

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LARISSA PISKLEVITZ

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA REMEDIAÇÃO POR EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA
EM POSTOS DE COMBUSTÍVEIS**

FRANCISCO BELTRÃO

2022

LARISSA PISKLEVITZ

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA REMEDIAÇÃO POR EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA
EM POSTOS DE COMBUSTÍVEIS**

Experimental analysis of remediation by multiphase extraction at fuel stations

Trabalho de Conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof.º Dr. Gabriel Cassemiro Mariano.

FRANCISCO BELTRÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LARISSA PISKLEVITZ

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA REMEDIAÇÃO POR EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA
EM POSTOS DE COMBUSTÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 08/dezembro/2022

Gabriel Cassemiro Mariano
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão

Douglas da Costa Ferreira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão

Juan Carlos Pokrywiecki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

FRANCISCO BELTRÃO

2022

Dedico este trabalho ao meu pai, pelo apoio aos
meus estudos.

RESUMO

Na conjuntura atual da civilização temos um crescente uso de combustíveis acontecendo no nosso cotidiano. Isso levanta a preocupação com a destinação e o controle correto no manejo dessas substâncias. O presente trabalho tem como objetivo analisar a extração multifásica como tecnologia de remediação dos solos nos postos de combustíveis, quando esses apresentam valores irregulares de substâncias contaminantes a nível subterrâneo. Através do experimento de bancada de um sistema de extração multifásica analisamos possíveis divergências teóricas e práticas. A partir das informações levantadas, foi realizada uma reflexão sobre os erros mais comuns e os pontos de atenção a serem considerados durante a aplicação do sistema.

Palavras chave: áreas impactadas; remediação; posto de combustível; extração multifásica.

ABSTRACT

In the current situation of civilization, we have a growing use of fuels happening in our daily lives. This raises the concern with the correct destination and control in the handling of these substances. The present work aims to analyze the multiphase extraction as a soil remediation technology at gas stations, when these present irregular values of contaminating substances underground. Through the bench experiment of a multiphase extraction system, we analyzed possible theoretical and practical divergences. From the information collected, a reflection was made on the most common errors and the points of attention to be considered during the application of the system.

Keywords: impacted areas, remediation, gas station, multiphase extraction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição das áreas contaminadas no Brasil em 2016.....	13
Figura 2 - Distribuição das áreas contaminadas no Estado de São Paulo em 2016	14
Figura 3- Ilustração esquemática da configuração de bombeamento simples.	17
Figura 4- Ilustração esquemática da configuração de bombeamento duplo.....	18
Figura 5- Ilustração esquemática da configuração de bombeamento do tipo bioslurping.....	19
Figura 6– Aparato experimental utilizado.	22
Figura 7- Areia utilizada no experimento com diferentes tamanhos de grãos. .	23
Figura 8 - Camadas de areia depositadas no aquário.....	23
Figura 9 – Posicionamento dos tubos de sucção dentro do aquário.....	24
Figura 10 – Conexão tubos de sucção com kitassato.	25
Figura 11 - Medição mais exata no kitassato.....	26
Figura 12 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 4mm com 7 repetições.....	29
Figura 13 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 4mm com 5 repetições.....	29
Figura 14 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 8mm com 7 repetições.....	30
Figura 15 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 8mm com 5 repetições.....	30
Figura 16 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 12mm com 7 repetições.....	31
Figura 17 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 12mm com 5 repetições.....	31
Figura 18 - Tempo médio de sucção de 1L de água para tubo de 4mm, 8mm e 12mm.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Sumário de vantagens e desvantagens do sistema MPE.	20
Tabela 2 - Tempos de extração de 1L de água com 7 repetições.	28
Tabela 3 - Tempos de extração de 1L de água com 5 repetições.	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	10
2.2	Objetivos gerais.....	10
2.3	Objetivos específicos.....	10
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1	Legislação.....	11
3.2	Áreas contaminadas.....	12
3.3	Principais compostos químicos.....	15
3.4	Remediação por extração multifásica.....	16
3.5	Aplicabilidade e limitações da tecnologia MPE.....	19
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
4.1	Aparato experimental.....	21
4.2	Procedimento experimental.....	22
4.3	Método para cálculo do erro.....	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5.1	Resultados experimentais.....	28
5.2	Erros experimentais e discussões.....	28
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP), o Brasil possui cerca de 43 mil postos revendedores de combustíveis automotivos atuantes (ANP, 2022). A gasolina possui substâncias amplamente conhecidas pelo seu poder carcinogênico, são os BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno), consideradas potenciais contaminantes ambientais. No diesel os elementos com maior potencial carcinogênico estão na classe dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, como por exemplo, os naftalenos e os benzo(a)pirenos. Uma vez derramados esses combustíveis fósseis são considerados potenciais contaminantes ambientais (FINOTTI; ROGRIGUEZ; CAICEDO, 2001).

Para proteger os solos e as águas subterrâneas, existem legislações ambientais e os órgãos ambientais auxiliam no monitoramento dos compostos tóxicos derivados de hidrocarbonetos de petróleo dos postos revendedores de combustíveis, através de uma avaliação de passivo ambiental. Quando forem identificados valores acima dos padrões aceitos pelos órgãos competentes, é necessária interferência e o uso de técnicas efetivas de remediação para a reparação deles. Dentre essas técnicas estão a Extração Multifásica (MPE: *Multi-Phase Extraction*), alternativa mais difundida (GEGORCZYK; PICCIONI, 2011).

De acordo com Gerforczyk e Piccioni (2011), a MPE tem grande destaque como uma opção eficiente dentre os procedimentos de remediação de áreas contaminadas. Ele permite a extração da fase livre, fase vapor e fase dissolvida na matriz do solo, é um processo seguro e pouco oneroso para retirada de compostos tóxicos e por isso tem sido uma das técnicas mais utilizadas em postos de combustíveis. O método acontece através da instalação de poços de extração onde é gerado um gradiente de pressão. Ele atua no processo de biodegradação natural, usando tecnologias de bioventilação e o vácuo para remover as massas, forçando os poluentes a irem até os postos de extração, onde é feita a remoção.

Mas toda execução experimental está sujeita a erros, e a aplicação do sistema MPE deve estar atenta aos possíveis erros experimentais que podem gerar incertezas e comprometer a exatidão desse processo. Os erros geralmente são classificados em dois componentes: erro aleatório e erro sistemático (NETO, 2015).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho é, a partir de um modelo experimental, definir padrões fluidodinâmicos de escoamento multifásico e calcular o erro experimental para um possível planejamento experimental de extração multifásica, buscando contribuir como referência bibliográfica para pesquisas acadêmicas futura.

2.2 Objetivos específicos

1. Construir aparato experimental capaz de simular a extração multifásica;
2. Identificar variáveis e atribuir padrões de comportamento;
3. Analisar dados experimentais e fazer tratamento sobre erros.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Legislação

A partir da Constituição Federal de 1988, no artigo 225, foi criada uma tentativa de reduzir os impactos ambientais das atividades de produção e consumo, obrigando o explorador dos recursos naturais a recuperar o meio ambiente e solucionar possíveis danos que possam acontecer (MAIA; MATTOS, 2018).

No ano de 2000, foi criada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) a principal norma para os postos de combustíveis, Resolução no. 273, na qual se refere que os postos revendedores de combustíveis se configuram como empreendimentos parcialmente ou potencialmente poluidores e causadores de acidentes ambientais (BRASIL, 2000). Com isso, esses locais dependem de licenciamento prévio do órgão ambiental competente em relação à construção, ampliação, localização, operação e modificação, e em caso de desativação o proprietário do posto é obrigado a apresentar um plano de encerramento de atividades (GEGORCZYK; PICCIONI, 2011). Além disso, a resolução determina que os equipamentos e os sistemas para guardar e distribuir combustíveis devem ser testados e avaliados no máximo a cada cinco anos (BRASIL, 2000).

Em 2009 a CONAMA criou a Resolução 420, que dispõe sobre os critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas por esses componentes em decorrência de atividades antrópicas (CONAMA, 2009).

Outras resoluções em destaques são a CONAMA 239/2001 que disserta sobre o plano de emergência individual, a Resolução CONAMA 319/2002 na qual dispõe sobre prevenção e controle da poluição em locais revendedores de combustíveis e serviços, e a Resolução CONAMA 357/2005 que estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e as classes dos corpos da água superficial. Para realizar a comparação dos dados das análises químicas em locais contaminados, utilizam-se os valores da CETESB para águas subterrâneas e solos, definidos em 2005 pelo documento “Decisão de Diretoria no 195-2005-E”. Como a CETESB não possui todos os dados dos contaminantes possíveis, ela utiliza padrões baseados na lista holandesa (ARAUJO, 2009).

Em relação à penalidade, a Lei de Crimes Ambiental no. 9.605 de 1998 recebe destaque, ela disserta sobre ações penais e administrativas, além de sanções aplicáveis às atividades prejudiciais ao meio ambiente (BRASIL, 1998).

O primeiro estado do território brasileiro a aprovar uma lei específica para áreas contaminadas foi São Paulo, no ano de 2009, quando sancionou a Lei no. 13.577, que em 2013 foi regulamentada pelo Decreto no. 59.263. Essa lei estabeleceu procedimentos para gerenciamento de ambientes afetados pela contaminação e sobre procedimentos para a proteção da qualidade do solo, dentre outras providências (CANARIO; BETTINE, 2020). Meio as legislações são exigidas normas técnicas da ABNT que são bastante específicas, por exemplo, a NBR 15495/2007 e 15847/2010 estabelece os padrões para construir poços de monitoramento e amostragem, e a certificação 17025/2017, padrão de calibração ensaio e controle de amostras para laboratórios que fazem análises de amostras coletadas em áreas sob investigação (TEIXEIRA et al., 2016).

3.2 Áreas contaminadas

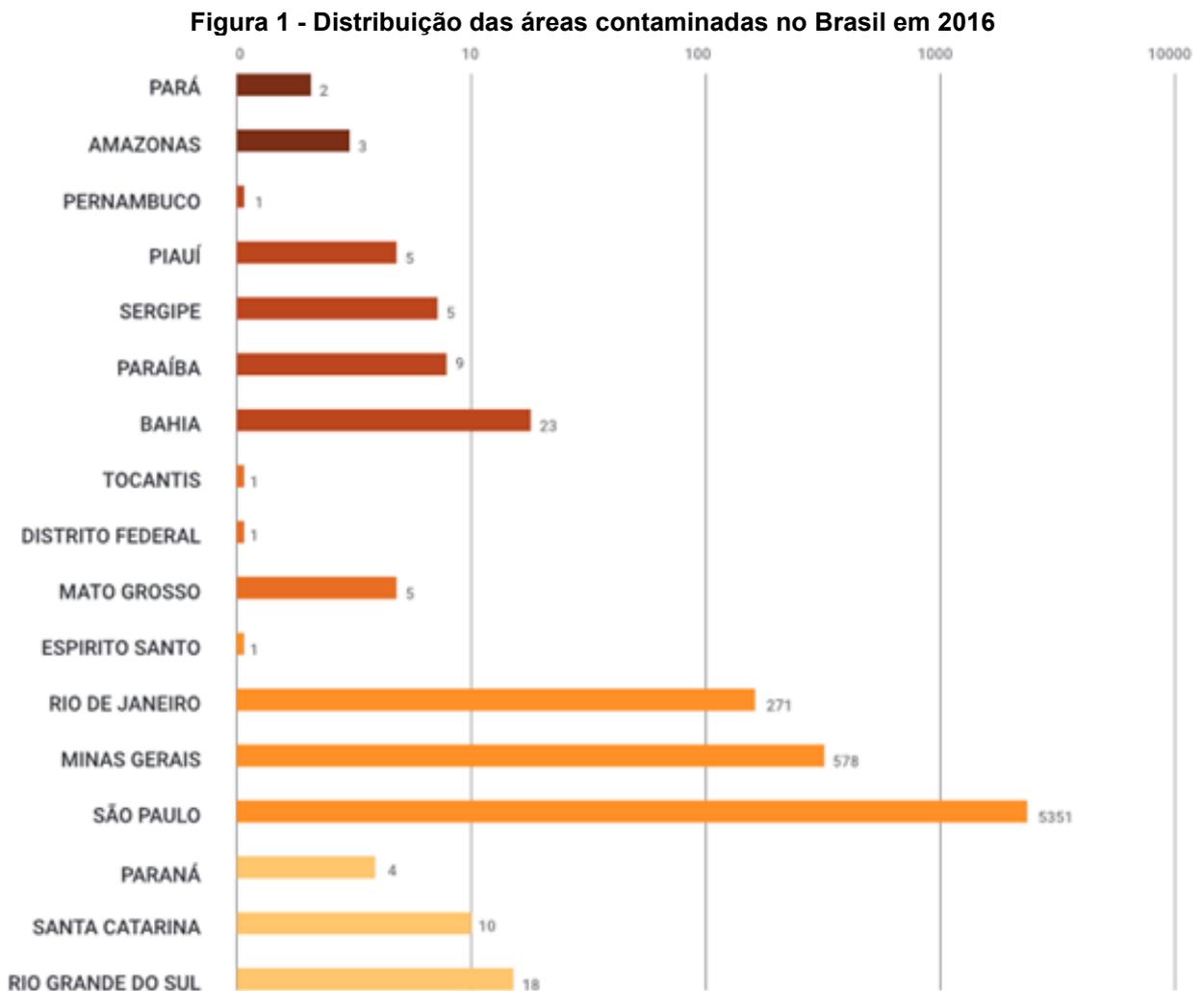
Área contaminada é área, terreno, edificação, local, instalação ou benfeitoria que possua concentrações ou quantidades de substâncias ou resíduos que tenham sido acumuladas, armazenadas, depositadas, infiltradas ou enterradas de forma acidental, planejada ou naturalmente e que possam resultar em danos ao meio ambiente, à saúde humana ou a outro bem a proteger (SÃO PAULO, 2009).

Segundo CETESB 2022, o número de áreas contaminadas vem crescendo linearmente desde 2002, em 2022 foram registradas 6.604 áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo, desse total 72,38% ou 4.780 áreas tinham como atividade principal a revenda de combustíveis derivados de petróleo e a principal técnica utilizada é a extração multifásica, totalizando 1333 áreas. Os principais compostos químicos encontrados são: combustíveis automotivos, solventes aromáticos (basicamente representados pelo tolueno, benzeno, xilenos e etilbenzeno), solventes halogenados, TPH e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) (CETESB, 2017).

Por meio Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, foi criado o Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) com o objetivo de definir medidas de intervenção adequadas e eliminar o risco e os danos à população e ao meio

ambiente. O gerenciamento trabalha com um conjunto de medidas que visa conhecer as características das áreas contaminadas, planejar e implementar ações para reabilitar a área (MORAES; TEIXEIRA; MAXIMINIANO, 2013).

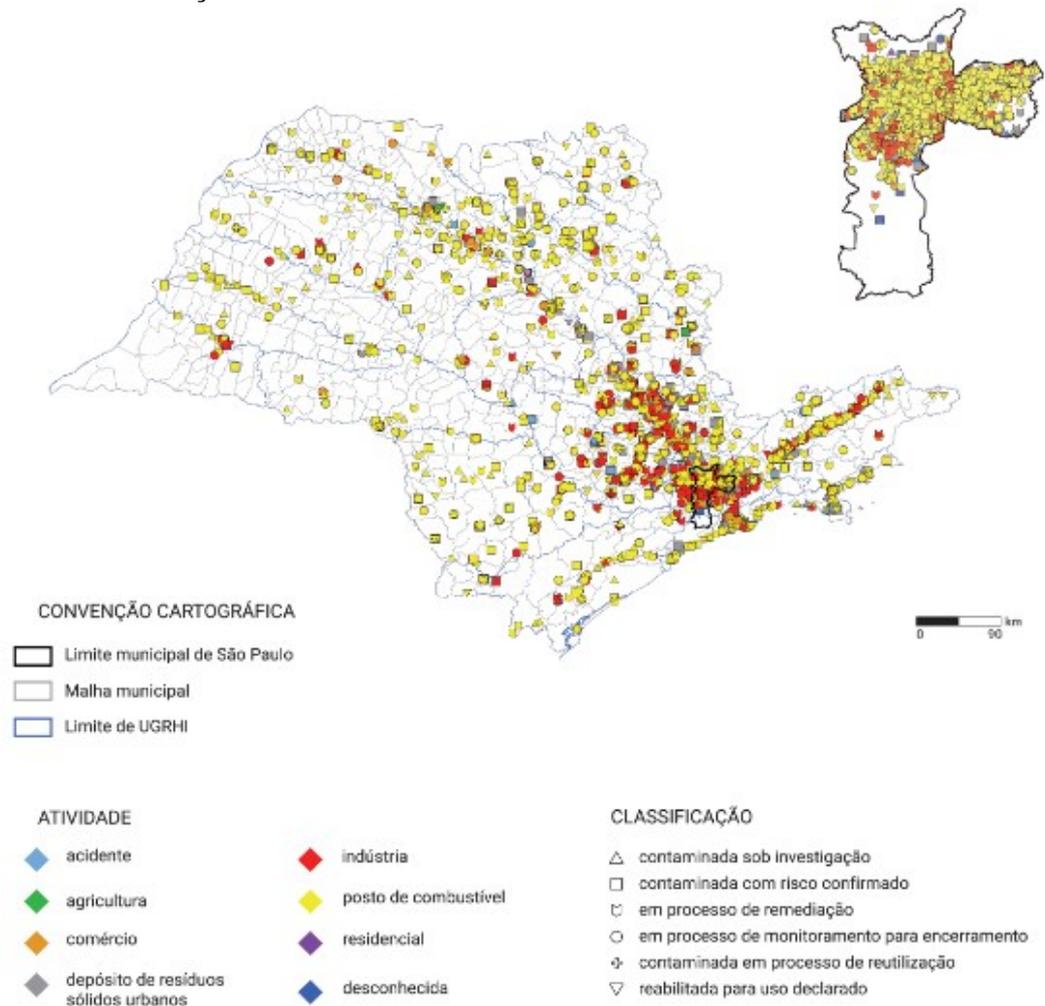
Foi elaborado um Banco de Dados Nacional sobre Áreas Contaminadas (BDNAC) com o objetivo de divulgar dados disponibilizados pelos diversos órgãos de prevenção e monitoramento. Dentre eles os mais atuantes são as entidades estaduais de meio ambiente, porém, atualmente, somente três estados alimentam o banco de forma constante: São Paulo (CETESB), Rio de Janeiro (INEA) e Minas Gerais (FEAM) (CANARIO; BETTINE, 2020). Um estudo de Teixeira et al. (2016) englobando todo o país, identificou a estimativa de áreas contaminadas por estado brasileiro, Figura 1. Como verificado na Figura 1, o maior número de áreas contaminadas está no estado de São Paulo.



Fonte: Teixeira et al. (2016).

No mesmo estudo Teixeira et al. (2016), apresentou dados apresentados por um estado participante do BNDAC, São Paulo, que de forma controlada atua com gerenciamento das áreas contaminadas - GAC. Na Figura 2 pode ser observada a distribuição de áreas contaminadas no estado de São Paulo, na legenda de cores são definidas as atividades desenvolvidas na área, e o formato da figura definem a classificação quanto ao GAC.

Figura 2 - Distribuição das áreas contaminadas no Estado de São Paulo em 2016



Fonte: Teixeira et al. (2016)

No Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB, define a etapa de cada procedimento realizado nas etapas do GAC. Considerando o GAC a remediação é a etapa posterior a confirmação de toxicidade do meio. A remediação é definida como a aplicação de técnicas em um local contaminado, com o objetivo de remover ou conter os contaminantes presentes, garantindo uma utilização para a área, com limites aceitáveis de riscos aos bens a proteger (CETESB, 2001).

3.3 Principais compostos químicos

Os combustíveis derivados de petróleo podem ter em sua composição até 400 componentes químicos, ele é formado pela mistura de várias substâncias e produtos orgânicos, a exemplo de aditivos antioxidantes, oxigenados e detergentes. Ambientalmente os compostos mais conhecidos são os BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) (SOUZA; LODI; KAISER, 2015). Após derramados no solo esses compostos podem estar em misturas ou livres, no estado líquido, sólido ou gasoso, eles são influenciados por diferentes fatores, incluindo as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo e fatores como a precipitação e a temperatura (FATORELI, 2005).

Segundo Maia e Mattos (2018), quando acontecem vazamentos em tanques, filtros, tubulações, bombas de combustíveis, ou quando acontecem contaminações de forma esporádica, como na lavagem de veículos e troca de óleo, os hidrocarbonetos ocasionam quatro formas de contaminações no meio ambiente: fase residual, que ocorre quando pequenas concentrações do contaminante atravessa espaços no solo e da rocha; fase gasosa, que acontece quando o contaminante evapora; fase livre, o contaminante não altera de fase, permanece líquido; fase dissolvida na água subterrânea, na qual o contaminante estará junto com a água subterrânea e formarão plumas, que irão se propagar conforme o fluxo do lençol freático.

Uma vez derramados, esses combustíveis podem chegar até as fontes de abastecimento de água, e por conta da polaridade ela ficará como líquido na fase não aquosa, e por transferência de massa irá acontecer uma dissolução parcial dos compostos químicos na água. A presença de etanol na gasolina, conforme regulamentado pela legislação brasileira, faz com que esse combustível fique mais solúvel em água, facilitando o transporte de contaminantes entre fases. Compostos provenientes do óleo diesel e óleos lubrificantes têm menor mobilidade e solubilidade na água do que a gasolina, resultado de suas longas cadeias (MAIA; MATTOS, 2018).

Para preservar a água subterrânea, quando na renovação da licença ambiental de postos de combustíveis, os órgãos ambientais solicitam a avaliação do passivo ambiental que seria um documento análogo a um atestado de saúde, um

documento que comprove que o posto de combustível opera em perfeito estado, sem causar danos ao meio ambiente. A legislação se baseia em concentrações limites aceitos para cada contaminante, sendo que se as concentrações estiverem acima dos padrões aceitos pelo órgão competente, é necessário aplicar as técnicas de remediação até que os valores fiquem dentro dos limites aceitos (VASCONCELOS; et. al., 2014).

3.4 Remediação por extração multifásica

Diferentes técnicas de remediação são utilizadas para remediar as áreas contaminadas até os padrões aceitáveis. A remediação tem um alto custo e requer um grande período de tempo, então se faz necessário analisar vários fatores para escolher a melhor técnica (GEGORCZYK; PICCIONI, 2011). Para a remediação de solos e águas subterrâneas afetadas com hidrocarbonetos de petróleo são utilizadas técnicas ativas e passivas. As ativas são aquelas realizadas pelo homem e as passivas são as que sofrem a biodegradação natural (SILVA, 2020).

De acordo com Maia e Mattos (2018), antes de começar a remediação, deve-se contratar uma empresa especializada para verificar a suspeita de contaminação, realizando-se um diagnóstico preliminar fazendo uma inspeção visual na área e ao seu redor. Posteriormente a técnica de Soil Gas Survey é feita, essa técnica consiste em fazer perfurações de pequeno diâmetro no solo para verificar a concentração dos vapores presentes. Caso se confirme a contaminação são necessárias outras técnicas mais específicas como a campanha confirmatória com delimitação da pluma de contaminantes. Caso os resultados das amostras estejam acima dos valores permitidos, deve-se realizar uma avaliação de risco. Após todos esses passos, se dá início a remediação.

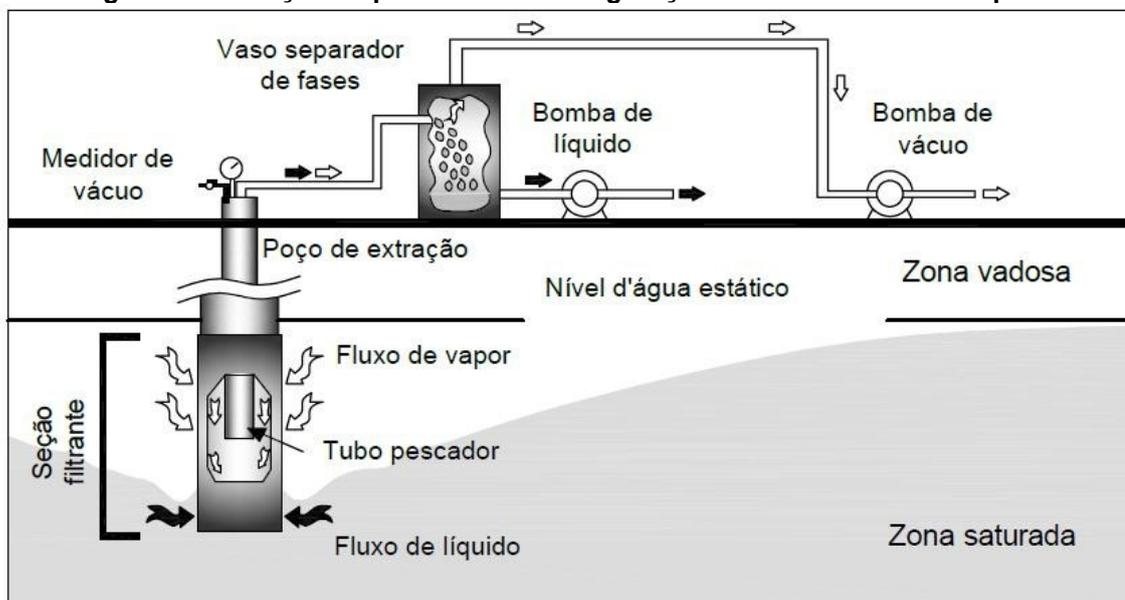
Segundo Araujo (2009), a extração multifásica é uma das principais técnicas utilizadas para remediação, pois realiza a remediação do solo e da água subterrânea em locais com pequena permeabilidade, evitando escavações; é necessário um número menor de poços porque essa técnica aumenta o raio de influência de poços individuais de recuperação; remedia a franja capilar; recupera as camadas superficiais de produtos em fase livre; e remedia contaminantes voláteis ou em fase residual que está acima e abaixo da superfície freática.

A remediação MPE recupera condições ambientais em zonas saturadas e zonas vadasas, remediando a contaminação que esteja na fase gasosa, fase não aquosa, (NAPL), dissolvida ou que é residual. A remoção de massa acontece por meio de dissolução, volatilização e por transporte advectivo. Esse sistema é definido pela aplicação de vácuo a um poço de extração, aumentando o rebaixamento efetivo e a remoção de massa de contaminantes voláteis e semi-voláteis, assim facilitando a extração por volatilização. A combinação do uso de água e ar para transportar massa, é uma característica única da tecnologia MPE na remediação (EPA, 1999).

O sistema MPE possui, entre as várias existentes, três principais configurações nomeadas pela maneira de realizar o bombeamento, sendo elas: bombeamento simples, duplo e *bioslurping*. A torre de *stripping* é responsável pela aeração do efluente bombeado pela remediação e normalmente está associado ao sistema MPE (ARAUJO, 2009).

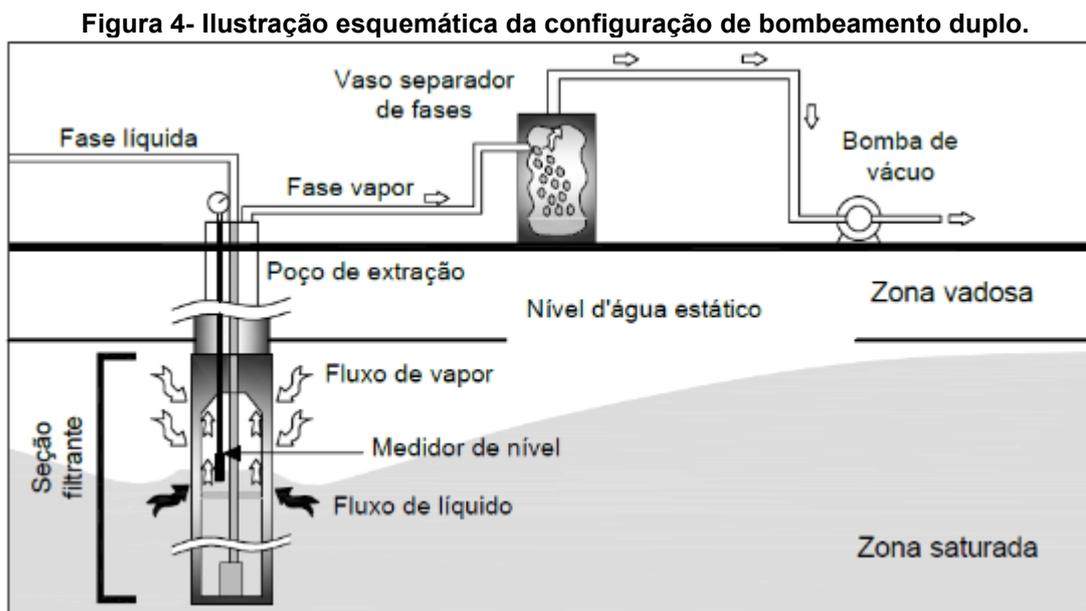
Para bombeamento simples, um único tubo é inserido no poço de extração para remover através de uma bomba de vácuo a fase líquida e a fase vapor do local, conforme a Figura 3. Esse arranjo pode ser aplicado em poços de até aproximadamente 6 metros de profundidade. A pressão negativa que é fornecida pelo vácuo absoluto chega a medir cerca de -1atm, ou seja, é equivalente à pressão do módulo (BORTONI, 2018).

Figura 3- Ilustração esquemática da configuração de bombeamento simples.



Fonte: Bortoni (2018).

Para bombeamento duplo é colocada uma bomba submersa juntamente com uma bomba a vácuo presente na parte inicial do poço de extração, o esquema é apresentado na Figura 4. Por meio de dois tubos mergulhados independentes, os fluxos de vapor e líquido irão ser separados. Para realizar a remoção da fase livre, extraindo líquidos, geralmente são utilizadas bombas submersas pneumáticas (BORTONI, 2018).



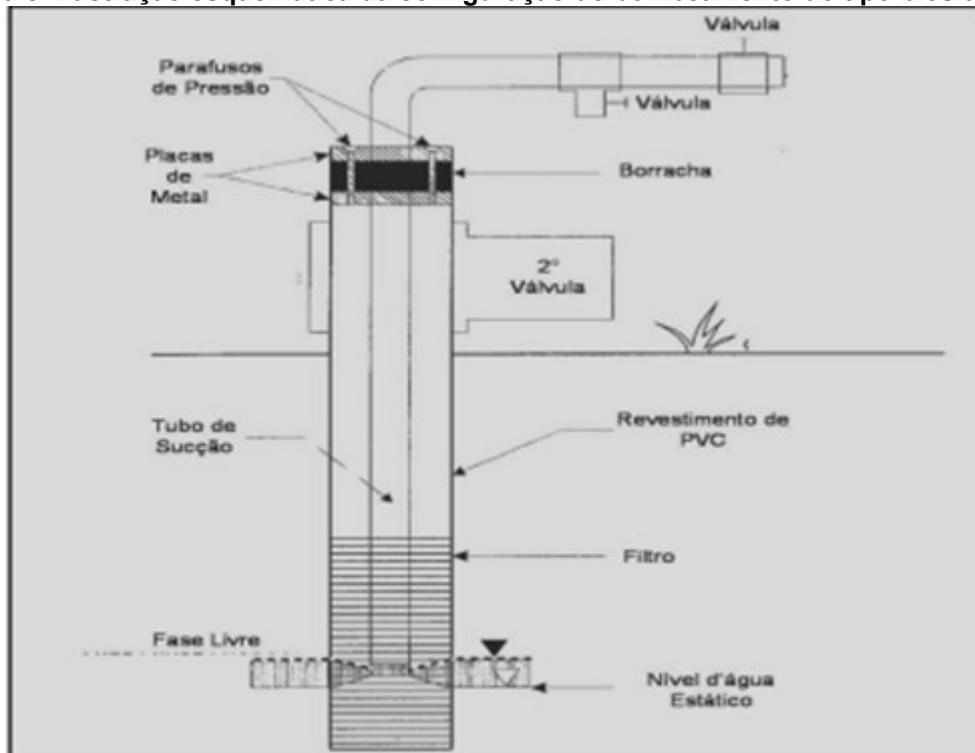
Fonte: Bortoni (2018)

Embora os custos de operação, instalação e manutenção sejam maiores do que no bombeamento simples, o bombeamento com maior número de bombas é um sistema mais prático de balancear e de operar quando há cinco ou mais poços, resultando em uma maior flexibilidade após a escolha da pressão a vácuo ótima para o conjunto (ARAUJO, 2009).

A técnica de *bioslurping* é uma configuração possui apenas uma pequena variação no bombeamento de produtos em fase livre, comprada ao bombeamento simples, e é aplicado usualmente para recuperação de produtos em fase livre. Um tubo que faz o bombeamento é colocado dentro do poço de extração na interface líquido-ar ou abaixo dela, esse tubo não é fixo, possibilitando ajustar a profundidade dele em função da flutuação sazonal ou conforme a espessura da fase livre se altere, esquema apresentado na Figura 5. O sistema *bioslurping* é capaz de remover apenas um tubo mergulhado no poço de extração, água, fase livre sobrenadante

(LNAPL) e ar. Através da adição de fluxo de ar, essa configuração aumenta a biodegradação *in situ* de hidrocarbonetos aromáticos (BORTONI, 2018).

Figura 5- Ilustração esquemática da configuração de bombeamento do tipo bioslurping.



Fonte: Araujo (2009)

3.5 Aplicabilidade e limitações da tecnologia MPE

O parâmetro de maior interesse para o sucesso de uma remediação pela tecnologia MPE é a condutividade hidráulica (K), pois demonstra a capacidade que um meio tem de transportar água. Esse método é muito utilizado em formações de granulometria fina, resultando em um bom rendimento em áreas com areias finas até locais arenosos ($K = 10^{-3}$ cm/s, até $K = 10^{-5}$ cm/s). Se o K for menor do que 10^{-6} , é necessário utilizar permeabilidades secundárias (EPA, 1996).

Segundo Araujo (2009), a formação de vácuo em um sistema MPE remove os fluidos da zona capilar que são formados pela baixa permeabilidade intrínseca, nas quais forças de capilaridade retêm fluidos nos espaços porosos. Isso faz com que essa tecnologia apresente uma vantagem na recuperação de LNAPL, que se acumulam na interfase entre a água e o ar.

A transmissividade também é um parâmetro importante para a aplicação da remediação MPE, as condições menores que $0,5$ m³/dia/m são geralmente favoráveis para a utilização dessa remediação, com a pressão reduzida meio aos

poros, os contaminantes voláteis, se transformam em vapores e são transportados no sentido da baixa pressão, percorrendo a distância até o poço de extração de forma mais rápida.

No Tabela 1 a seguir pode ser verificado um comparativo das vantagens e desvantagens da remediação por extração multifásica. Uma das vantagens mais importante é o poder que esse sistema tem em funcionar em áreas de baixa a moderada permeabilidade (ARAUJO, 2009).

Tabela 1- Sumário de vantagens e desvantagens do sistema MPE.

Vantagens	Desvantagens
Potencial biodegradação aeróbica de BTEX dissolvidos.	Requer bomba de vácuo ou soprador.
Eficaz em solos de moderada a baixa permeabilidade.	Potencialmente maiores requisitos de tratamento, como resultado de emulsões NAPL e VOC.
Remoção eficaz em locais de baixa permeabilidade, onde a única outra opção viável de reparação seria escavação.	Arranque inicial e os períodos de ajuste podem ser mais longos em comparação com abordagens convencionais de bombeamento.
Eficaz para remediação simultânea de fase dissolvida, vapor, residual e não aquosos.	Custos mais elevados custos de capital em comparação com abordagens convencionais de bombeamento.
Cria potencialmente grande raio de influência e aumentou zonade captura.	Limitações de profundidade se aplicam a algumas configurações MPE.
Aumenta a recuperação de fluido total, minimiza o levantamento e manchas de produto gratuito e maximiza a transmissividade do aquífero na cabeça do poço.	
Redução do número de poços necessários para recuperação.	
Eficaz para a remediação da zona capilar.	
Reduz a duração da reparação dos danos em comparação com abordagens convencionais de bombeamento.	

Fonte: Gegerczyk; Piccioni (2011)

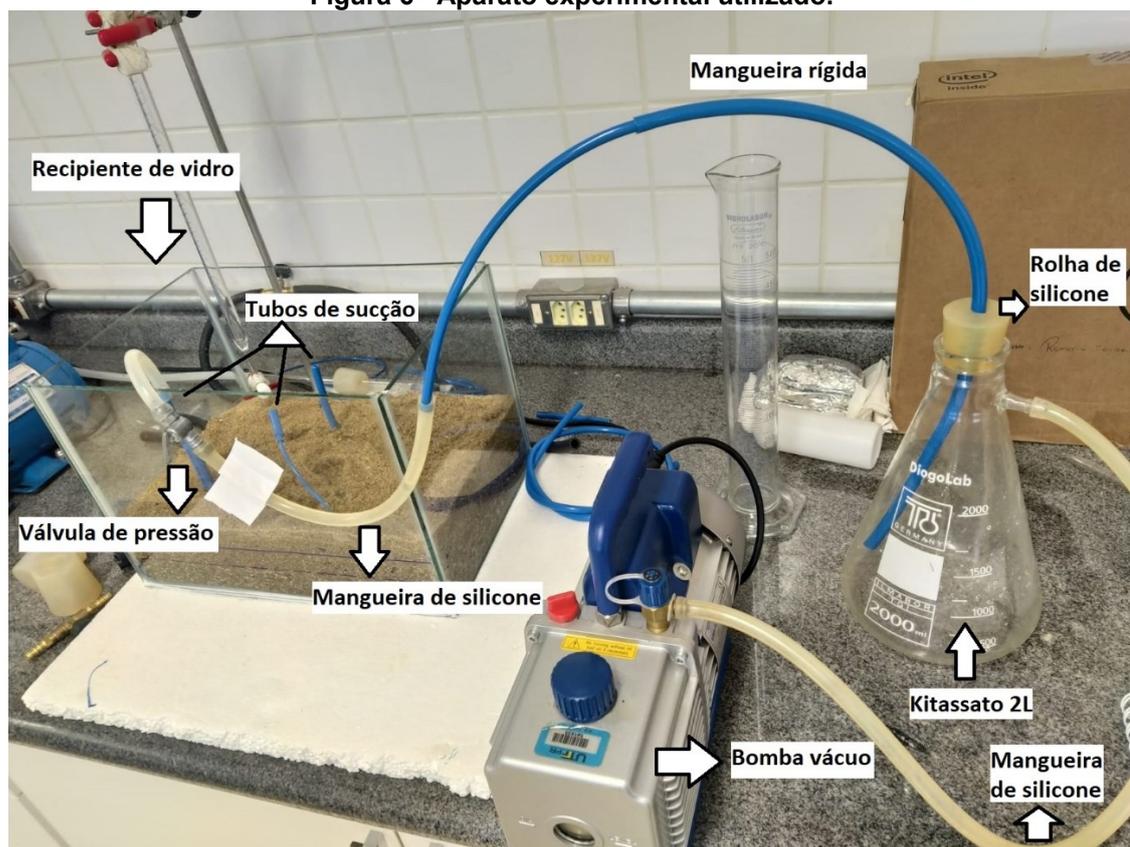
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Aparato experimental

O material utilizado consiste em um recipiente de vidro retangular com abertura superior, um aquário, com dimensões de 35 cm de comprimento e 25 cm de largura e 25 cm de altura. Foi adicionado ao aquário areia de três camadas que continham três diferentes faixas granulométricas. A camada de areia mais profunda possui uma espessura de 4 cm e granulometria entre 0,2 cm e 0,4 cm, na segunda camada foi acomodada areia até espessura de 2,5 cm e granulometria entre 0,1 e 0,2 cm, a camada superficial possuiu 2,5 cm e granulometria de 0,07 cm e 0,1 cm.

Para fazer os pontos de sucção, ou de baixa pressão foi utilizada mangueira rígida, foram construídos três pontos de sucção, simulando três poços de extração. Os poços de extração simulados apresentavam mesma altura de parte lisa, mesma altura de ranhuras ou filtros, sendo a diferença os diâmetros de 4 mm, 8 mm e 12 mm. Para realizar a extração da água, nos tubos dos poços foi utilizada uma mangueira de silicone, uma bomba vácuo, uma válvula de pressão e um kitassato de 2 L que serviu de tanque pulmão. Também foi usada uma rolha de silicone na entrada do kitassato possibilitando a formação de baixa pressão. Para medição de água extraída, foi utilizado uma proveta de 500 mL e uma de 1L, por serem vidrarias com maior precisão de medição. Para repor água ao sistema foi separado 5 béqueres de 250 mL. A Figura 6 apresenta o aparato experimental utilizado.

Figura 6– Aparato experimental utilizado.



Fonte: Autoria própria.

4.2 Procedimento experimental

Para representar o solo foi escolhida areia devido sua baixa concentração de material orgânico. Para separação da parte de interesse foi feito um peneiramento, no experimento foram utilizadas diferentes granulometrias, conforme a Figura 7. Para a determinação do diâmetro das partículas de areia foram selecionadas peneiras de 5, 9, 16 e 24 Mesh. A primeira camada depositada no aquário foi produzida pelas peneiras de 5 e 9 Mesh, resultando em um diâmetro das partículas de 2mm e 4mm. A segunda faixa foi feita com peneiras de 9 e 16 Mesh, totalizando uma granulometria de 1 mm e 2 mm. A terceira e última camada foi obtida com peneiras de 16 e 24 Mesh e o dimensionamento dos grãos foi de 710 μ m e 1 mm.

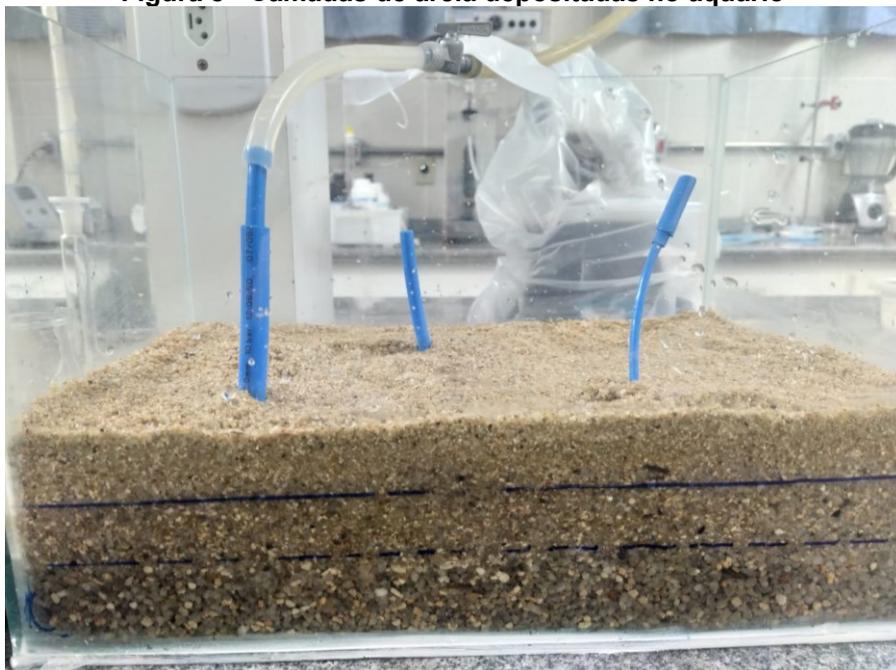
Figura 7- Areia utilizada no experimento com diferentes tamanhos de grãos.



Fonte: Autoria própria (2022)

A areia foi acomodada em um aquário, simulando um terrário para realização do experimento. A primeira camada ficou com 4cm de altura dentro do aquário, a segunda e a terceira com 2,5cm cada, mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Camadas de areia depositadas no aquário



Fonte: Autoria própria (2022)

Foram empregados três tubos rígidos para realização de sucção da água, na qual representa o lençol freático. Os tubos possuem diâmetros de 4mm, 8mm e 12mm, e para que não houvesse sucção da areia junto com a água foi fechado com cola quente a abertura do tubo que fica no fundo e feito pequenas aberturas laterais horizontais, simulando uma seção ranhura ou filtro da tubulação. Os três tubos foram posicionados de modo que estivessem inseridos totalmente em todas camadas de areias e que cada diâmetro ficasse em uma área do aquário, sendo que o diâmetro médio ficasse próximo do meio do recipiente, conforme a Figura 9. Como os diâmetros dos tubos eram distintos e para fazer a conexão do tubo com o kitassato utilizou-se apenas um diâmetro de mangueira, na qual encaixava perfeitamente no tubo de espessura 8mm. Foi encaixado um pequeno pedaço do tubo de 8mm no tubo de 12mm e um pedaço de 6mm e 8mm no tubo de 4mm.

Figura 9 – Posicionamento dos tubos de sucção dentro do aquário.



Fonte: Aatoria própria (2022)

Para fazer a ligação dos tubos do aquário para o kitassato de 2 L, foi utilizada mangueira de silicone, conectada à válvula de pressão manifestado na Figura 10. O kitassato também foi conectado a bomba vácuo com um pedaço de mangueira de silicone.

Figura 10 – Conexão tubos de sucção com kitassato.



Fonte: Autoria própria (2022)

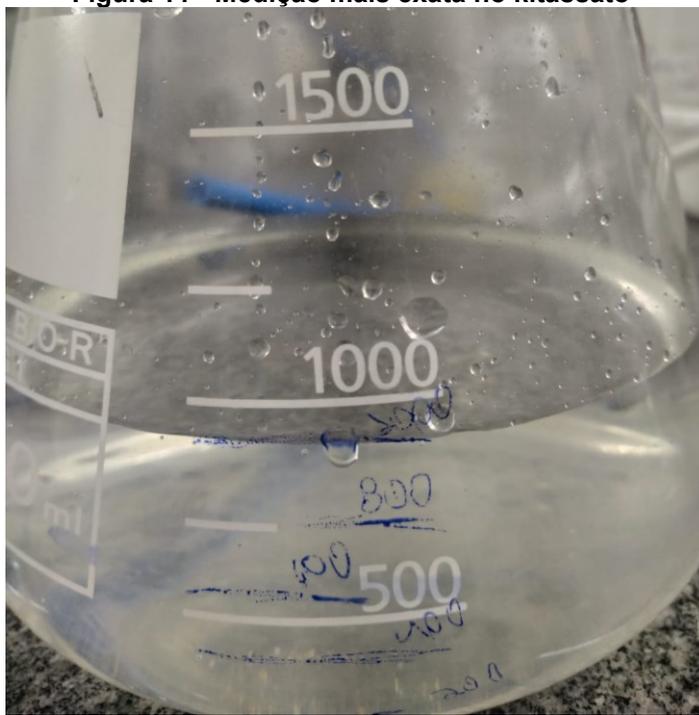
A próxima etapa foi a adição de água no recipiente até o limite da areia, transformando todo meio poroso em zona saturada, o que resultou em 4,5L depositados dentro do vidro.

Para realização da sucção foi necessária a inserção de uma válvula de pressão com objetivo de reduzir drasticamente a vazão, pois a vazão da bomba vácuo de 65L/min tornou a sucção muito rápida. A válvula utilizada não tem medição, ela é geralmente utilizada para controlar a vazão de gases de cozinha, então foi preciso fazer alguns testes para que pudesse determinar em qual vazão o experimento seria realizado. A mangueira foi conectada no tubo de maior diâmetro e a válvula foi regulada para que saísse a menor vazão possível, pois sabendo que se a menor vazão funcionava no tubo de maior diâmetro ela também funcionaria em tubos de diâmetros menores.

Com todo equipamento regulado e encaixado, a bomba ligada e ligada e ao mesmo tempo o cronômetro começava a contar o tempo. Como o kitassato não tem uma medição muito exato, foi medido com uma proveta de 500mL a cada 200mL até atingir 1 L e remarcado o valor no vidro, conforme a Figura 11. A cada 200mL de água extraída do aquário o volume era repostado com água reservada em béqueres. A água reservada nos béqueres também era medida antes em uma proveta de 500mL por obter resultados mais precisos. Quando o volume atingia 1L a bomba era

desligada e o cronômetro parado, o valor extraído era conferido na proveta de 1L e o tempo anotado. Esse processo foi realizado 21 vezes, 7 para cada diâmetro de tubo.

Figura 11 - Medição mais exata no kitassato



Fonte: Aatoria própria (2022)

4.3 Método para cálculo do erro

As origens dos erros de cálculo são classificadas em duas categorias: erro sistemático e erro aleatório. Desvios constantes nos resultados num mesmo sentido são consequências de erros sistemáticos, e estão associados a erros de cálculo, erros operacionais, erros pessoais e erros devido a instrumentos e reagentes. Já os erros aleatórios são produto de efeitos de variáveis descontroladas nas medidas. As variações são inerentes ao sistema, irregulares e resultam em variabilidade (BACCAN et al., 2001).

Segundo Vuolo (1996), os erros sistemáticos podem ser classificados em teóricos, ambientais, observacionais e instrumentais. O erro ambiental é causado pelos efeitos do ambiente sobre o experimento, como temperatura, umidade, pressão, campo magnético terrestre, ondas de rádio, aceleração da gravidade, entre outros. Erro observacional é um erro sistemático devido a falhas de procedimento do observador, por exemplo, o efeito parallax na leitura de escalas instrumentais causado pelo não alinhamento correto entre o olho do observador, o ponteiro

indicador e a escala do instrumento. Outro erro comum desse tipo é disparar um cronômetro sempre atrasado na medida de um intervalo de tempo. O erro instrumental é um erro que resulta da calibração do instrumento de medida.

Conforme familiarização com o experimento em bancada laboratorial estimou-se que diversos fatores são inclusos no tipo de erro ambiental, devido a precisão dos equipamentos disponíveis o erro observacional também pode ser assumido. A repetição dos experimentos e comparação dos resultados, removendo o menor valor e o maior valor foi o método para determinação do erro experimental.

Para cálculo foi considerada a estimativa do valor verdadeiro da grandeza, uma boa avaliação para o valor mais provável ou correto do valor será a média aritmética integral dos valores desviantes, conforme Equação 1:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

Sendo, \bar{X} a média aritmética simples, " $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ " os valores dos dados e n a quantidade de dados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados experimentais

Para fornecer uma estimativa do erro experimental e efetuar um controle da variância residual, foram realizadas 7 réplicas para cada tubo de sucção (4mm, 8mm e 12mm). Os resultados são apresentados na Tabela 2, onde cada repetição ficou na vertical e foi chamada de Tx, no qual x representa a ordem de cada experimento, na horizontal temos os dados sequenciais para os três diferentes diâmetros do tubo utilizada na sucção, cada linha apresenta os 7 resultados de cada experimento. O tempo dos segundos sempre foi arredondado para múltiplos de 5.

Tabela 2 - Tempos de extração de 1L de água com 7 repetições.

Diâmetro tubo sucção (mm)	Tempo de extração de 1L						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
4	4min5s	4min10s	4min15s	4min10s	4min20s	4min05s	3min55s
8	7min30s	10min20s	4min50s	14min10s	5min40s	6min30s	6min15s
12	17min40s	5min55s	7min10s	6min30s	7min	5min15s	6min45s

Fonte: Autoria própria (2022)

Com o objetivo de aumentar a exatidão do experimento pela redução do erro da média, retirou-se o maior e o menor tempo obtido na sucção a partir de cada experimento conforme diâmetro de cada tubo, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Tempos de extração de 1L de água com 5 repetições.

Diâmetro tubo sucção (mm)	Tempo de extração de 1L				
	T1	T2	T3	T4	T5
4	4min5s	4min10s	4min15s	4min10s	4min05s
8	7min30s	10min20s	5min40s	6min30s	6min15s
12	5min55s	7min10s	6min30s	7min	6min45s

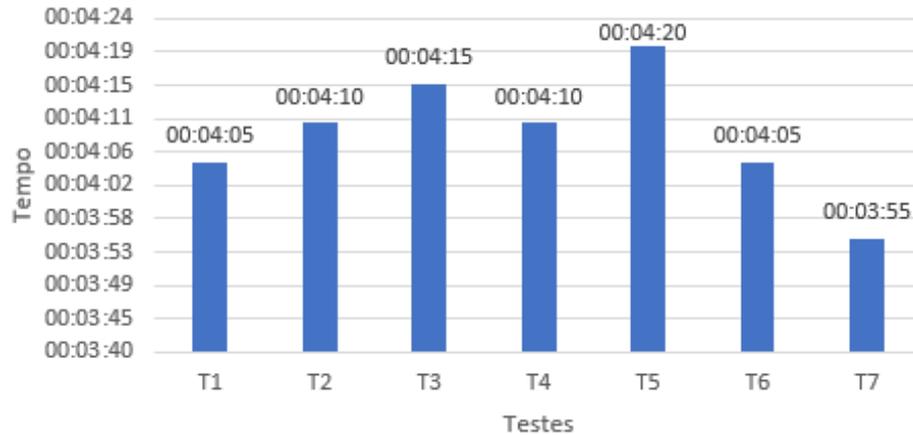
Fonte: Autoria própria (2022)

5.2 Erros experimentais e discussões

Para calcular o valor médio de cada experimento utilizou-se a equação 1, já citada anteriormente, com o auxílio da função “média” no software Excel. Foi elaborada um gráfico com dados para 7 réplicas e um gráfico otimizado com os 5 valores encontrados quando excluído o menor e o maior tempo de extração para cada diâmetro de tubo utilizado.

A Figura 12 mostra o tempo em que cada um dos 7 experimentos obteve ao extrair 1 L de água e ar utilizando um tubo de 4 mm, com isso foi calculado o tempo médio do experimento, nesse caso de 4 min 09 s.

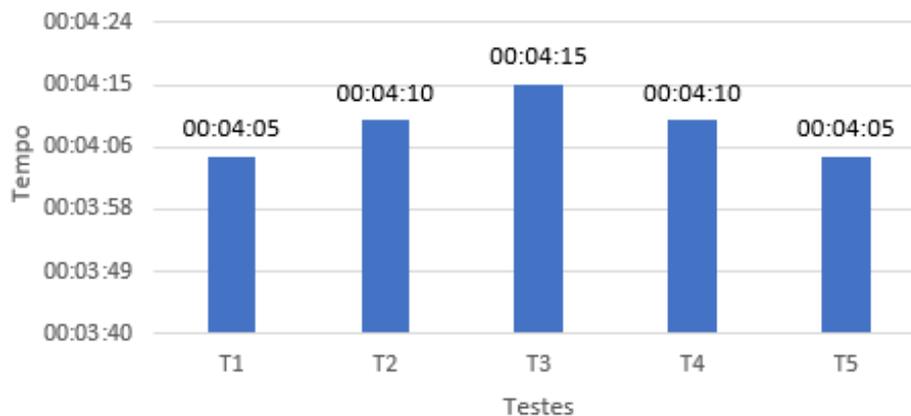
Figura 12 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 4mm com 7 repetições.



Fonte: Autoria própria (2022)

Retirando o maior e o menor tempo 4 min 20 s e 3 min 55 s, apresentado na Figura 13, continuamos com o mesmo resultado de média aritmética de 4 min 09 s. A retirada de dois valores de réplica sem a alteração no valor da média nos mostra um comportamento mais contínuo entre as extrações, sem muita variação.

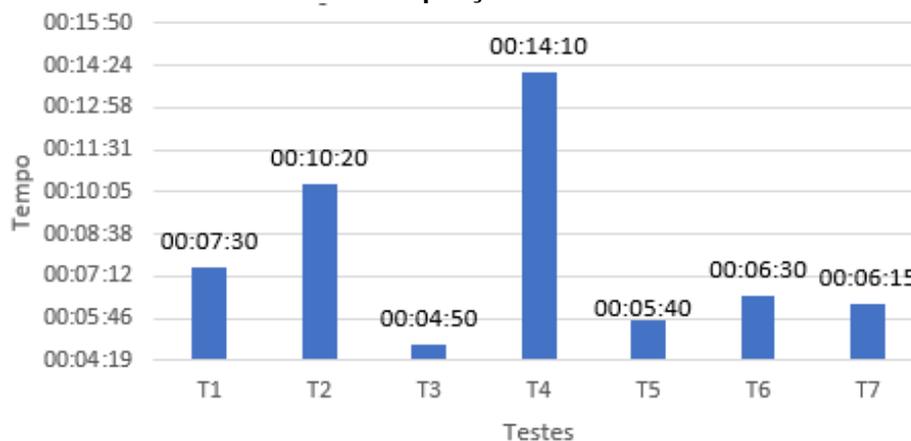
Figura 13 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 4mm com 5 repetições.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para retirada de 1 L de água pelo tubo com 8 mm de diâmetro tivemos os tempos demonstrados na Figura 14, o valor médio obtido nos 7 experimentos foi de 7 min 21 s.

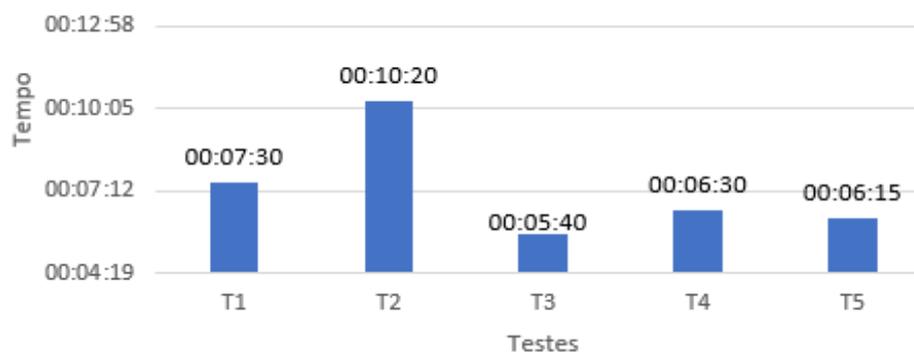
Figura 14 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 8mm com 7 repetições.



Fonte: Autoria própria (2022)

Eliminando o maior tempo encontrado, que foi de 14 min 20 s e o menor de 4 min 50 s, conforme a Figura 15, a média resultou em um tempo de 7 min 15 s. Observamos que a diferença retirando os experimentos de maior e menor respostas apresentaram diferença de apenas 6 s. Podemos visualizar nas Figuras 13 e Figura 14, que mesmo retirando dois valores ainda temos grandes diferenças entre o menor tempo e o maior tempo, mantendo a média de tempo para extração praticamente a mesma.

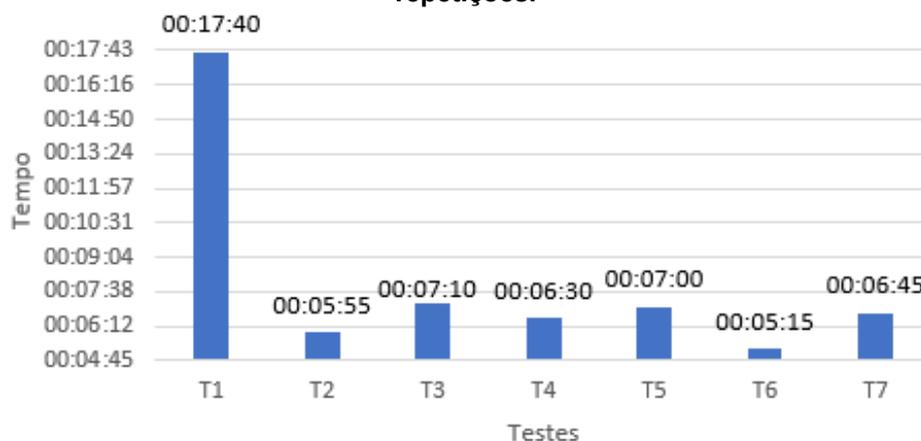
Figura 15 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 8mm com 5 repetições.



Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme os dados apresentados na Figura 16, para extrair 1 L de água utilizando uma tubulação com 12 mm de diâmetro o tempo médio é de 8 min 02 s.

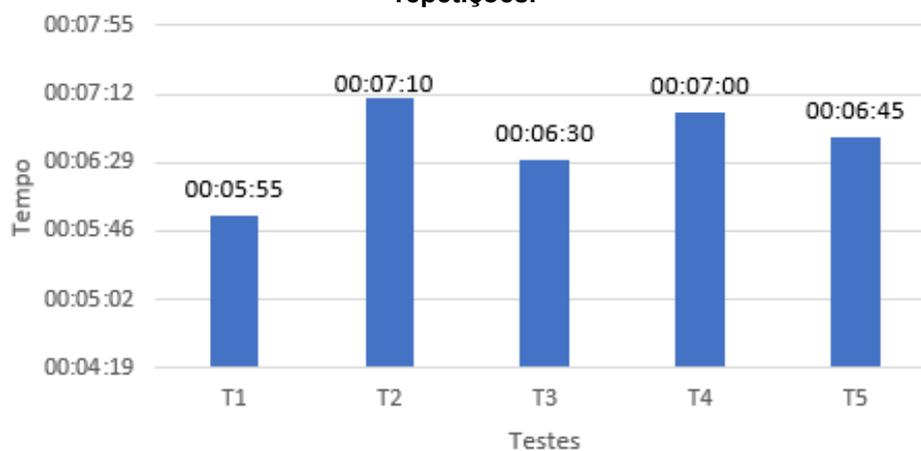
Figura 16 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 12mm com 7 repetições.



Fonte: Aatoria própria (2022)

Para o cálculo da média do mesmo experimento, mas com descarte do maior e do menor tempo, que foram respectivamente de 17 min 40 s e 5 min 15 s, obtemos o resultado de 6min40s. Nesse caso tem-se a maior variação de média de todas, um dos experimentos resultou em um tempo muito mais alto que os demais e ao retirá-lo, juntamente com o menor tempo obtido, foi verificada uma maior constância entre os resultados, como mostra a Figura 17.

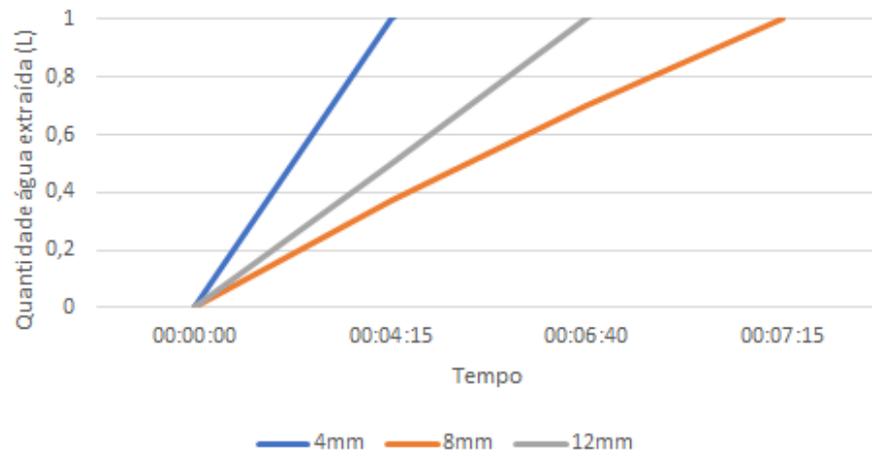
Figura 17 - Tempos de extração de 1L de água com tubo de sucção de diâmetro 12mm com 5 repetições.



Fonte: Aatoria própria (2022)

Conforme a Figura 18, podemos concluir que a tubulação de 4mm de diâmetro foi a que apresentou um melhor comportamento, pois extraiu 1L de água com o menor tempo médio comparado as outras duas tubulações, e que houve uma menor discrepância entre os tempos medidos nas replicatas.

Figura 18 - Tempo médio de sucção de 1L de água para tubo de 4mm, 8mm e 12mm.



Fonte: Autoria própria (2022)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme resultados apresentados, foi possível perceber que nesse experimento foram encontrados vários erros que fizeram com que resultasse em grandes discrepâncias nos valores obtidos ao se repetir várias vezes o mesmo procedimento. Um dos erros foi o erro observacional, que apesar de ser reduzido seguindo corretamente todo procedimento, não podemos desconsiderar que pode ter existido efeito *parallax* na leitura de escalas instrumentais, principalmente por ter sido remarcado as quantidades de água em um kitassato de 2L por meio de uma proveta a fim de fazer uma extração mais exata. Também podemos considerar que pode ter existido atrasos ao disparar e parar o cronômetro ao medir o intervalo de tempo necessário para sucção do líquido.

Os maiores erros ocorridos foram o que chamamos de erro aleatório, pois não foi possível controlar totalmente o fluxo de vazão da bomba a vácuo que extraia o líquido de dentro do aquário para o kitassato, e o erro sistemático ambiental pois teve acomodação da água em meio aos poros da areia, hora puxando líquido, hora puxando ar, até que a força de capilaridade e de molhabilidade fosse rompida, assim arrastando o fluido para a boca de sucção da tubulação utilizada, causando a não proporção contínua de ar e líquido retirado. Por conta desses erros, foi inviável trabalhar outras variáveis no experimento, pois era fundamental para o funcionamento do sistema a obtenção de uma sucção de líquido sem grandes variações de valores ao se repetir o processo várias vezes no mesmo diâmetro de tubo.

Conhecendo os causadores dos erros e os resultados obtidos da média aritmética para cada tubulação, conclui-se que o melhor comportamento foi encontrado na tubulação de 4mm, possivelmente por conta do tubo de sucção ter o menor diâmetro, não houve tanto erro causado pela acomodação da água meio aos poros de areia, já que teoricamente torna-se mais fácil a recuperação de água no poço similar a uma proposta mais laminar de regime de escoamento durante a extração.

Para realização de um novo modelo experimental simulando a extração multifásica em futuras pesquisas acadêmicas, aconselha-se que seja utilizada uma bomba a vácuo com maior controle de fluxo extraído de líquido/vapor e um aquário

com maior dimensionamento, para possuir um maior controle sobre as variáveis que caracterizam um sistema real no solo, com isso, aumentando a eficiência do processo e reduzindo significativamente os possíveis erros experimentais.

REFERÊNCIAS

- ANP, AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Dados Cadastrais dos Revendedores Varejistas de Combustíveis Automotivos, 2022**. Disponível em <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/dados-cadastrais-dos-revendedores-varejistas-de-combustiveis-automotivos>. Acesso em: 11 out. 2022.
- ARAUJO, G. S.; **Tecnologias de remediação em áreas impactadas com hidrocarbonetos de petróleo: estudo de caso em posto de combustível por extração multifásica**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2009.
- BACCAN, N.; ANDRADE, J. C.; GODINHO, O. E. S.; BARONE, J. S. **Química Analítica Quantitativa Elementar**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA - **Resolução nº 273, de 29 de novembro de 2000**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, nº 5, 8 de janeiro de 2001, Seção 1. p.20-23.
- BRASIL, Constituição (1998). **Lei nº 9.605, de 12 de 1998**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm . Acesso em: 3 de nov. 2022.
- BORTONI, S. F.; **Análise de sensibilidade do sistema de extração multifásica utilizando o simulador stomp**. Dissertação de mestrado de pós graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- CANARIO, P. G. G.; BETTINE S. do C.; Gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil: uma análise crítica. **Revista Geociências**. São Paulo, v. 39, n. 3, p.751 – 764, 2020.
- CARVALHO, J. A. M. da; LUZ, S. C. de; Modelamento matemático de peneiramento vibratório (Parte 1): dimensionamento clássico. **Escola Minas**, v.58, n.1, jan./mar., 2005.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 2ed. São Paulo, CETESB, 2001.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relação das áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo**. São Paulo, CETESB, 2017.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**. Disponível em <https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=28e7bb2238a443819447a8ec3ae4abe5>. Acesso em: 23 nov. 2022.

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

FATORELI, L.; **Proposta de avaliação de risco ecológico para contaminações de petróleo e derivados: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FINOTTI, A. R.; ROGRIGUEZ, M. T. R.; CAICEDO, N. O. L.; Contaminações subterrâneas com combustíveis derivados de petróleo. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n.2, p. 29-46, abr./jun., 2001.

GEGORCZYK, G.; PICCIONI, W. J.; **Análise de eficiência da remediação por sistema extração multifásica em postos de combustíveis**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Tecnologia em Processos Ambientais). Curitiba, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2011.

MATTOS, A. S. JR.; MAIA, T. Q.; **Solo contaminado por combustíveis**. Trabalho de perícia ambiental. COBREAP XIX, 2017. Disponível em: <https://ibape-nacional.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2017/08/038.pdf>. Acesso em: 9 out. 2018.

NETO, J. C. da S.; Estudo do erro sistemático ou tendência e repetitividade de um instrumento de medição. **8º Congresso Brasileiro de Metrologia**. Bento Gonçalves/RS, 2015.

SILVA, T. T. da.; **Técnicas de remediação utilizadas no tratamento da contaminação de solo e água subterrânea por vazamentos em postos de combustíveis**. Monografia de especialização. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020.

SOUZA, R. B. G. de; LODI, P. C.; KAISER, I. M. Estudo da contaminação e remediação da água subterrânea por BTEX e HPA'S na região de Avaré. São Paulo. **SemEAR**, v.3, n.1, p. 106-117, Set./ 2015.

TEIXEIRA, C. E.; MOTTA, F. G.; MORAES, S. L. de.; **Panorama do setor de gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil, 2016**. Disponível em: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTGeo/livros/60-panorama_do_setor_de_gerenciamento_de_areas_contaminadas_no_brasil.htm. Acesso em: 1 out. 2022.

VASCONCELOS, B. S. et. al.; Áreas contaminadas por postos de combustível e medidas de remediação no município de São Bernardo do Campo. **Interdisciplinar – Saúde e meio ambiente**, v. 3, n. 1, p. 73-83, jan./jun., 2014.

VUOLO, J. H.; **Fundamentos da Teoria de Erros**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1996.