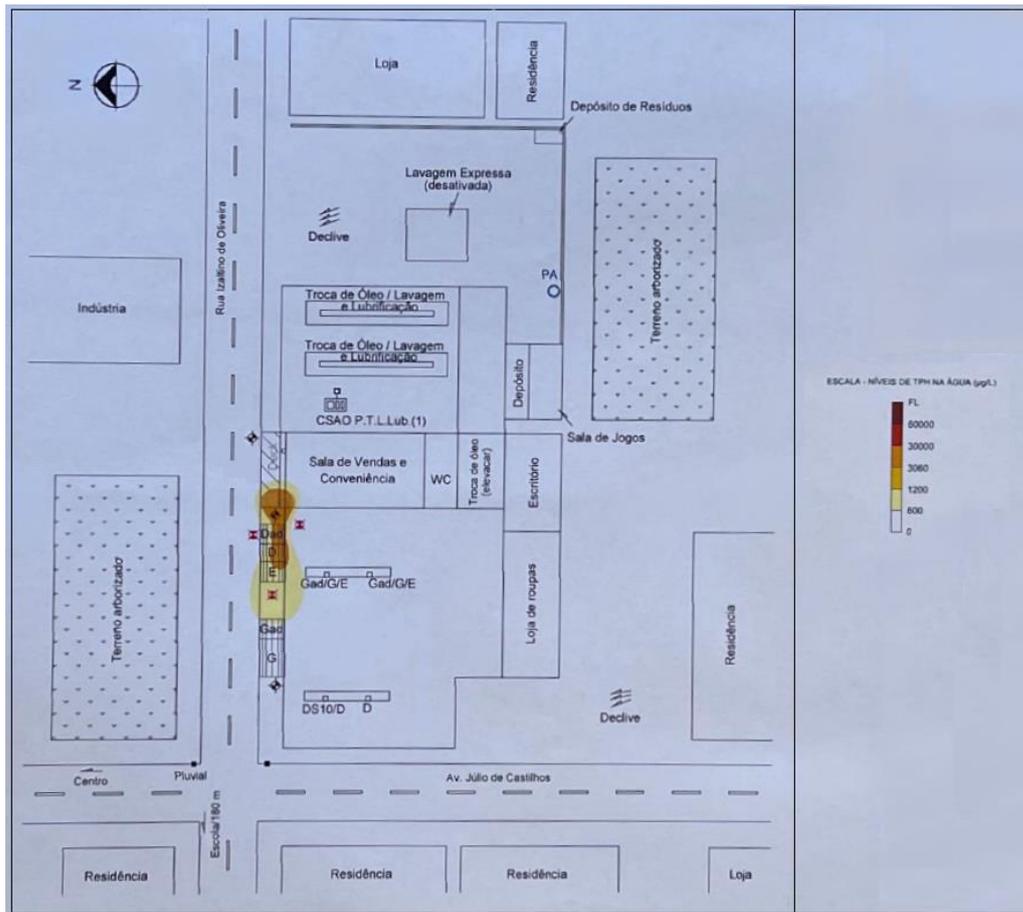


Figura 8: Pluma de contaminação de TPH em água subterrânea
 Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

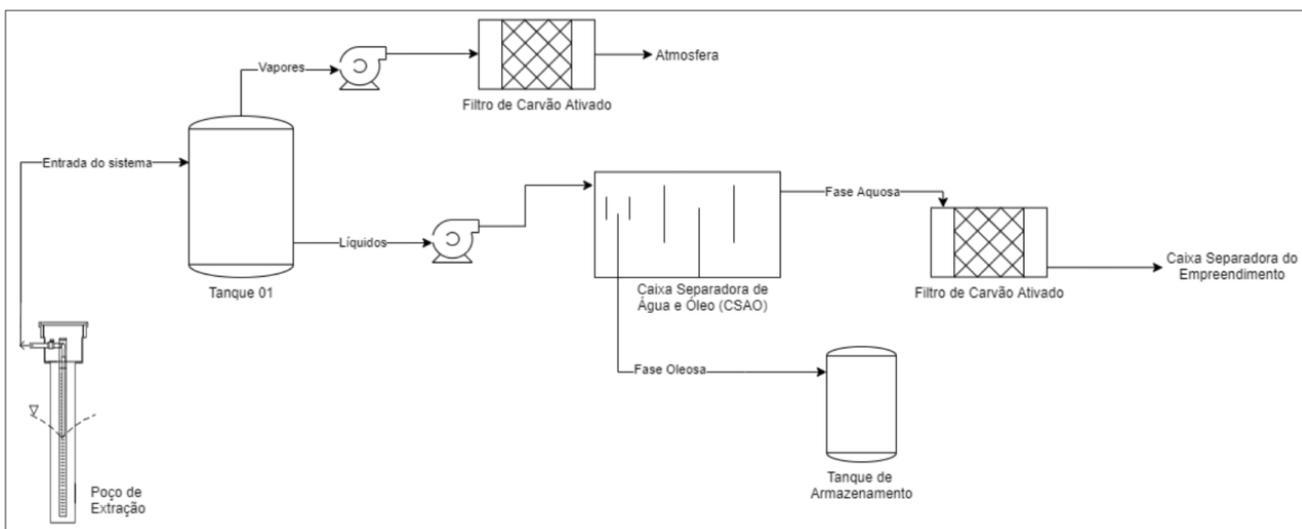


Figura 9: Fluxograma simplificado do método de extração multifásica
 Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de extração multifásica operou de forma intermitente, 60 minutos ligado e 60 minutos desligado, das 06:00 até 22:00 horas, entre os meses junho e dezembro de 2018. Durante este período, foram removidos do subsolo um total de 32,75 m³ de líquidos, dos quais

recuperaram-se 0,3 L de fase livre. A tabela 3 apresenta a espessura da fase livre em cada poço de monitoramento, durante o período de operação do equipamento extrator.

Tabela 3: Espessura (cm) da fase livre durante a operação da extração multifásica

	jun/18	jul/18	ago/18	nov/18	dez/18
PM-01	nd	nd	nd	nd	nd
PM-02	4,0	0,3	0,2	nd	nd
PM-03	nd	nd	nd	nd	nd

nd = não detectado

Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

No mesmo mês em que se encerrou a extração multifásica, foi iniciada a etapa de oxidação química *in situ* (*In Situ Chemical Oxidation* - ISCO). Utilizou-se como reagente, uma solução de percarbonato de sódio ($2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 10% em massa, aplicado diretamente no ponto PM-02. O percarbonato de sódio é um sólido cristalino branco, que quando dissolvido em água, libera peróxido de hidrogênio, que atua como o oxidante.

A injeção da solução oxidante deu-se em dois momentos. As datas e quantidades totais empregadas foram:

- Dezembro/2018 - 809 L
- Setembro/2019 - 16 L

Para o controle da qualidade da água subterrânea, foram realizadas campanhas de coleta e análise laboratorial das substâncias químicas de interesse, a fim de compará-las com os valores de referência. As amostragens englobaram todo o processo de remediação, incluindo a etapa de extração multifásica e oxidação química *in situ*, sendo realizadas nos meses de agosto de 2018, fevereiro de 2019 e outubro de 2019. A Tabela 4 apresenta esses resultados.

Tabela 4: Resultados analíticos de hidrocarbonetos dissolvidos em água subterrânea, durante o processo de remediação

	PM-01			PM-02			PM-03			LD (µg/L)	VR (µg/L)
	AGO/18	FEV/19	OUT/19	AGO/18	FEV/19	OUT/19	AGO/18	FEV/19	OUT/19		
Benzeno	< 1,0	< 1,0	< 1,0	FL	17,1	< 1,0	48,7	< 1,0	< 1,0	1	5
Tolueno	< 1,0	< 1,0	< 1,0	FL	2,7	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1	700
Etilbenzeno	< 1,0	< 1,0	< 1,0	FL	18,8	< 1,0	3,3	< 1,0	< 1,0	1	300
Xilenos	< 1,0	< 1,0	< 1,0	FL	30,1	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1	500
TPH Total	< 175	< 175	< 175	FL	2.134	< 175	< 175	< 175	< 175	175	600

FL = fase livre

LD = Limite de Detecção do Método (µg/L)

VR = Valor de Referência CONAMA 420/2009 ou Lista Holandesa

Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

Considerando os resultados analíticos consultados, é possível afirmar que a etapa de tratamento com aplicação de produtos oxidantes foi exitosa, visto que os valores encontrados ficaram abaixo dos valores de referência para todos os pontos de medição. Dessa maneira, em dezembro de 2019, a consultoria ambiental contratada pelo empreendedor enviou à FEPAM o relatório de encerramento do processo de remediação ativa no local, solicitando a troca do status de "Área Contaminada sob Intervenção - ACI" para "Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação - AMR".

Em janeiro de 2020, o órgão ambiental emitiu uma nova Licença de Operação para o empreendimento, oficializando a aprovação da mudança de status solicitada. Nesta LO, a FEPAM determinou que o empreendedor deveria apresentar, semestralmente, um relatório de monitoramento da qualidade da água subterrânea. A duração mínima dessa condicionante é de dois anos, desde que os resultados analíticos do monitoramento não voltem a indicar valores superiores aos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 e Lista Holandesa de Valores de Qualidade do Solo e Água Subterrânea.

Até o momento da elaboração deste trabalho foram realizadas 03 campanhas semestrais de monitoramento pós remediação, conforme mostrado na Tabela 5. Nota-se que nenhuma análise indicou valor superior aos limites legais correspondentes (VR), e caso isso volte a acontecer na próxima campanha de amostragem, o empreendimento atingirá o status de “Área Reabilitada - AR”.

Tabela 5: Resultados analíticos para água subterrânea – Fase AMR

	PM-01			PM-02			PM-03			LD (µg/L)	VR (µg/L)
	MAI/20	SET/20	MAI/21	MAI/20	SET/20	MAI/21	MAI/20	SET/20	MAI/21		
Benzeno	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1	5
Tolueno	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1	700
Etilbenzeno	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1	300
Xilenos	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1	500
TPH Total	< 175	< 175	< 175	< 175	< 175	< 175	< 175	< 175	< 175	175	600

LD = Limite de Detecção do Método (µg/L)

VR = Valor de Referência CONAMA 420/2009 ou Lista Holandesa

Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

4.2 Estudo de Caso II

O empreendimento do Estudo de Caso II se localiza na cidade de Turuçu, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul, em torno de 179 km da capital gaúcha. O posto revendedor está instalado em um terreno que possui 2.000 m² e está situado em uma zona urbana mista, cercado por edifícios residenciais e comerciais. O croqui do empreendimento é mostrado na Figura 10. Nesta figura são apresentados os poços de monitoramento (PMs) que permaneceram no empreendimento após a finalização das atividades de intervenção, embora a quantidade de poços tenha variado durante o processo de remediação.

A tancagem é composta por 04 tanques de 30.000L, sendo um deles pleno, que armazena diesel, e os outros 03 tanques bipartidos. O primeiro vaso bipartido contém gasolina comum e gasolina aditivada, o segundo tanque bipartido armazena diesel S-10 em ambos os compartimentos e o terceiro tanque bipartido estoca diesel aditivado e etanol. Além do serviço de abastecimento de combustíveis, o local realiza troca de óleo do motor, armazenagem e revenda de GLP (gás liquefeito de petróleo) e oferece serviço de lavagem de veículos.

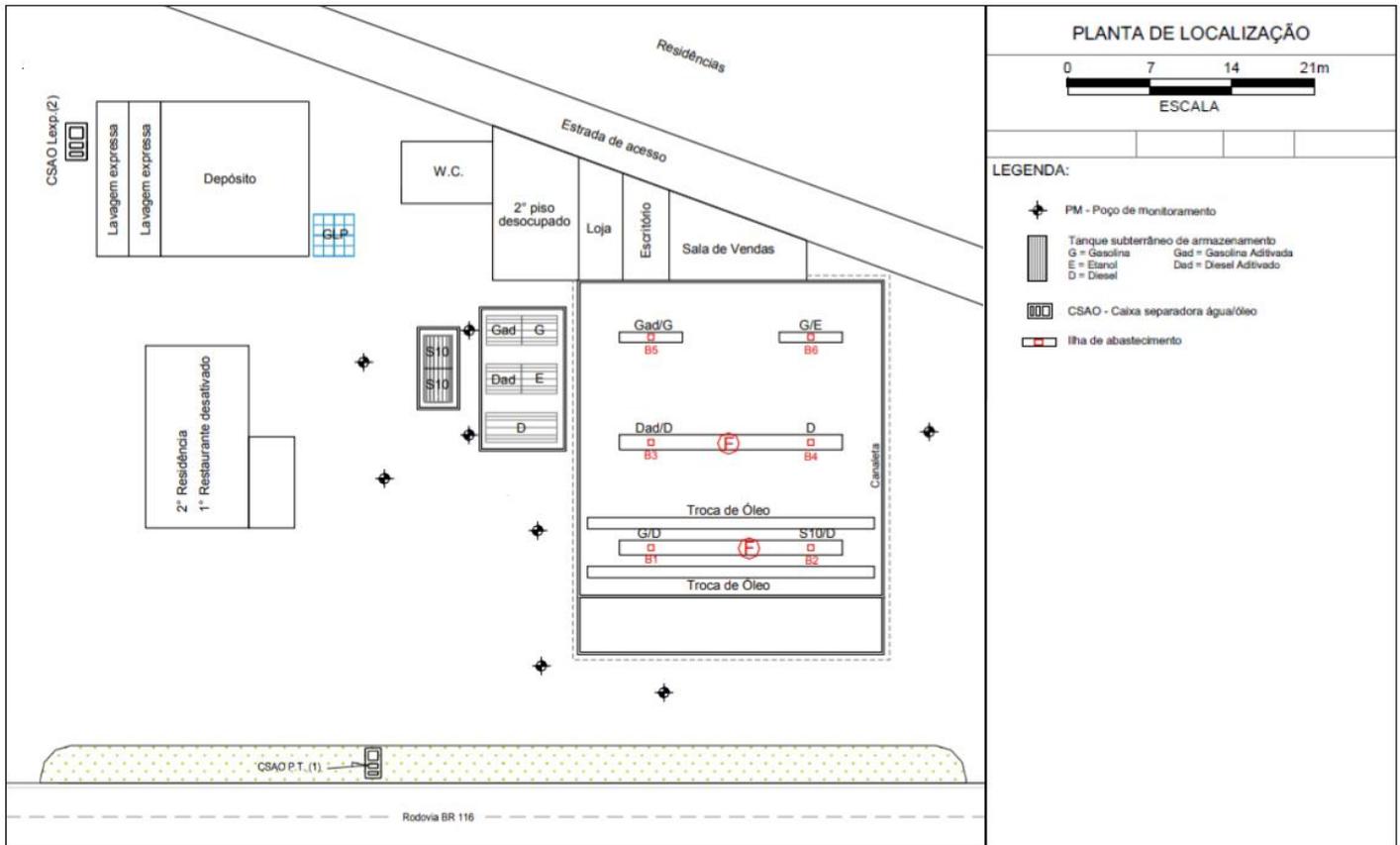


Figura 10: Croqui do empreendimento II
Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

O empreendimento possui todos os sistemas de prevenção à contaminação necessários segundo as legislações vigentes, com destaque às válvulas de alívio de pressão para cada compartimento dos tanques subterrâneos, piso impermeável circundado por canaletas periféricas nas áreas de tancagem, troca de óleo e pista de abastecimento, tanques com revestimentos anticorrosivos e duas caixas separadoras de água e óleo, sendo uma delas exclusiva para área de lavagem de veículos.

Da mesma forma como o empreendimento do Estudo de Caso I, o primeiro indício de contaminação foi detectado em um monitoramento de rotina. Em outubro de 2014, durante uma campanha semestral de amostragem de água subterrânea, verificou-se uma película (espessura < 0,5 cm) de óleo diesel sobrenadante (fase livre) no poço de monitoramento PM-04. Essa película é mostrada na Figura 11.

Para averiguar a possibilidade de contaminação ambiental, em dezembro de 2014, realizou-se uma Investigação Ambiental Confirmatória. Foram coletadas amostras de água subterrânea para análise de BTEX, PAHs e TPH em todos os 10 poços de monitoramento (PMs) existentes no empreendimento, naquela época, e em mais 04 pontos, cujas perfurações foram feitas na data. Constatou-se a presença de fase livre em 02 pontos, extrapolação do valor de referência para TPH em 07 pontos e benzeno elevado em 01 ponto. Para verificação do solo, mediu-se o parâmetro VOCs (Compostos Orgânicos Voláteis - *Volatile Organic Compounds*) nas 04 sondagens realizadas na data, e constatou-se resultado levemente superior ao padrão em apenas um ponto.



Figura 11: Película de fase livre no PM-04

Fonte: FEPAM (2021)

Esses resultados foram informados ao órgão ambiental em um relatório enviado em fevereiro de 2015. O documento recomendava a intervenção ativa na área, a fim de reduzir a quantidade de contaminantes a níveis adequados. Em abril do mesmo ano, a FEPAM oficiou o empreendimento para que fosse iniciado um processo de remediação no local.

Tendo em vista a presença de fase livre e contaminação no solo, o empreendedor optou por tratar a área com extração multifásica. A instalação se deu em junho de 2015, quando ocorreu a perfuração de 08 poços de remediação (PRs), além dos 10 poços de monitoramento (PMs) existentes. No mesmo mês teve início a operação do sistema, que ocorreu de forma intermitente, 60 minutos ligado e 60 minutos desligado, das 06:00 até 22:00 horas. Durante o período de operação, o sistema de bombeamento não foi interligado a todos os poços, apenas aos que apresentavam fase livre.

A Figura 12 mostra os parâmetros operacionais do sistema de extração multifásica. A linha cinza indica o tempo efetivo de operação, em horas, com leitura no eixo direito da imagem. Já as barras verticais azuis e laranjas, com leitura no eixo esquerdo, representam, respectivamente, o volume de líquidos removidos do subsolo e o volume de material oleoso recuperado. É possível perceber que, no decorrer do tempo, a quantidade de combustível recuperado diminui, o que é esperado.

A Tabela 6 mostra a espessura da fase livre durante a operação da extração multifásica. Nota-se que no início da operação, em setembro de 2015, havia fase livre em diferentes pontos. Com o tempo, observa-se uma tendência de redução da espessura da camada sobrenadante até ela não ser detectada. Em outubro de 2016 houve um aumento da espessura da fase livre, com causa não identificada. Após esta singularidade, a mesma tendência de redução da fase livre pode ser observada.

Conforme evidenciado na Figura 12, em maio de 2016, o sistema de extração multifásica foi posto em *stand by*. O sistema ficou em espera por cinco meses e voltou à operação em outubro de 2016, quando se detectou fase livre novamente, e funcionou até abril de 2017, quando cessou a

incidência de sobrenadante. O sistema de extração multifásica permaneceu no local, desligado, até julho de 2017, quando foi removido do empreendimento.

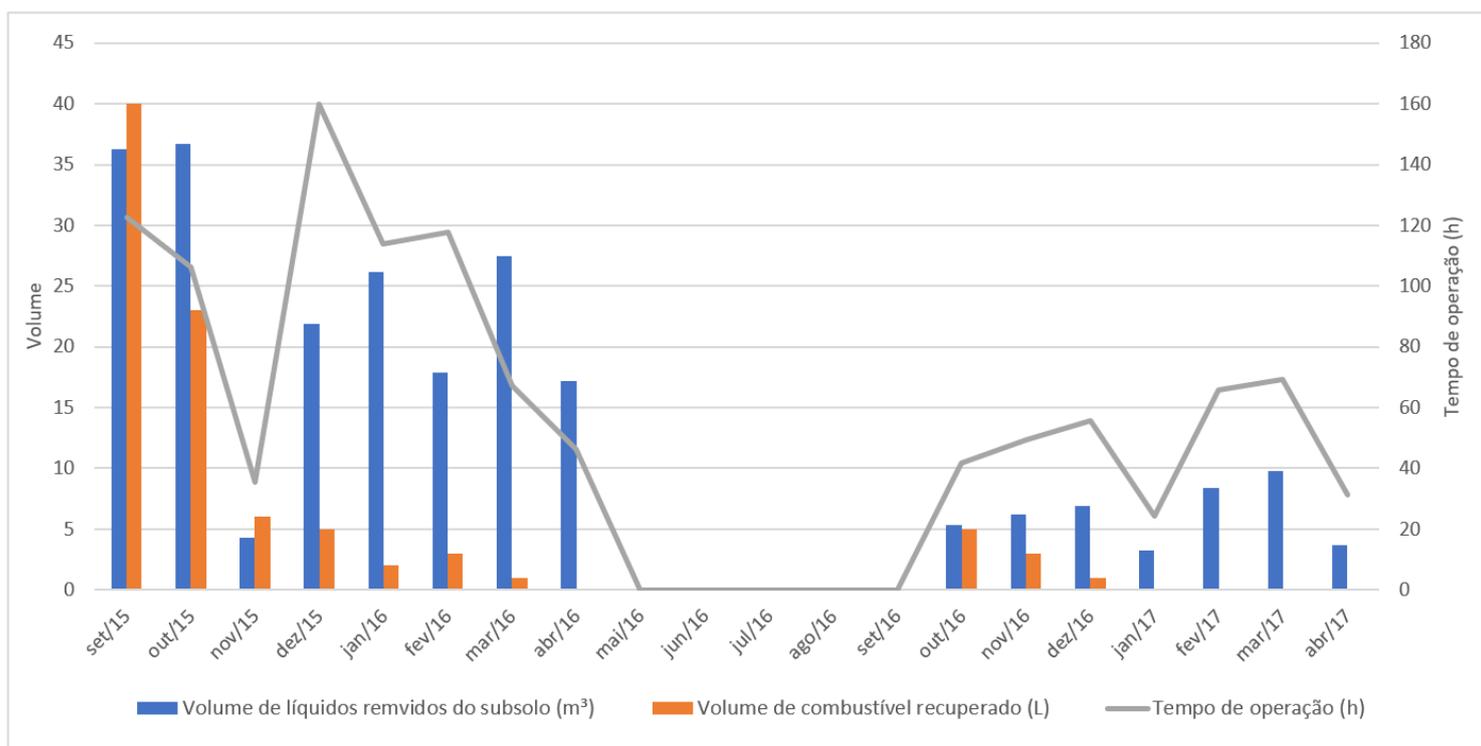


Figura 12: Gráfico que relaciona os parâmetros operacionais da extração multifásica
Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

Tabela 6: Espessura da fase livre (cm) entre setembro de 2015 até julho de 2017

	PM-01	PM-02	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-07	PM-08	PM-09	PM-10	PR-01	PR-02	PR-03	PR-04	PR-05	PR-06	PR-07	PR-08
set/15	nd	nd	nd	< 0,5	nd	< 0,5	4	1	nd	nd	nd	nd						
out/15	nd	< 0,5	< 0,5	nd	nd	nd	nd											
dez/15	nd	0,5	nd															
jan/16	nd																	
abr/16	nd																	
set/16	nd																	
out/16	nd	8	nd	nd	1	< 0,5	nd	nd	nd	nd								
nov/16	nd	2	nd															
dez/16	nd	< 0,5	nd															
fev/17	nd	< 0,5	nd	nd	nd	< 0,5	nd	nd	nd	nd								
mar/17	nd	< 0,5	nd	nd	nd	< 0,5	nd	nd	nd	nd								
abr/17	nd																	
jul/17	nd																	

nd = não detectado

Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

A fim de acompanhar a qualidade da água subterrânea durante a remediação, instaurou-se um regime de campanhas de amostragem, realizadas duas vezes ao ano. As concentrações dos poluentes detectados nas coletas amostrais (em $\mu\text{g/L}$) são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Concentrações dos poluentes detectados nas coletas amostrais na água subterrânea (em µg/L)

	PM-01									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	1	5								
Tolueno	nd	1	700								
Etilbenzeno	nd	1	300								
Xilenos	nd	1	500								
TPH Total	nd	175	600								
	PM-02									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	1	5								
Tolueno	nd	1	700								
Etilbenzeno	nd	7,9	nd	1	300						
Xilenos	nd	12,8	nd	1	500						
TPH Total	nd	87	428	6	nd	nd	nd	nd	nd	175	600
	PM-03									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	1	5								
Tolueno	nd	1	700								
Etilbenzeno	nd	1	300								
Xilenos	nd	1	500								
TPH Total	nd	175	600								
	PM-04									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	37,9	4,22	nd	1	5						
Tolueno	43,3	6,7	nd	1	700						
Etilbenzeno	1,5	nd	1	300							
Xilenos	20,1	nd	1	500							
TPH Total	974	623	nd	763	nd	nd	nd	nd	nd	175	600
	PM-05									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	1	5								
Tolueno	nd	1	700								
Etilbenzeno	nd	nd	2,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1	300
Xilenos	nd	nd	4,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1	500
TPH Total	nd	7,1	nd	nd	188	nd	nd	nd	nd	175	600

LD = Limite de Detecção do Método (µg/L)

VR = Valor de Referência CONAMA 420/2009 ou Lista Holandesa

nd = Não detectado

	PM-06									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	1	5								
Tolueno	nd	1	700								
Etilbenzeno	nd	1	300								
Xilenos	nd	1	500								
TPH Total	nd	nd	nd	nd	nd	191	nd	nd	nd	175	600

	PM-07									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	nd	nd	nd	2,01	nd	nd	nd	nd	1	5
Tolueno	nd	5,04	nd	1	700						
Etilbenzeno	nd	nd	nd	nd	nd	6,2	nd	nd	nd	1	300
Xilenos	nd	nd	nd	nd	nd	12	nd	nd	nd	1	500
TPH Total	nd	3.883	nd	175	600						

	PM-08									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1	5
Tolueno	nd	nd	nd	nd	nd	4,8	nd	nd	nd	1	700
Etilbenzeno	nd	nd	nd	nd	nd	13,8	nd	nd	nd	1	300
Xilenos	nd	nd	nd	nd	nd	139,4	nd	nd	nd	1	500
TPH Total	173.339	4.154	nd	nd	389	741	nd	nd	nd	175	600

	PM-09									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	nd	7,9	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	5
Tolueno	nd	nd	10,13	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700
Etilbenzeno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	300						
Xilenos	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	500						
TPH Total	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	175	600						

	PM-10									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	5
Tolueno	nd	nd	nd	4,53	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700
Etilbenzeno	nd	nd	8,44	6,04	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	300
Xilenos	nd	nd	23,08	41,56	nd	3,01	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	500
TPH Total	nd	86	126	47.890	118.162	1.276	503	TAMPONADO	TAMPONADO	175	600

LD = Limite de Detecção do Método (µg/L)

VR = Valor de Referência CONAMA 420/2009 ou Lista Holandesa

nd = Não detectado

	PR-01									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	5						
Tolueno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700						
Etilbenzeno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	300						
Xilenos	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	500						
TPH Total	nd	nd	nd	nd	nd	1.432	206	TAMPONADO	TAMPONADO	175	600

	PR-02									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	3,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	5
Tolueno	21,5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700
Etilbenzeno	13,8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	300
Xilenos	12,1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	500
TPH Total	581	136	nd	nd	510	100	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	175	600

	PR-03									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	nd	nd	nd	nd	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	1	5
Tolueno	nd	nd	nd	nd	nd	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	1	700
Etilbenzeno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	SECO	TAMPONADO	TAMPONADO	1	300
Xilenos	nd	nd	nd	nd	nd	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	1	500
TPH Total	18.226	15.062	nd	2.652	166,3	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	175	600

	PR-04									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	5						
Tolueno	3,55	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700
Etilbenzeno	4,89	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	300
Xilenos	12,74	nd	nd	nd	nd	nd	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	500
TPH Total	3.140	1.148	nd	1.182	9.220	520	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	175	600

	PR-05									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd	nd	nd	nd	nd	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	1	5
Tolueno	nd	nd	nd	nd	nd	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	1	700
Etilbenzeno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	SECO	TAMPONADO	TAMPONADO	1	300
Xilenos	nd	nd	nd	nd	nd	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	1	500
TPH Total	958,8	nd	152,9	413,7	154,1	nd		TAMPONADO	TAMPONADO	175	600

LD = Limite de Detecção do Método (µg/L) VR = Valor de Referência CONAMA 420/2009 ou Lista Holandesa nd = Não detectado

	PR-06									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd			1	5						
Tolueno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700						
Etilbenzeno	nd			1	300						
Xilenos	nd			1	500						
TPH Total	nd			175	600						

	PR-07									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd			1	5						
Tolueno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700						
Etilbenzeno	nd			1	300						
Xilenos	nd			1	500						
TPH Total	nd			175	600						

	PR-08									LD	VR
	ago/15	nov/15	abr/16	out/16	abr/17	nov/17	fev/18	nov/18	fev/19	(µg/L)	(µg/L)
Benzeno	nd			1	5						
Tolueno	nd	TAMPONADO	TAMPONADO	1	700						
Etilbenzeno	nd			1	300						
Xilenos	nd			1	500						
TPH Total	1.948	nd	nd	nd	nd	388	nd			175	600

LD = Limite de Detecção do Método (µg/L)

VR = Valor de Referência CONAMA 420/2009 ou Lista Holandesa

nd = Não detectado

Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

Em abril de 2017, após o encerramento do processo de extração multifásica devido a inexistência de fase livre, verificou-se que alguns pontos apresentaram concentração de poluentes acima dos valores de referência para as amostras de água subterrânea coletadas, conforme indicado na Tabela 7. Para resolver este problema, a consultoria ambiental optou por realizar oxidação química *in situ*. Utilizou-se uma solução de percarbonato de sódio ($2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$), 10% em massa, mesmo reagente do Caso I. As aplicações da solução oxidante ocorreram conforme mostrado na tabela 8.

Tabela 8: Informações sobre a etapa de Oxidação Química *in Situ*

DATA	LOCAL	QUANTIDADE
ago/17	PM-10	250 L
	PR-04	250 L
	PM-10	500 L
jan/18	PM-08	250 L
	PR-04	250 L

Fonte: Adaptado de FEPAM (2021)

Analisando a Tabela 7 é possível perceber que os resultados das análises laboratoriais apresentaram queda significativa na concentração de contaminantes logo após as aplicações da solução oxidante, realizadas em agosto de 2017 e janeiro de 2018. Nota-se, também, que após a segunda aplicação da solução remediadora, não houve extrapolação do valor padrão para água subterrânea em nenhum ponto, o que atesta a eficiência do tratamento realizado.

Conforme indicado na Tabela 7, em fevereiro de 2018 dois poços (PR-03 e PR-05) encontravam-se secos, não sendo possível fazer a coleta de água subterrânea. Dessa maneira, realizou-se a avaliação de VOCs nesses pontos, através de um medidor portátil, que indicou resultado inferior ao padrão de referência.

Em novembro de 2018, foi realizado o tamponamento dos poços de remediação PR-01 ao PR-08, tendo em vista que eles já haviam cumprido seu papel de remoção da fase livre durante a operação da extração multifásica. Na mesma data, também foram tamponados os pontos PM-09 e PM-10, que se encontravam, respectivamente, na área de troca de óleo e pista de abastecimento, locais que, por normas de segurança ambiental, precisam possuir piso impermeável sem perfurações.

Em fevereiro de 2019 foi realizada uma campanha de amostragem cujo resultado ficou abaixo do padrão para as substâncias químicas de interesse (SQIs), nos 08 poços de monitoramento remanescentes. Dessa maneira, no relatório enviado em abril do mesmo ano, o empreendedor informou à FEPAM que cessaria o processo de remediação no local e pedia a reclassificação da área de ACI para AMR.

O órgão ambiental solicitou, em julho de 2019, que fosse realizada uma investigação ambiental complementar na região em que se localizavam os poços de remediação tamponados em novembro de 2018, para averiguar se a concentração de contaminantes na região não havia aumentado desde o tamponamento. Alegando dificuldade financeira em decorrência da pandemia de COVID-19, o empreendedor requisitou dilação de prazo para o cumprimento dessa solicitação.

A investigação ambiental complementar ocorreu apenas em dezembro de 2019. Foram realizadas novas perfurações para recolhimento de solo em três pontos, com coletas em 06 diferentes profundidades. Nenhuma delas apresentou elevação de algum parâmetro químico. Além disso, coletou-se água subterrânea em 04 novos pontos na região dos PRs tamponados e em todos os PMs remanescentes da área. Da mesma forma, nenhuma dessas análises apontou valor elevado para as substâncias químicas de interesse. O relatório contendo estas informações foi enviado à FEPAM em fevereiro de 2020, e reiterava o pedido de mudança do status para Área em Monitoramento para Reabilitação - AMR.

Em maio de 2020, o órgão ambiental emitiu nova Licença de Operação (LO), reclassificando o empreendimento como AMR e estipulando o envio de relatórios de monitoramento da qualidade da água subterrânea nos meses de agosto e fevereiro. Desde então, foram apresentados relatórios em agosto de 2020, fevereiro de 2021 e agosto de 2021, todos contendo resultados analíticos inferiores aos valores de referência. Esse fato atesta a eficácia das metodologias de remediação aplicadas, que conseguiram reduzir a quantidade de contaminantes a níveis adequados. De acordo com a condicionante da LO, caso a próxima campanha de amostragem apresente concentração de hidrocarbonetos inferiores aos limites legais, o empreendimento receberá o status de Área Remediada (AR).

4.3 Comparação entre os casos

É possível perceber diversas similaridades entre os casos apresentados, como o fato de ambos os empreendimentos detectarem os primeiros indícios de contaminação em monitoramentos de rotina, ambos optaram por remediar as áreas através de extração multifásica seguida por oxidação química *in situ*, entre outras. Nesta seção serão discutidas as similaridades e as divergências entre os casos apresentados.

A principal diferença entre os casos abordados neste trabalho foi a quantidade de contaminantes detectados no meio ambiente, superior no caso II, onde foi necessário a perfuração de novos poços para realização da remediação. Devido a diferença de escala da contaminação, o processo de recuperação do empreendimento do caso II teve maior duração.

Como colocado, a contaminação foi inicialmente detectada durante campanhas de amostragens semestrais, conforme requisitado através de condicionantes das licenças de operação dos respectivos empreendimentos. Esse fato ratifica a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade ambiental em empreendimentos potencialmente poluidores, como é o caso de postos de combustíveis.

Outro ponto em comum para os casos é que, após a investigação ambiental confirmatória, as próprias consultorias contratadas pelos empreendedores recomendaram a realização de remediação nas áreas. Todavia, apenas após manifestação da FEPAM os processos de remediação efetivamente foram instalados. Isso demonstra a importância dos órgãos ambientais para a manutenção da qualidade do meio ambiente.

Nos dois casos abordados neste trabalho identificou-se fase livre, o que justifica a escolha da técnica de extração multifásica. O empreendimento I iniciou o tratamento *in situ* com essa técnica e encerrou a sua operação após não ser mais detectada a fase livre. O processo de extração multifásica realizado no empreendimento II foi temporariamente desligado em maio de 2016, visto que no mês anterior não se observou nenhum volume de material oleoso sobrenadante, e foi reativado em outubro de 2016, quando se detectou um aumento da espessura da fase livre. Esse procedimento é adequado para reduzir o custo do tratamento sem comprometer a eficácia da remediação.

Após a extração multifásica, os empreendimentos realizaram aplicações pontuais de solução oxidante nos locais cujas análises laboratoriais apontaram elevada concentração de contaminantes. Nos dois casos houve redução da concentração de poluentes após a realização das aplicações, comprovando a eficácia do procedimento. A escolha do percarbonato de sódio como agente oxidante pode ser considerada correta, tendo em vista que essa substância atua de forma eficiente em pH alcalino (Liu *et al.*, 2021), condição natural do terreno nos dois casos, e que os solos percolados por esse componente não apresentam mudança significativa de temperatura. Isso não ocorreria se tivesse sido empregado, por exemplo, o Reagente Fenton, que resulta em reação mais exotérmica e é eficiente somente em pH próximo a 3 (Pereira e Freitas, 2020).

É razoável afirmar que os processos de remediação aplicados nos dois locais foram satisfatórios, considerando a eliminação completa da fase livre e o fato de que a concentração de contaminantes dissolvidos em água subterrânea diminuiu drasticamente. Ambos os empreendimentos atingiram status AMR e não voltaram a apresentar concentração superior aos valores de referência para nenhuma das substâncias químicas de interesse.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve por finalidade apresentar e discutir dois estudos de casos nos quais foram realizados processos de remediação, a fim de verificar se as escolhas de gestão do processo de recuperação das áreas degradadas foram apropriadas. Além disso, objetivou-se averiguar se as técnicas adotadas foram adequadas para a contaminação em cada caso e se elas obtiveram os resultados desejados.

A gestão do processo de remediação dos dois postos de combustíveis pode ser considerada satisfatória. A escolha da técnica de extração multifásica seguida por oxidação química *in situ* foi justificada e obteve bons resultados em ambos os casos. O reagente oxidante escolhido, percarbonato de sódio, foi adequado para as características do solo e água subterrânea dos empreendimentos apresentados.

Ficou evidenciada a importância do monitoramento contínuo em empreendimentos potencialmente poluidores e a relevância da atuação do órgão ambiental responsável, principalmente no que tange a definição de um cronograma para início da remediação e a fiscalização de seus resultados.

Através das medidas de intervenção realizadas, ambos os empreendimentos atingiram o status de área em monitoramento para reabilitação (AMR). Segundo suas próprias licenças de operação, caso a próxima campanha de amostragem de água subterrânea de cada empreendimento aponte valores analíticos abaixo da referência para os hidrocarbonetos de interesse, os postos revendedores serão reclassificados como área reabilitada - AR.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se que sejam realizados os estudos de casos em que as áreas apresentem níveis de contaminação similares, mas que foram remediadas através do uso de técnicas distintas entre si, permitindo uma comparação entre as metodologias aplicadas. Adicionalmente, sugere-se a realização de estudo sobre o impacto da utilização de agentes oxidantes na fauna e flora de empreendimentos que foram submetidos a processos de remediação por oxidação química *in situ*, uma vez que não são verificadas possíveis consequências decorrentes dos processos de remediação, apenas se verifica a remoção de contaminantes específicos.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 13786 - Seleção dos equipamentos para sistemas para instalações subterrâneas de combustíveis.** Rio de Janeiro Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2005.

ABNT. **NBR 15515-1 - Passivo ambiental em solo e água subterrânea - Parte 1: Avaliação preliminar** Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2007.

ANFAVEA. **Estatística para Autoveículos.** Disponível em: <<https://www.anfavea.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 4 nov. 2021.

BARTOLOMEU, M.; NEVES, M. G. P. M. S.; FAUSTINO, M. A. F.; et al. **Wastewater chemical contaminants: remediation by advanced oxidation processes.** *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2018.

CALIJURI, M. DO C.; CUNHA, D. G. F.; MONTAÑO, M.; et al. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão.** [s.l: s.n.].

CETESB. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas.** 2ª ed. ed. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2001.

CETESB. **Relação de áreas contaminadas.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/Areas-Processo-de-Remediacao.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2021a.

CETESB. **Área contaminada.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/o-que-sao-areas-contaminadas/>>. Acesso em: 16 set. 2021b.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 273, de 29/11/2000** Conselho Nacional do Meio Ambiente, , 2000.

CONAMA. **Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009** Conselho Nacional do Meio Ambiente, , 2009.

CORREA, T. P. **AVALIAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS DERIVADOS DE PETRÓLEO EM POSTOS REVENDEDORES DE COMBUSTÍVEIS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.** [s.l.] UFRGS, 2017.

COUTINHO, R. C. P.; GOMES, C. C. **Técnicas para remediação de aquíferos contaminados por vazamentos de derivados de petróleo em postos de combustíveis.** XYII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**2014

DOS SANTOS, M. F.; HAMM, J.; SOUZA, F. S. **DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS EM PROCESSO DE REMEDIAÇÃO DE ÁREA CONTAMINADA NO MUNICÍPIO DE**

PORTO ALEGRE. **Cippus**, v. 9, n. 1, 2021.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. [s.l: s.n.].

FEPAM. **Banco de Dados** Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler, , 2021.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology Fourth Edition** Applied Hydrogeology, 2001.

FIESP; CIESP. **Áreas contaminadas: informações básicas** São Paulo Federação das Indústrias do Estado de São Paulo & Centro das Indústrias do Estado de São Paulo, , 2014.

HANSEN, É. **Tecnologias de Remediação de Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos**. [s.l.] UFRGS, 2013.

KAIPER, B. I. A. **Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos aromáticos em aquíferos contaminados por óleo diesel**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

LIU, X.; HE, S.; YANG, Y.; et al. A review on percarbonate-based advanced oxidation processes for remediation of organic compounds in water. **Environmental Research**, v. 200, 2021.

MAXIMIANO, A. M. DE S.; MORAES, E S. L. DE. Investigação para remediação. In: **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: IPT, 2014. p. 395.

PEREIRA, R. G. F.; FREITAS, J. G. DE. Fundamentos e aplicação do percarbonato de sódio para remediação de solos e águas subterrâneas por oxidação química. **Revista do Instituto Geológico**, v. 41, n. 2, 2020.

SANTANA, J. S.; CAMPOS, H. T. DE; OLIVEIRA, E. J. DE Q.; et al. AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ATENUAÇÃO NATURAL MONITORADA EM SOLOS CONTAMAINADOS POR ÓLEO DIESEL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 3, 2020.

SILVA, A. G.; SANTOS, C. A. A.; MEDEIROS, S. L. **VERIFICAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DOS PISOS E CANALETAS DE DRENAGEM OLEOSAS DA PISTA DE ABASTECIMENTO DE POSTOS REVENDADORES DE COMBUSTÍVEIS DA ZONA SUL DE ARACAJU**. Aracaju, 2020.

TAVARES, S. R. DE L. Técnicas de remediação. In: EMBRAPA (Ed.). **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos**. Joinville: Capítulo 2, p. 61 - 90, 2013.

TEIXEIRA, C. P. D. A. B.; JARDIM, W. D. F. **Processos Oxidativos Avançados: conceitos teóricos**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2004, v. 3, 83 p. **Caderno**

Temático, v. 03, p. 83, 2004.

YOSHIKAWA, N. K.; MAXIMIANO, A. M. DE S. Medidas Institucionais. In: **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: IPT, 2014. p. 395.

ANEXO A

A.1 Tabela propriedades de hidrocarbonetos e etanol

Hidrocarboneto	Fórmula condensada	Massa Molar (g mol ⁻¹)	Massa Específica (g cm ⁻³)	Solubilidade em água Sw, 25°C (mg L ⁻¹)	Pressão de vapor (atm)	Constante de Henry (atm m ³ mol ⁻¹)	Log K _{ow} (25°C)
Etanol	C ₂ H ₆ O	46,07	0,79	∞	7,80x10 ⁻²	6,30x10 ⁻⁶	-0,31
Benzeno	C ₆ H ₆	78,10	0,880	1780,0	1,25x10 ⁻¹	5,50x10 ⁻³	2,13
Tolueno	C ₇ H ₈	92,10	0,867	515,00	3,70x10 ⁻²	6,60x10 ⁻³	2,69
Etil-benzeno	C ₈ H ₁₀	106,20	0,867	152,00	1,25x10 ⁻²	8,70x10 ⁻³	3,13
p-xileno	C ₈ H ₁₀	106,20	0,860	198,00	8,95x10 ⁻³	5,00x10 ⁻³	3,15
m-xileno	C ₈ H ₁₀	106,20	-	187,00	8,03x10 ⁻³	5,00x10 ⁻³	3,20
O-xileno	C ₈ H ₁₀	106,20	0,880	175,00	6,97x10 ⁻³	4,00x10 ⁻³	3,12
Naftaleno	C ₁₀ H ₈	128,17	1,025	32,00	3,00x10 ⁻⁴	1,50x10 ⁻³	3,35
Acenaftileno	C ₁₂ H ₈	152,19	-	3,93	-	-	4,08
Acenafteno	C ₁₂ H ₁₀	154,21	-	3,4	-	-	4,32
Fluoreno	C ₁₃ H ₁₀	166,20	-	1,9	7,90x10 ⁻⁴	-	4,18
Fenantreno	C ₁₄ H ₁₀	178,23	0,980	1,3	8,90x10 ⁻⁷	3,50x10 ⁻⁵	4,57
Antraceno	C ₁₄ H ₁₀	178,23	1,283	0,05 – 0,07	7,90x10 ⁻⁹	-	4,63
Fluoranteno	C ₁₆ H ₁₀	202,25	-	2,6x10 ⁻¹	1,20x10 ⁻⁹	-	5,22
Pireno	C ₁₆ H ₁₀	202,25	1,271	1,4x10 ⁻¹	5,92x10 ⁻⁹	-	5,22
Benzo(a)antraceno	C ₁₈ H ₁₂	228,29	-	1,0x10 ⁻²	6,30x10 ⁻⁹	5,75x10 ⁻⁶	5,60
Criseno	C ₁₈ H ₁₂	228,29	-	2,0x10 ⁻³	3,80x10 ⁻¹¹	-	5,79
Benzo(b)fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂	252,31	-	1,2x10 ⁻³	-	-	6,60
Benzo(k)fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂	252,31	-	5,5x10 ⁻³	-	-	6,85
Benzo(a)pireno	C ₂₀ H ₁₂	252,30	-	3,8x10 ⁻³	2,30x10 ⁻¹⁰	1,20x10 ⁻⁶	6,04
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	C ₂₂ H ₁₂	276,33	-	6,2x10 ⁻²	-	-	7,70
Benzo(g,h,i)perileno	C ₂₂ H ₁₂	276,33	-	2,6x10 ⁻⁴	-	-	7,00
Dibenzo(a,h)antraceno	C ₂₂ H ₁₄	278,35	-	5,0x10 ⁻⁴	-	-	6,00

Fonte: Adaptado de KAIPER (2003)