

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

LAIS CASTILHO PENTEADO

**ESTUDO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTOS DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA E VAPORES PROVENIENTES DA REMEDIAÇÃO DE
ÁREAS CONTAMINADAS – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

São Paulo

2022

LAIS CASTILHO PENTEADO

**ESTUDO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTOS DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA E VAPORES PROVENIENTES DA REMEDIAÇÃO DE
ÁREAS CONTAMINADAS – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Especialista em Gestão de Áreas
Contaminadas, Desenvolvimento Urbano
Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador(a): MSc. Lélia Cristina da Rocha
Soares

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Penteado, Lais Castilho

Estudo de tecnologias de tratamentos de água subterrânea e vapores provenientes da remediação de áreas contaminadas - Revisão Bibliográfica / L. C. Penteado – São Paulo, 2022.
54 p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Air stripping 2.Carvão ativado 3.Oxidação térmica 4.Remediação 5.Efluentes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, sabedoria e conhecimento.

Aos meus pais Luis Antônio Penteado e Elisabete Castilho Penteado por aceitarem as minhas escolhas e pelo apoio e compreensão nos momentos decisivos de minha vida.

Ao meu esposo Diogo Vinícius Tonussi por estar sempre comigo me auxiliando e apoiando em minhas decisões.

A minha tia Eliane Castilho que sempre me incentivou em muitas escolhas da minha vida.

Aos meus avós por todo carinho, dedicação, ensinamentos e pelo amor incondicional.

A minha orientadora Professora Lélia Cristina da Rocha Soares pela orientação, atenção, paciência e confiança para a realização deste trabalho. Você foi essencial para que tudo ficasse da melhor forma possível.

A professora Marilda, que sempre foi muito solícita e atenciosa no decorrer deste curso.

A Merieux Nutriscience Company por todos esses anos de aprendizado e confiança no meu trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

PENTEADO, Lais Castilho. Estudo de tecnologias de tratamentos de água subterrânea e vapores provenientes da remediação de áreas contaminadas – Revisão bibliográfica. 2022. 54 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Áreas contaminadas são um problema enfrentado por muitos países, sendo necessário que diversas técnicas de remediação sejam estudadas e implantadas nestas áreas, com o objetivo de conter e eliminar esta contaminação. Para se remediar uma área contaminada é necessário conhecer informações do meio físico e das características dos contaminantes, para assim, projetar uma técnica legalmente cabível e viável economicamente. A depender do tipo de fonte de contaminação, estas técnicas acabam gerando efluentes líquidos e/ou gasosos, que contêm vários poluentes perigosos, tais como hidrocarbonetos do petróleo, metais, solventes clorados, sendo todos de grave preocupação ambiental, necessitando, assim, de tratamento adequado para que o meio ambiente não seja novamente contaminado. Tendo em vista a problemática acima exposta, este trabalho teve como objetivo apresentar as tecnologias de tratamentos de efluentes provenientes de sistemas de remediação mais utilizadas como *air stripping*, adsorção por carvão ativado e oxidação térmica, discutindo as suas características e vantagens e desvantagens. Assim, mostrou-se que o sistema de tratamento por carvão ativado é o mais utilizado, conforme entrevistas com profissionais da área e buscas bibliográficas, devido a sua praticidade e menor custo, mesmo que se tenha a geração de resíduos.

Palavras-chave: Air stripping, Carvão ativado, Oxidação térmica, Remediação, Efluentes.

ABSTRACT

PENTEADO, Lais Castilho. Study of underground water and vapor treatment technologies from the remediation of contaminated areas – Bibliographic review. 2022. 54 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Contaminated areas are a problem faced by many countries, and it is necessary that several remeasurement techniques are studied and implemented in these areas, in order to contain and eliminate this contamination. To remediate a contaminated area, it is necessary to know information about the physical environment and the characteristics of the contaminants, in order to design a legally applicable and economically viable technique. Depending on the type of contamination source, these techniques end up generating liquid and/or gaseous effluents, which contain several dangerous pollutants, such as petroleum hydrocarbons, metals, chlorinated solvents, all of which are of serious environmental concern, thus requiring treatment. adequate so that the environment is not contaminated again. In view of the above problems, this work aimed to present the technologies for treating effluents from the most used remediation systems such as air stripping, activated carbon adsorption and thermal oxidation, discussing their characteristics and advantages and disadvantages. Thus, it was shown that the activated carbon treatment system is the most used, according to interviews with professionals in the area and bibliographic searches, due to its practicality and lower cost, even if there is the generation of waste.

Keywords: Air stripping. Activated carbon. Thermal oxidation. Remediation. Effluents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do Gerenciamento de águas Contaminadas	18
Figura 2: Técnicas de Remediação implantadas em 2020 no Estado de São Paulo.....	22
Figura 3: Sistema de Bombeamento e Tratamento.....	23
Figura 4: Esquema de poço MPE de bomba única.....	26
Figura 5: Esquema de poço MPE de duas bombas.....	27
Figura 6: Sistema de extração de Vapores.....	29
Figura 7: Seção Esquemática de um Sistema DPE.....	30
Figura 8: Representação de um sistema de remediação por barreira hidráulica.....	31
Figura 9: Coluna embalada de <i>air stripping</i>	38
Figura 10: Desenho Esquemático – Coluna de Carvão Ativado	40
Figura 11: Fotos de sistemas de tratamento de águas subterrâneas utilizando tanques de carvão ativo granulado.....	41
Figura 12: Desenho Esquemático – Contaminantes e vapores adsorvidos ao CAG	42
Figura 13: Foto de um sistema de tratamento por oxidação térmica.....	45
Figura 14: Sistema de funcionamento de um oxidador térmico.....	45
Figura 15: Gráfico: tempo de experiência de profissionais com atividades em áreas contaminadas.	46

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Vantagem, desvantagem e contaminante tratado vistos nos diversos tratamentos de efluentes estudados neste trabalho.....	49
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO	12
3. JUSTIFICATIVA	13
4. MÉTODOS.....	14
5. CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE CONTAMINAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS.....	16
5.1 Contaminantes em subsuperfície.....	16
5.2 Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC)	17
5.2.1 Critérios para Seleção de Técnicas de Remediação	19
6. TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO.....	21
6.1. Bombeamento e Tratamento (<i>P&T</i>)	22
6.2. Extração Multifásica (MPE)	25
6.3. Extração de Vapores (SVE)	28
6.4. Extração em Duas Fases (DPE)	30
6.5. Barreira Hidráulica.....	31
7. LEGISLAÇÕES PERTINENTES AO LANÇAMENTO DE EFLUENTES ADVINDOS DE PROCESSOS DE REMEDIAÇÃO	33
8. TRATAMENTO DE EFLUENTES PROVENIENTES DE SISTEMAS DE REMEDIAÇÃO	37
8.1 <i>Air Stripping</i>	37
8.2 Adsorção por Carvão Ativado.....	39
8.3 Oxidação Térmica	44

9.	DISCUSSÕES	46
10.	CONCLUSÃO.....	50
11.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

A contaminação das águas subterrâneas advindas de produtos químicos está gerando muita preocupação no que diz respeito à saúde humana e ambiental. A qualidade das águas vem sendo muito afetada, mostrando ser um agente de preocupação, principalmente em regiões industriais, devido ao estímulo constante ao consumo, base do sistema capitalista.

A conscientização do grande impacto que esta contaminação estava provocando, se deu início por volta da década de 1970, quando foram observados vários efeitos adversos à saúde em diversos locais do mundo, principalmente nos Estados Unidos. Um local importante a ser citado é o *Love Canal*, um bairro localizado no estado de Nova Iorque, o qual foi utilizado para enterrar 21 mil tonéis de barris com lixo tóxico, pela Hooker Chemical Company, subsidiária da Occidental Petroleum Corporation (SIEGRIST; CRIMI; SIMPKIN, 2011; GIBBS, 1999; NYSDOH, 1981).

Nas últimas três décadas, medidas estão sendo tomadas para identificar, investigar e remediar estas áreas contaminadas. Existem vários níveis de contaminação, nos quais várias áreas já são conhecidas, outras foram recentemente descobertas e muitas ainda surgirão no futuro. Assim, este trabalho torna-se um desafio contínuo, no qual, ao longo dos anos, haverá muitos esforços e gastos para a eliminação destes contaminantes ou descontaminação dessas áreas, já que o grande objetivo é proteger a saúde pública e preservar a qualidade ambiental (SIEGRIST; CRIMI; SIMPKIN, 2011).

Com o rápido crescimento econômico induzindo os homens a provocar distúrbios, intencional ou não intencionalmente, no meio ambiente, os solos estão sujeitos a graus variados de contaminação por diferentes tipos de poluentes. Atualmente, os poluentes mais frequentes em contaminações são provenientes de resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, acidentes ou vazamentos de óleo, agrotóxicos, fármacos e metais potencialmente tóxicos, podendo atingir níveis altos de concentrações, suficientes para provocar efeitos tóxicos, causando danos aos seres vivos (VODYANITSKII; KIRILOVA, 2015).

Com o aumento da demanda por recursos hídricos, a água subterrânea é utilizada, tanto para o abastecimento público como para o desenvolvimento econômico da sociedade, em virtude da sua abundância, qualidade e baixo custo de captação,

principalmente se for considerado a condição inadequada referente a qualidade das águas superficiais, associando-a ao elevado custo do tratamento destas para os diversos usos e a escassez verificada em algumas regiões (CETESB, 2021a).

Hoje, nos Estados Unidos, os aquíferos são responsáveis por cerca de 45 % do abastecimento do país. Já no estado de São Paulo, este consumo é ainda maior, cerca de 75%, atendendo a 5,5 milhões de habitantes. Além disso, englobando os municípios paulistas, aproximadamente 50% deles são abastecidos somente por água subterrânea (ANA, 2019). Esse é um dos motivos que fazem com que a remediação de áreas contaminadas seja um assunto extensivamente abordado no Brasil, por meio de instrumentos legais ou normativos, os quais definem os procedimentos adequados para a investigação e remediação (ALBERTO; CHANG, 2011).

Para a remediação de uma área contaminada, é necessário conhecer previamente todas as informações do local: características geológicas e hidrogeológicas, geoquímicas e hidroquímicas, características dos poluentes presentes e como se dá o seu transporte e destino (CETESB, 2017). Assim, realiza-se um estudo para propor uma técnica de remediação legalmente mais eficaz na remoção dos contaminantes, de modo, também, que seja viável economicamente. A remediação deve sempre visar minimização ou eliminação de qualquer tipo de dano ao meio ambiente, à saúde humana e à segurança pública (CETESB, 2017).

Existem várias alternativas de técnicas de remediação e o sucesso de cada uma delas depende de fatores diversos como: qualidade da investigação ambiental, avaliação de risco e estudos pilotos realizados em laboratório e no campo (MORAES; TEIXEIRA; MAXIMIANO, 2014). No Brasil, algumas técnicas utilizadas são: bombeamento e tratamento, barreira hidráulica, extração multifásica (MPE), extração em duas fases (DPE), extração de vapores, entre outras. A depender do tipo de fonte de contaminação, estas técnicas acabam gerando efluentes líquidos e/ou gasoso, que contêm vários poluentes perigosos, tais como hidrocarbonetos do petróleo, metais, solventes clorados, sendo todos de grave preocupação ambiental (GANIYU et al., 2022).

Tendo em vista a problemática acima exposta, propõe-se neste trabalho apresentar as tecnologias de tratamentos de efluentes de sistemas de remediação mais utilizadas como *air stripping*, adsorção por carvão ativado e oxidação térmica.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é apresentar e discutir as principais tecnologias de tratamentos de efluentes gerados a partir de sistemas de remediação de áreas contaminadas. Delineia-se, a partir de uma revisão bibliográfica, as aplicações por *air stripping*, adsorção por carvão ativado e oxidação térmica.

Tem-se como objetivo específico avaliar as aplicações citadas acima, a partir de uma pesquisa realizada com profissionais do mercado e verificar qual das tecnologias é a mais aplicada e utilizada no Brasil.

3. JUSTIFICATIVA

Para se remediar uma área contaminada é necessário conhecer informações do meio físico e das características dos contaminantes, para assim, projetar uma técnica legalmente cabível e viável economicamente, sempre visando prevenir qualquer tipo de dano ao meio ambiente, à saúde humana e à segurança pública.

As áreas contaminadas possuem diferentes tamanhos, onde algumas podem chegar a possuir milhares de metros quadrados, como é o caso de indústrias. Dependendo do nível de contaminação, a operação de uma remediação pode-se estender por anos, implicando-se, assim, em custos muito elevados.

Países de todos os continentes possuem algum tipo de contaminação de solo e água subterrânea. A exemplo do quantitativo de áreas contaminadas cadastradas no estado de São Paulo, igual a 6454 (CETESB, 2021c), verifica-se que o número é elevado, tendendo a um crescimento anual, já que novos registros sempre são efetuados. Estas contaminações são referentes às práticas inadequadas e eventuais vazamentos ocorridos no passado, no entanto, que podem vir a acontecer atualmente e futuramente por falta de gerenciamento das fontes passíveis de contaminação e ainda da má prática dos trabalhos.

Tendo-se em vista que técnicas de remediação também produzem efluentes, é importante que estes tenham um tratamento adequado para que o meio ambiente não seja novamente contaminado. Por isso, da importância de se trazer mais estudos que mostrem quais são as tecnologias de tratamento destes efluentes e as suas vantagens e desvantagens.

4. MÉTODOS

O método aplicado nesse trabalho abrangeu o seguinte:

- Pesquisa bibliográfica na literatura nacional e internacional, para fundamentação teórica de tratamentos de efluentes gerados pelas técnicas de remediação.
- Análise de publicações gerais como relatórios, artigos técnicos, trabalhos de congressos, dissertações e teses, que estejam relacionadas às técnicas de remediação e aos tratamentos de efluentes gerados por tais técnicas.

A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir de buscas em bases de dados científicas, com o objetivo de mapear a aplicação das tecnologias de tratamentos de efluentes de sistemas de remediação. Como base de dados científicos utilizou-se Google Acadêmico, Periódico Capes e Scopus.

Foram escolhidas apenas estas três tecnologias devido ao acesso restrito às informações. As palavras-chave utilizadas para as buscas foram assim:

- Remediação de áreas contaminadas.
- Sistemas de remediação.
- Tratamento de água subterrânea.
- Para a tecnologia adsorção por carvão ativado foram: ((activated charcoal) OR (activated carbon) OR (carvão ativado) OR (carbon activado) AND (effluent* OR efluente* OR wastewater) AND (remediation OR remediação OR rehabilitación OR treatment OR tratamiento) AND (adsorption OR adsorção OR adsorción)).
- Para a tecnologia *air stripping* foram: ((air stream) OR (arraste) OR (desmontaje de aire) AND (effluent* OR efluente* OR wastewater) AND (remediation OR remediação OR rehabilitación OR treatment OR tratamiento)).
- Para a tecnologia oxidação térmica foram: ((termal oxidation) OR (oxidação térmica) OR (oxidación térmica) AND (effluent* OR efluente* OR wastewater) AND (remediation OR remediação OR rehabilitación OR treatment OR tratamiento)).

Os operadores booleanos “AND” e “OR” foram necessários para direcionar a busca de acordo com o cruzamento das palavras/expressões pesquisadas. Em todas as bases de dados consultadas as buscas ocorreram nos idiomas português, inglês e espanhol.

Também foi realizada uma pesquisa, na qual foi elaborado um formulário e distribuído via mídias sociais aos profissionais que trabalham com áreas contaminadas, possibilitando, assim, ter condições de compreender quais são as técnicas mais aplicadas no mercado brasileiro.

5. CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE CONTAMINAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

5.1 Contaminantes em subsuperfície

Quando ocorre o derramamento de um contaminante no solo, cuja solubilidade em água é baixa, este produto forma uma fase líquida não aquosa (NAPL, do inglês *Non-Aqueous Phase Liquid*). Para um maior entendimento, Schmidt (2010) explica que os NAPLs são divididos em 2 grupos, levando em consideração as características de acordo com sua densidade relativa da água: compostos orgânicos que apresentam Fase Líquida Não Aquosa Leve (LNAPLs, do inglês *Light Non-Aqueous Phase Liquids*), de densidade menor que a da água, e compostos orgânicos que apresentam Fase Líquida Não Aquosa Densa (DNAPLs, do inglês *Dense Non-Aqueous Phase Liquids*), de densidade superior da água.

Os NAPLs, em subsuperfície, podem atingir a zona saturada, a depender da sua mobilidade que é restringida por forças capilares. Assim, os contaminantes podem estar presentes em: fases separadas (livre ou residual), dissolvida, vapor e sorvida, tornando necessárias ações corretivas (DE PAULA e SILVA et al., 2005).

A fase separada, que é imiscível, pode ser encontrada como livre ou residual. A fase livre é quando o óleo migra no meio poroso, enquanto a fase residual fica aprisionada nos poros. Os NAPLs, quando em fase livre, tendem a ficar na região do nível d'água, quando LNAPL. No caso de DNAPL, podem migrar abaixo do nível d'água e atingir grandes profundidades a depender das características físico-químicas do contaminante, volume do vazamento e condições geológicas (PEREIRA, 2005).

A fase dissolvida refere-se ao particionamento dos compostos NAPLs para água subterrânea, formando plumas de contaminantes que podem ocorrer em grandes distâncias. Já a fase vapor se origina a partir da volatilização dos NAPLs e dos compostos dissolvidos na água subterrânea. E a fase sorvida é aquela onde uma massa de contaminante fica adsorvido ou absorvido na parte sólida do meio poroso (KUEPER et al., 2003).

Deste modo, a remediação para os NAPLs tem sido um dos maiores desafios devido à complexidade deste tipo de contaminante, marcado por vezes por serem uma mistura, de difícil modelagem, pois tem-se peculiaridades em seu transporte, e podem ficar

aprisionados nos poros por forças capilares, o que contribui para a permanência de concentrações de contaminantes na fase dissolvida (SCHMIDT, 2010).

Os hidrocarbonetos monoaromáticos de petróleo, conhecidos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, são exemplos de LNAPLs que podem ser facilmente encontrados em áreas contaminadas. Estes compostos são constituintes da gasolina e estão presentes na fração mais leve da destilação do petróleo. Também, dentre os LNAPLs, eles são os mais solúveis quando em contato com a água, podendo contaminar grandes extensões de área. Outra característica de compostos como estes, é que são comprovadamente carcinogênicos. Assim, por todas essas razões, eles são de grande importância ambiental (SCHMIDT, 2010).

Os DNAPLs, como os solventes clorados, quando derramados em grandes quantidades, tendem a migrar abaixo do lençol freático e parar somente quando atingem uma unidade geológica impermeável, por isso que quando contaminam um aquífero, torna-se mais difícil de delimitá-los e remediar, e ainda, podem contribuir para a formação de plumas por um longo prazo (KUEPER et al., 2003).

5.2 Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC)

Para gerenciar áreas contaminadas é necessário um conjunto de medidas as quais garantem a compreensão das características das áreas poluídas e define a adequação das medidas de intervenção a serem exigidas, buscando a eliminação ou minimização dos danos e/ou dos riscos causados aos bens a proteger e em todo o meio ambiente (CETESB, 2021b).

Um processo de gerenciamento de área contaminada tem duas grandes fases para o entendimento do problema: i) a primeira, composta pelo processo de identificação de áreas contaminadas, que engloba a identificação de áreas com possibilidade de contaminação, avaliação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e avaliação de risco; ii) a segunda, que é composta pelo processo de reabilitação de áreas contaminadas, que engloba a elaboração e execução do plano de intervenção, monitoramento para encerramento, emissão do termo de reabilitação e acompanhamento das medidas de controle institucional e de controle da engenharia (CETESB, 2021b).

A finalização do processo de GAC ocorre quando a área para o uso pretendido é declarada pelo órgão ambiental como reabilitada. A Figura 1 apresenta um fluxograma de todo o processo de gerenciamento de áreas contaminadas, conforme CETESB (2021b).

Figura 1: Fluxograma do Gerenciamento de águas Contaminadas



Fonte: CETESB, 2021.

Segundo CETESB (2021b), durante a realização do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), em razão do nível das informações obtidas, dos riscos existentes ou das medidas de intervenção adotadas, as áreas podem ser classificadas como:

- Área com Potencial de Contaminação (AP);
- Área Suspeita de Contaminação (AS);
- Área Contaminada sob Investigação (ACI);
- Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRI);
- Área Contaminada em Processo de Reutilização (ACRu);
- Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRé);
- Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME);
- Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR);

Se forem constatadas situações de perigo ou risco iminente durante o desenvolvimento de qualquer etapa do Gerenciamento de Áreas Contaminadas, deverão ser executadas medidas emergenciais pelo Responsável Legal independentemente de manifestação prévia da CETESB, conforme artigo 19º do Decreto nº 59.263/2013.

5.2.1 Critérios para Seleção de Técnicas de Remediação

Conforme CETESB (2017), após serem definidas as medidas de intervenção a que serão adotadas, o responsável técnico deve selecionar a técnica ou o conjunto de delas que irão compor cada uma dessas medidas. Para tanto, devem ser estabelecido critérios de seleção que deverão considerar:

- disponibilidade da técnica;
- aplicabilidade considerando as substâncias químicas de interesse e o meio contaminado;
- consequências de sua aplicação;
- custo;
- histórico de utilização da técnica para casos similares;
- tempo necessário para atingimento das metas de remediação.

Para caracterizar a relação do contaminante com meio físico são incluídos ensaios e verificações, os quais envolvem: ensaio de granulometria; ensaios de permeabilidade e condutividade hidráulica (necessários para acompanhamento e prevenção da poluição de uma área contaminada); ensaio de compactação do solo (para estimativa de parâmetros de transporte de poluentes); ensaios hidráulicos e geotécnicos; determinação das características químicas e físicas dos contaminantes; instalação e monitoramento de poços (CETESB, 2017).

Outro fator determinante é o tipo de contaminante, que conforme Schmidt (2010) pode ser identificado através das seguintes características: composição química e concentração no meio; biodegradabilidade; viscosidade, densidade; condutividade elétrica, pressão de vapor, ponto de ebulição e solubilidade em água.

É importante destacar que o sucesso da remediação depende de fatores diversos como: qualidade das investigações confirmatória e detalhada, avaliação de risco e estudos pilotos realizados em laboratório e no campo (MORAES; TEIXEIRA; MAXIMIANO, 2014).

6. TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO

As técnicas de remediação objetivam realizar a imobilização ou redução da massa de contaminantes existentes em uma área determinada. Estas técnicas podem ser realizadas sozinhas ou em conjunto (FRAUENSTEIN, 2003).

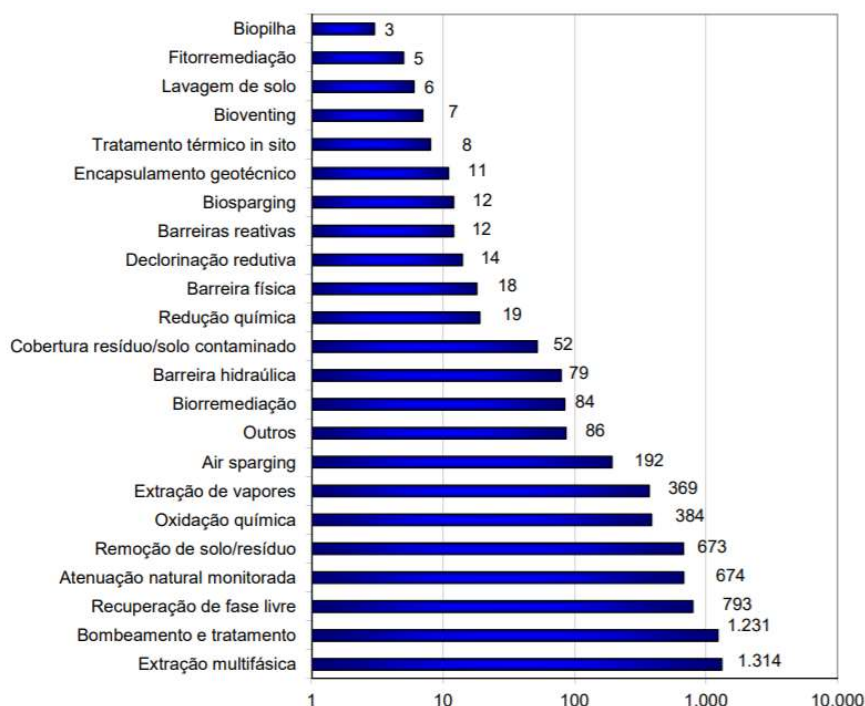
Segundo Furtado (2005), a remediação de uma área pode ocorrer *in situ*, *ex situ* ou *off site*. Os tratamentos *in situ* são realizados diretamente na área contaminada. Quando é necessária a retirada de material líquido, vapor ou sólido contaminados, o tratamento pode ser realizado sobre a área contaminada, sendo assim denominado por *ex situ*, e quando a degradação da massa de contaminantes ocorre em outro lugar, denomina-se de *off site*.

As técnicas de remediação mais usuais que geram efluentes líquidos e/ou gasosos são:

- Bombeamento e tratamento (P&T, do inglês *Pump and Treat*);
- Extração multifásica (MPE, do inglês *Multi-Phase Extraction*);
- Extração de vapores (SVE, do inglês *Soil Vapor Extraction*);
- Extração em Duas Fases (DPE, do inglês *Dual Phase Extraction*);
- Sistemas de barreiras hidráulicas.

Como mostrado na Figura 2, as tecnologias mais empregadas em áreas contaminadas, no ano de 2020, são aquelas que geram efluentes líquidos e gasosos, sendo: extração multifásica (para os dois tipos de efluentes) e bombeamento e tratamento (apenas líquidos). Sendo a primeira tecnologia instalada em 1314 áreas contaminadas e a segunda em 1231 áreas.

Figura 2: Técnicas de Remediação implantadas em 2020 no Estado de São Paulo.



Fonte: CETESB, 2020.

Apesar da existência de outras técnicas de remediação para áreas contaminadas, neste estudo são contempladas apenas aquelas que geram efluentes líquidos e gasosos.

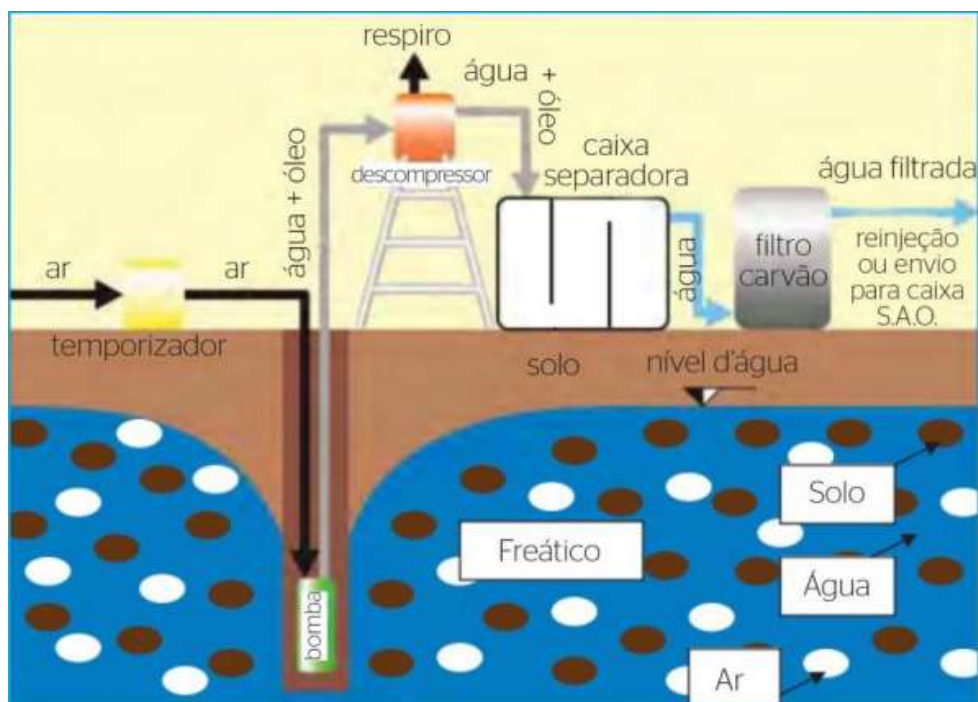
6.1. Bombeamento e Tratamento (*P&T*)

O princípio da tecnologia de remediação bombeamento e tratamento é remover o máximo possível de água subterrânea contaminada por advecção e de produto em fase livre. A água e o óleo são separados em superfície e a água é tratada para posteriormente ser descartada. O lançamento da água tratada poderá ser em corpos hídricos superficiais, reinjeção no aquífero ou no sistema de esgoto, a depender da legislação local (FREIRE et al, 2014; CETESB, 2017). O processo de bombeamento e tratamento é apresentado na Figura 3.

Este tratamento se baseia em instalar poços de bombeamento sequenciais objetivando interceptar a pluma de contaminação, garantindo que não ocorra avanço além do limite da área contaminada e máxima remoção da massa de contaminante em fases

dissolvida e livre. O P&T é, também, considerado uma técnica de contenção de evolução da pluma de fase dissolvida (OLIVEIRA, 2016).

Figura 3: Sistema de Bombeamento e Tratamento.



Fonte: CONSTRUFER, 2011 *apud* FREIRE et al (2014).

P&T é a tecnologia de remediação mais antiga, e continua sendo implantada em diversos países. Porém, com o avanço das pesquisas em novas tecnologias e mais avançadas, vem sendo substituído ou utilizado em combinação com outras técnicas (CETESB, 2017).

De acordo com a CETESB (2017), os poços de bombeamento devem ser perfurados no ponto de maior contaminação da pluma ou a jusante da fonte contaminada, quando o objetivo for eliminar o máximo possível da massa dos contaminantes. Estes também podem ser perfurados na borda da pluma, quando se deseja conter o avanço da mesma para outros locais, evitando assim que receptores sensíveis sejam impactados, que no caso é a Barreira hidráulica, contemplada no item 6.5.

Conforme CETESB (2017), os poços de monitoramento são instalados de maneira conjugada aos de bombeamento com objetivos de: monitorar os cones de depressão dos

poços de bombeamento; verificar as mudanças na profundidade da água subterrânea que está sendo bombeada; garantir a qualidade desta água dentro e fora da pluma, verificando se a mesma está avançando, diminuindo ou se está estabilizada.

Conforme USEPA (2012a), o período de operação da remediação desta técnica, pode ser de alguns anos a várias décadas, onde os poços bombeiam a água subterrânea contaminada constantemente, com pouca ou sem interrupção do processo. O tempo de remediação dependerá de alguns fatores como: se as concentrações são altas; se a fonte da contaminação não foi removida totalmente; o tamanho da pluma do contaminante; se o fluxo da água é lento ou o caminho é complexo.

O longo período do processo acaba elevando os custos da remediação, pois há um grande consumo tanto de materiais para o tratamento das águas como de energia elétrica e também um aumento do número de análises químicas, as quais devem ser feitas periodicamente em vários pontos do sistema (na entrada e saída do tratamento do efluente e da água subterrânea dos poços de monitoramento). Com o avanço tecnológico foi possível a automatização destas técnicas, tendo como pontos positivos a obtenção de dados mais precisos e a redução dos custos, uma vez que se faz necessária apenas a manutenção rotineira (CETESB, 2017).

De acordo com informações da CETESB (2017), estes sistemas de bombeamento e tratamento apresentam muita eficiência no início do tratamento, os quais removem grande parte da contaminação do local impactado, o que é considerado mais uma de suas vantagens. Porém, após um determinado tempo em que já está operando, o nível de concentração dos contaminantes se estabilizam, e isso pode gerar um problema, pois nem sempre atinge os limites estabelecidos pela norma, demandando a utilização de técnicas complementares. Assim, atualmente utiliza-se o bombeamento para diminuir o volume do contaminante a ser tratado por outros processos de remediação que possam atingir o nível exigido de qualidade da água. Nesse caso, esta tecnologia pode ser usada como uma medida imediata em um projeto inicial.

De acordo com Tavares (2013), pode-se citar como vantagens do P&T: flexibilização do projeto, já que os poços podem ser adicionados posteriormente; pode-se usar a água tratada para recarga do aquífero; os custos para sua implantação são menores do que para a implantação de barreiras físicas; os poços de bombeamento podem ser utilizados para monitoramento as tecnologia; a água bombeada pode ser tratada por

métodos já disponíveis para tratamentos de efluentes; evita a migração de plumas de contaminação dissolvidas na água subterrânea para área de abastecimento potável (rios, lagos). Já as desvantagens são: se o aquífero contaminado tiver baixa condutividade hidráulica e/ou a geologia local for complexa e heterogênea, a técnica pode não ser a mais adequada para a descontaminação da área; custos elevados com operação, manutenção e com o sistema de monitoramento; requer uso de sofisticados modelos matemáticos para avaliar a sua eficiência; requer tempos longos para adquirir níveis de contaminações aceitáveis; geralmente a tecnologia atinge maior eficiência quando utilizada em conjunto com outras; geralmente utilizada para aquíferos altamente contaminados, pois a tecnologia possui menor eficiência em concentrações menores.

6.2. Extração Multifásica (MPE)

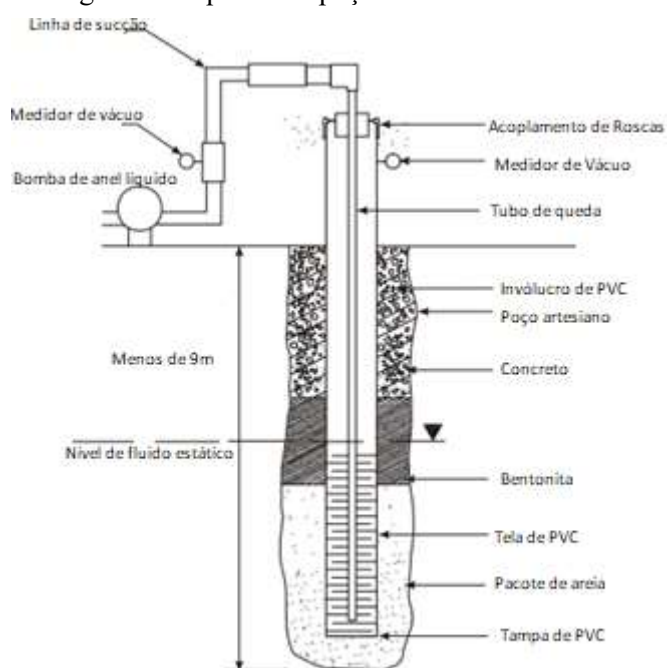
Este processo tem o intuito de promover a ação de retirada de massa de contaminante por meio de aplicação de vácuo, o que possibilita a extração das fases livre, vapor e dissolvida e estimula a biodegradação natural na zona não saturada. Assim, ao sistema MPE é instalando um sistema de ventilação a vácuo em poços de extração espalhados na área de estudo, com o objetivo de criar uma zona de influência em toda a extensão da pluma de contaminação. Os fluídos bombeados (água, NAPL e vapor) são direcionados para uma caixa separadora de água e óleo, sendo o óleo recuperado armazenado para destinação final, e a água contaminada destinada para tratamento para posterior lançamento. O vapor extraído também é direcionado para um sistema de tratamento antes de lançado na atmosfera (BALDWIN et al., 2008).

Os custos da remediação multifásica comparados ao P&T são mais altos, devido aos equipamentos e acessórios complementares que este tipo de tratamento utiliza. Alguns dos instrumentos que podem encarecer o método são a utilização da bomba a vácuo ou ventilação e a válvula que dá suporte ao coletor de vácuo. Algumas bombas de vácuo podem emulsificar o NAPL, onde o produto emulsificado separa-se geralmente da água através da separação gravimétrica (SANTOS et al., 2008).

O MPE pode ser construído e implementado de várias maneiras. As três formas principais de MPE são as configurações de bomba simples, duas bombas e *bioslurping*. Na configuração de bomba única, como mostrado na Figura 4, um tubo de gota única é

utilizado para extrair tanto o líquido como o vapor de um único poço. Esta configuração é limitada a profundidades cerca de 9 m abaixo da superfície do solo (bgs). Em teoria, uma bomba de elevação a vácuo só pode elevar a água a uma altura igual à pressão atmosférica. Como tal, as configurações de bomba única são usadas para remediação do lençol freático raso (menos de 9 m) (SUTHERSAN, 2017; USEPA, 1996).

Figura 4: Esquema de poço MPE de bomba única

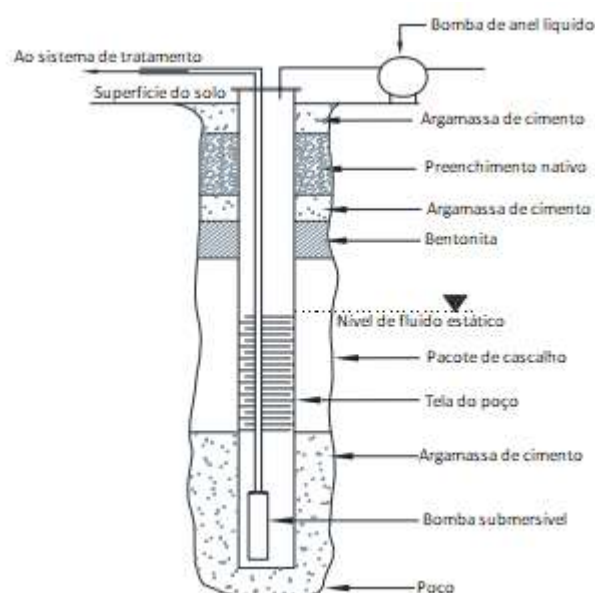


Fonte: adaptada de Suthersan, 1997.

De acordo com Suthersan (2017) e USEPA (1996) e Peargin, as limitações de profundidade podem ser ultrapassadas com a segunda opção de configuração, onde o sistema MPE tem duas bombas, como mostrado na Figura 5. Este sistema utiliza uma bomba submersível para a recuperação das águas subterrâneas em conjunto com um vácuo separado aplicado na cabeça do poço selado. Nesta configuração, os fluxos de líquido e vapor são separados um do outro. Os sensores de nível podem ser utilizados para o controle da bomba. Dependendo da aplicação, os sistemas de duas bombas podem utilizar bombas submersíveis elétricas ou pneumáticas para bombas ou sopradores de recuperação de águas subterrâneas e de anéis líquidos para induzir vácuo. Aplicações para

a recuperação de um LNAPL, emprega tipicamente bombas submersíveis pneumáticas para recuperação de líquidos.

Figura 5: Esquema de poço MPE de duas bombas



Fonte: Modificado de Suthersan, 2017.

A última configuração de MPE é frequentemente referida como *bioslurping* (Kittel et al., 1994). Esta configuração é a mesma que o esquema de MPE de bomba única, no entanto, o tubo de gota numa aplicação de *bioslurping* é fixado na interface líquido-ar. Esta configuração demonstrou ser eficaz na recuperação gratuita do produto (Suthersan, 2017; Kittel et al., 1994) e é utilizada principalmente para esse fim. O sistema de *bioslurping* extrai água, LNAPL, e ar de um único tubo de gota de 1 polegada num poço de 2 polegadas de diâmetro (Kittel et al., 1994).

As vantagens do MPE são: estimula a biodegradação aeróbia de BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) dissolvidos na água subterrânea; eficaz em solos de moderada a baixa permeabilidade; eficaz para remediação simultânea de fase dissolvida, vapor e livre. Quantos às desvantagens, pode-se considerar o seguinte: requer bomba de vácuo; maiores custos se comparado a outras técnicas de bombeamento; em caso de contaminações muito profundas a técnica torna-se muito desagradável (USEPA, 2006).

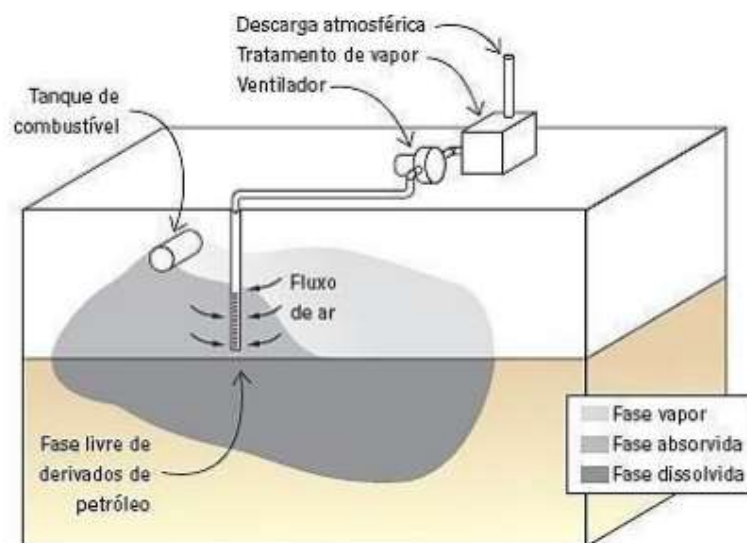
6.3. Extração de Vapores (SVE)

O sistema de remediação SVE consiste em extrair vapores através da aplicação de vácuo, no qual, com a pressão reduzida, induz-se um fluxo de ar na subsuperfície, provocando maior volatilização de compostos orgânicos voláteis. É considerado um método de remediação tanto *in situ* quanto *on site*, já que promove a degradação de compostos em subsuperfície e o tratamento de vapores sobre o site (CETESB, 2017). Os vapores extraídos via poços de extração, são encaminhados para um tanque final contendo ar e água, passando por uma torre de vácuo e por uma estação de tratamento de vapor. Na entrada e saída dos sistemas de tratamentos de vapores são instalados amostradores para análises da eficácia da remoção dos contaminantes e de modo a acompanhar os valores de padrões de qualidade de lançamentos na atmosfera.

No início da operação do sistema de remediação, os contaminantes mais voláteis são removidos a taxas mais altas, sendo que as concentrações vão decrescendo ao longo do tempo, onde a biodegradação passa a ser o processo dominante no final do estágio, quando grande parte dos compostos mais voláteis já foi extraída. As taxas relativas de remoção por extração de vapores e por biorremediação dependem das características geológicas e hidrogeológicas, como permeabilidade e heterogeneidades, além das propriedades dos contaminantes (SCHMIDT, 2010).

Para melhor retirada dos contaminantes, o SVE também é associado à tecnologia de remediação *Air sparging*, que envolve a injeção de um gás (podendo ser este ar ou oxigênio) sob pressão, através de poços localizados na zona saturada do solo, o qual tem a função de remover os compostos voláteis. Contudo, o presente estudo se retratará apenas ao SVE, que gera efluentes gasosos. A Figura 6 mostra um esquema do sistema de remediação SVE.

Figura 6: Sistema de extração de Vapores



Fonte: USACE, 1999.

Conforme Shimidt (2010), as vantagens do sistema de remediação SVE são:

- redução da concentração de contaminantes nas águas subterrâneas;
- simplicidade: construídos a partir de equipamentos padronizados;
- baixo custo operacional;
- pode ser facilmente utilizado em conjunto com outras tecnologias de remediação, para possibilitar a completa remoção ou redução da massa de contaminantes;
- pouca chance de vazamento durante a aplicação, pois os contaminantes estão sob vácuo;
- pode ser utilizado sob edificações e outros locais que não podem ser escavados.

Já as desvantagens são: aplicação restrita às zonas não saturadas; baixa eficácia em solos de permeabilidade reduzida ou estratificados; redução de concentrações para níveis inferiores a 90%, que são dificilmente atingíveis; pouca eficiência na extração de compostos orgânicos semivoláteis; concentrações de matéria orgânica que limitam a volatilização, podendo requerer tratamentos custosos para a liberação dos vapores na atmosfera (PAPADOPOULOS; VATSERIS, 2005).

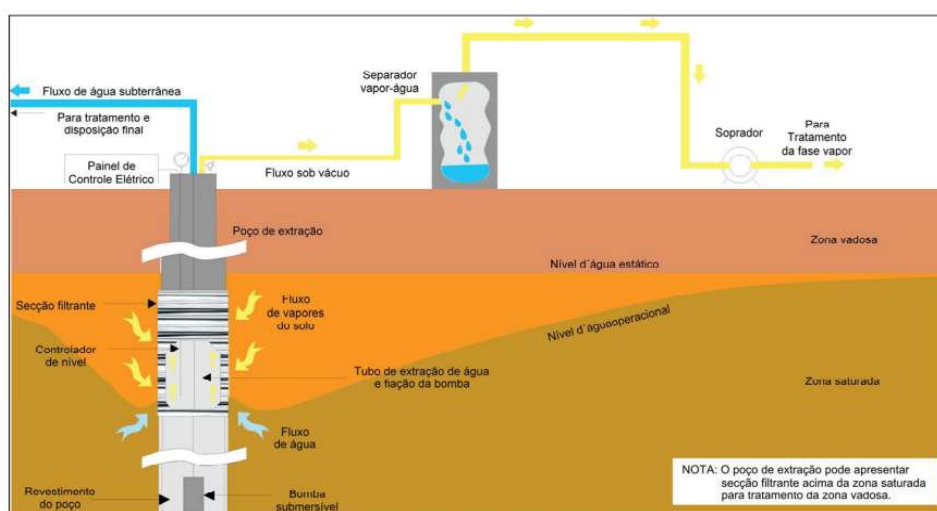
6.4. Extração em Duas Fases (DPE)

Segundo Roche (2006), o sistema DPE é composto de duas fases: bombeamento de água e extração de vapores. É utilizado para remoção de fase livre, dissolvida e de vapores em locais com concentrações de compostos acima dos valores aceitáveis (valores orientadores ou concentrações máximas aceitáveis).

No sistema DPE, os vapores provenientes do solo e os líquidos são extraídos do poço de extração em tubulações distintas e por bombas ou compressores radiais distintos. Nesta técnica, uma bomba submersível é introduzida na tubulação do poço para a extração de água subterrânea e fase livre, enquanto outra tubulação é interligada ao cabeçote do poço para a extração de vapores, utilizando um compressor radial ou uma bomba de vácuo para gerar pressão negativa no interior do poço (USACE, 2002).

O DPE pode ainda ser subdividido em HVDPE (*High Vacuum Dual Phase Extraction*) e LVDPE (*Low Vacuum Dual Phase Extraction*). A diferença entre as duas modalidades é a faixa de vácuo em que operam: o HVDPE opera em uma faixa de vácuo variando de 460 a 660mmHg e o LVDPE opera em uma faixa de vácuo de 76 a 305 mmHg. (USACE, 2002). A Figura 7 mostra uma seção esquemática do sistema DPE.

Figura 7: Seção esquemática de um Sistema DPE



Fonte: adaptado de USEPA, 1996.

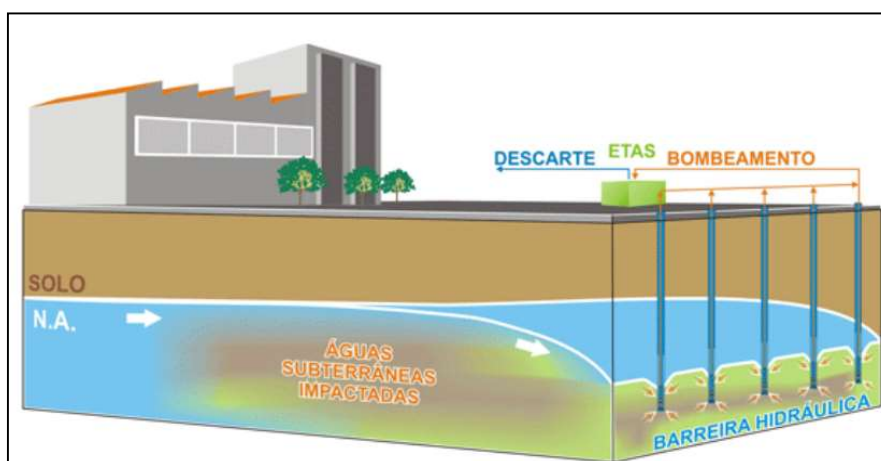
Ackermanm (2004) coloca o seguinte sobre as vantagens da técnica: não é limitada à profundidade da contaminação; possui baixas perdas de vácuo dentro dos poços de

extração; não é limitada à taxa de produção de água subterrânea. Quanto às desvantagens pode-se citar: no sistema DPE são utilizadas bombas submersíveis, havendo a necessidade de uma coluna d'água acima das bombas, de maneira que é necessário instalar novos poços com profundidade adequada; e requer maior controle das bombas.

6.5. Barreira Hidráulica

A barreira hidráulica tem como propósito a contenção das plumas de contaminação, sendo que para isto é instalada uma sequência de poços de extração visando interceptar a área contaminada, assegurando que não haja o avanço dos contaminantes além do limite da barreira (SANTOS et al., 2008). A água capturada/bombeada é tratada em superfície. A Figura 8 apresenta a representação de uma barreira hidráulica.

Figura 8: Representação de um sistema de remediação por barreira hidráulica.



Fonte: VIANNA, 2013.

Segundo Oliveira (2016), os poços de extração são instalados na parte mais a jusante da pluma de contaminação, onde o bombeamento deve promover um cone de rebaixamento do nível freático com o intuito de atingir uma grande extensão da pluma, a fim de evitar que a contaminação continue sendo transportada na direção do fluxo da água subterrânea. Nos poços são aplicados vácuos, os quais criam um gradiente de pressão (diretamente proporcional ao vácuo aplicado) dirigido para os pontos em que a água subterrânea é extraída.

Os procedimentos para transferir a massa do contaminante aprisionado nos poros ou na fase sorvida para água subterrânea são muito lentos. A quantidade de água que deve ser bombeada é muito grande e o tempo de operação pode chegar às dezenas de anos. Isso é muito bom para os consultores, porém péssimo para os responsáveis pelas áreas, já que os custos ficam cada vez mais elevados. A barreira hidráulica é escolhida como técnica de remediação, em muitos casos, com a justificativa de dificuldades de acesso ao contaminante, principalmente devido à profundidade do aquífero. Contudo, também é escolhida como uma técnica acessória, com objetivo de evitar que o contaminante não atinja um bem a proteger (SANTOS et al., 2008).

Para o sucesso da remediação, é essencial que esta técnica seja utilizada de forma adequada, já que a água bombeada deverá ser tratada e ter destinos adequados, o que pode implicar em altos custos (SANTOS et al., 2008). Estes autores também enfatizam outro problema que pode ocorrer se barreira não for bem dimensionada, que é quando o posicionamento ocorre paralelamente a um córrego ou rio, pois pode trazer água desse corpo hídrico. Caso a água destes corpos (água superficial) seja de baixa qualidade, corre-se o risco de ter que se tratar a contaminação em conjunto com a água superficial.

As vantagens da barreira hidráulica são: alternativa tecnicamente simples; há um grande conhecimento técnico e experiência com este tipo de alternativa. Já para as desvantagens, pode-se considerar: o processo de transferência da água para a superfície é muito lento; há um custo adicional do tratamento na superfície; há possibilidade de inversão do fluxo no aquífero e pode ocorrer o efeito “*rebound*” (reincidência da contaminação) (FREIRE; TRANNIN; SIMÕES, 2014).

7. LEGISLAÇÕES PERTINENTES AO LANÇAMENTO DE EFLUENTES ADVINDOS DE PROCESSOS DE REMEDIAÇÃO

Durante um processo de remediação, a depender da técnica de remediação, pode-se gerar efluentes líquidos e gasosos, além de resíduos sólidos (solo contaminado). Neste trabalho é abordado os efluentes líquidos e gasosos gerados a partir de técnicas que envolvem tratamentos *ex-situ*, descritos nos capítulos a seguir.

Nos tratamentos que envolvem a geração de efluentes, é importante conhecer sobre como se deve fazer, quais são os padrões de qualidade e onde estes fluídos, no caso dos líquidos, poderão ser lançados no meio ambiente (TIBURTIUS et. al., 2004).

Para os efluentes líquidos, as opções de lançamentos geralmente são em corpos hídricos superficiais ou na devolução ao subsolo (reinjeção). Conforme USEPA (2006), a água tratada pode retornar ao subsolo através de bacias de infiltração, galerias de infiltração, ou poços de injeção.

Dentre os modos de disposição de efluentes líquidos provenientes da remediação de áreas contaminadas, a reinjeção é o método mais usual, que conforme USACE (2000), tem-se as seguintes vantagens:

- os padrões de descarga são tipicamente semelhantes às normas de água potável;
- ao contrário da descarga para águas superficiais, estes geralmente não são requisitos para remover alguns constituintes naturais das águas subterrâneas anteriores, para devolver a água tratada ao subsolo;
- devolução da água tratada ao subsolo pode ser utilizado para aumentar a contenção hidráulica ou lavar uma fonte contaminante;
- regresso da água tratada ao subsolo ajuda a conservar as águas subterrâneas como um recurso natural, o qual é particularmente benéfico em áreas onde as águas subterrâneas servem como uma única fonte de água potável ou onde a desidratação é uma preocupação.

Contudo, a reinjeção também apresenta algumas desvantagens, conforme USACE (2000), que são:

- a reinjeção na pluma pode comprometer a captura da fase dissolvida, ocasionando o espalhamento da contaminação na água;
- poços de reinjeção e estruturas de infiltração podem necessitar de mais manutenção do que outras opções de descarga, especialmente devido a sólidos ou incrustação biológica;
- há potencial para descarregar contaminantes não tratados que estão presentes no *site*, e são de desconhecimento da equipe, ocasionando também o espalhamento da pluma.

Quanto à legislação referente à reinjeção, tem a Resolução CONAMA 396/2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. O Capítulo 4 desta resolução, dispõe sobre as diretrizes ambientais para prevenção e controle da poluição das águas subterrâneas, considerando o seguinte:

Artigo 24. A injeção em aquíferos, conjunto de aquíferos ou porções desses com o objetivo de remediação deverá ter o controle dos órgãos competentes com o objetivo de alcançar ou manter os padrões de qualidade para os usos preponderantes e prevenir riscos ambientais.

Parágrafo único. A injeção a que se refere o caput deste artigo não deverá promover alteração da condição da qualidade dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, adjacentes, sobrejacentes e subjacentes, exceto para sua melhoria.

Artigo 26. Nos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, em que as águas subterrâneas estão enquadradas em Classe 5, poderá ser admitida a injeção direta, mediante controle dos órgãos competentes, com base em estudos hidrogeológicos apresentados pelo interessado, demonstrando que a injeção não provocará alteração da condição de qualidade em relação ao enquadramento das águas subterrâneas adjacentes, sobrejacentes e subjacentes, por meio de monitoramento.

Artigo 27. A aplicação e disposição de efluentes e de resíduos no solo deverão observar os critérios e exigências definidos pelos órgãos competentes e não poderão conferir às águas subterrâneas características em desacordo com o seu enquadramento.

§ 1º A aplicação e a disposição, referidas no caput, não serão permitidas nos casos em que as águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porções desses estejam enquadrados na Classe Especial.

§ 2º A aplicação e a disposição serão precedidas de plano específico e programa de monitoramento da qualidade da água subterrânea a serem aprovados pelo órgão competente.

Quanto aos lançamentos em rios, deve-se atentar às seguintes legislações:

- Resolução CONAMA 357/2005, a qual dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências;
- Resolução CONAMA 430/2011, a qual dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução 357/2005 do CONAMA.

No Estado de São Paulo, a partir da Portaria DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) nº 1.635, de 30 de maio de 2017, o uso de água proveniente de sistemas de remediação está sujeito a outorga de direito de uso ou o cadastramento, da seguinte forma em seu Artigo 2º:

I - Se a captação superar 15 m³ por dia, o uso da água estará sujeito à outorga, de acordo com a Portaria 1.630/2017 do DAEE, ou a que a suceder;

II - Se a captação for menor ou igual a 15 m³ por dia, o uso da água estará sujeito ao cadastramento e dispensado de outorga, nos termos da Portaria 1.631/2017 do DAEE, ou a que a suceder.

No Estado de São Paulo, para ocorrer o lançamento dos efluentes, gerados nas recuperações das áreas contaminadas, no sistema público de esgoto, deve-se atender os requisitos dispostos no Decreto-lei nº 8.468, Art 19 A de 08 de setembro de 1976 (SÃO PAULO, 1976), que estabelece condições de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora em sistemas de esgotos, provido de tratamento com capacidade e de tipos adequados. Os parâmetros cujos limites são estabelecidos por este artigo são: pH,

temperatura, materiais sedimentáveis, óleos e graxas, DQO, condutividade, compostos organoclorados entre outros.

A Resolução CONAMA 410/2009 e 430/2011, estabeleceu critérios para a classificação dos corpos de água superficiais e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como as condições e padrões de lançamento de efluentes. A classificação abrange várias definições baseando-se na aptidão natural dos cursos d'água, observando a sua qualidade, capacidade, entre outras características específicas.

As águas doces, salobras e salinas do Brasil são classificadas, segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes, em treze classes de qualidade, porém será destacado apenas as classes dos cursos d'água doce, os quais tem impacto direto sob a ação das atividades urbanas e industriais.

Quanto à legislação sobre lançamentos de vapores na atmosfera, tem a Resolução CONAMA 491/2018, a qual dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Nesta resolução são adotadas as seguintes definições:

- poluente atmosférico: qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade;
- padrão de qualidade do ar: um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica;
- padrões de qualidade do ar intermediários – PI: padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas;
- padrão de qualidade do ar final – PF: valores guia definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005.

8. TRATAMENTO DE EFLUENTES PROVENIENTES DE SISTEMAS DE REMEDIAÇÃO

Durante um processo de remediação, efluentes são gerados a partir dos processos de remediação por bombeamento e tratamento, extração multifásica (MPE), extração em duas fases (DPE), extração de vapores (SVE) e barreiras hidráulicas. A maioria dessas técnicas, exceto o SVE, geram efluentes líquidos. Quanto aos efluentes gasosos, apenas P&T e barreiras hidráulicas não extraem vapores do solo.

Para o tratamento destes efluentes antes do seu lançamento no meio, diferentes técnicas podem ser utilizadas, onde a pesquisa realizada com os profissionais da área mostrou que as mais utilizadas em remediação são: *air stripping*, adsorção em carvão ativado e oxidação térmica.

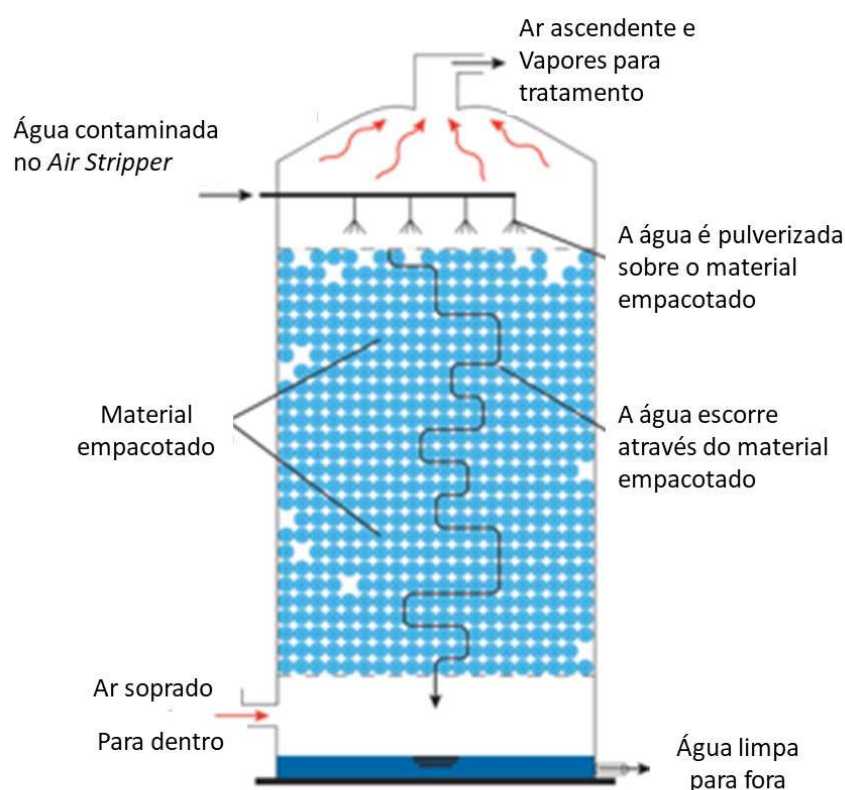
8.1 *Air Stripping*

O *air stripping* consiste em mover ar através de águas subterrâneas ou superficiais contaminadas em um sistema de tratamento acima do solo. Os contaminantes não são destruídos pelo *air stripping* em si, mas são fisicamente separados das soluções aquosas. Os vapores contaminantes são transferidos para a corrente de ar e, se necessário, podem ser tratados por incineração, adsorção ou oxidação. Na maioria das vezes, os contaminantes são coletados em sistemas de adsorção de carbono e depois tratados ou destruídos nesta forma concentrada. Geralmente, a remoção de ar é usada como uma em uma série de operações unitárias e pode reduzir o custo total para o gerenciamento de um determinado local. O *air stripping* é aplicável a compostos orgânicos voláteis (COVs) e semivoláteis (SCOVs). Não é aplicável para o tratamento de metais e compostos inorgânicos (BOULDING, 1996).

Os COVs são produtos químicos que evaporam facilmente, o que significa que podem mudar do estado líquido para vapor, por serem altamente voláteis. O ar que passa pela água contaminada ajuda a evaporar os COVs mais rapidamente. Após tratar a água, o ar e os vapores químicos são coletados, e os vapores são removidos ou ventilados para fora se os níveis de COV forem suficientemente baixos. A remoção de ar é comumente usada para tratar água subterrânea contaminada e bombeada através do sistema de remediação bombeamento e tratamento (USEPA, 2020).

Para o processo do *air stripping* é utilizado um tanque de aeração para forçar a passagem do ar através da água contaminada e evaporar os COVs (USEPA, 2020), onde o tamanho /volume dependerá dos tipos e quantidades de contaminantes, bem como da concentração aceitável que se deseja obter para a água. O tipo de *air stripper* mais comum é o de coluna empacotada (*packed-column*), que é um tanque alto e preenchido /empacotado com pedaços de plástico, aço ou cerâmica, como mostra a Figura 9.

Figura 9: Coluna embalada de *air stripping*.



Fonte: USEPA, 2021.

Após a água contaminada ser bombeada para acima do solo e para a parte superior do tanque, a mesma é pulverizada sobre a parte superior do material empacotado. A água escorre para baixo através dos espaços vazios do material de preenchimento, formando uma fina película de água que aumenta sua exposição ao ar soprado na parte inferior do tanque. Os tanques de aeração são outro tipo de projeto que remove os COVs ao borbulhar ar em um tanque de água contaminada (USEPA, 2012b).

O ar e vapores ascendentes se acumulam no topo do tanque onde são liberados para posterior tratamento. A água tratada flui para o fundo, onde é coletada e realizada análises químicas para certificar-se que as concentrações estão abaixo dos limites estabelecidos. A água pode precisar de tratamento adicional para atingir os níveis requeridos, a depender de onde será descartada (USEPA, 2021a).

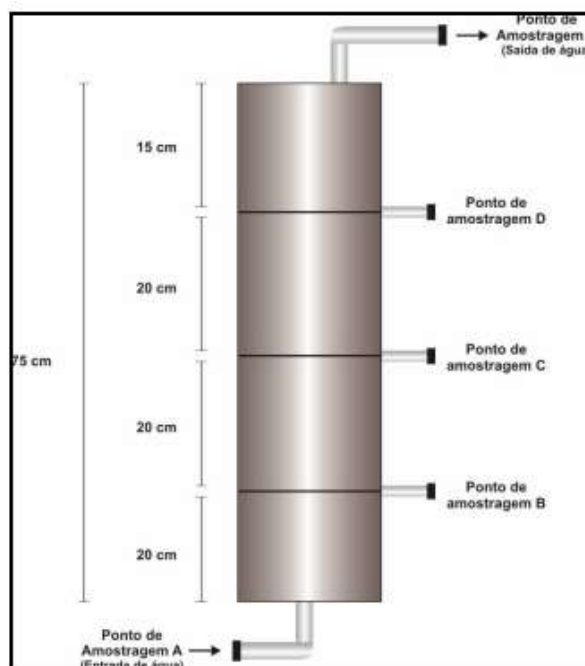
USEPA (2021a) cita que o fluxo de água através de um sistema *air stripping* pode levar apenas alguns minutos, dependendo do tamanho do dispositivo e da taxa de fluxo de água através dele. Entretanto, a limpeza de uma grande pluma de contaminação de águas subterrâneas pode levar de vários meses a anos. O tempo de remoção de contaminantes dependerá de vários fatores que variam de local para local, como por exemplo:

- As concentrações de contaminantes encontram-se muito altas;
- A quantidade de água que requer tratamento é grande;
- As águas subterrâneas não podem ser bombeadas a uma velocidade rápida;
- A formação de precipitação de minerais secundários ou algas em meio ao material empacotado, requer remoção frequente.

8.2 Adsorção por Carvão Ativado

O termo carvão ativado é utilizado na definição de materiais ricos em carbono, os quais possuem uma estrutura de poros internos bem construída. Ele é considerado um ótimo adsorvente, pois apresenta uma boa eficiência para reter uma gama de substâncias tóxicas e não biodegradáveis que estão presentes no solo, ar e águas (ZHANG et al., 2017). Sua alta eficiência está relacionada às suas propriedades físicas, onde a estrutura de poros é bastante desenvolvida e por apresentar alta área superficial. As suas propriedades também são caracterizadas pela baixa reatividade ácido/base e alta estabilidade térmica (ZHAO et al., 2018). A Figura 10 apresenta um desenho esquemático de uma coluna de carvão ativado.

Figura 10: Desenho Esquemático – Coluna de Carvão Ativado



Fonte: ZHAO et al., 2018.

De acordo com Basaleh e Al-Malack (2018) e USEPA (2021b), os carvões ativados são produzidos a partir de materiais como madeira, casca de coco, turfa, lignina, carvão betuminoso, linhita e resíduos de petróleo. O carvão ativado pode ser encontrado em duas formas: carvão em pó e granulado. O carvão granulado (CAG), produzido a partir de carvão betuminoso volátil médio ou linhita, tem sido comumente aplicado na remediação de áreas contaminadas, uma vez que é relativamente barato e prontamente disponível. Pode tratar uma ampla gama de vapores contaminantes e contaminantes dissolvidos nas águas subterrâneas, tais como óleo combustível, solventes, bifenilos policlorados (PCBs), dioxinas, hidrocarbonetos do petróleo e outros produtos químicos industriais, removendo também, baixos níveis de alguns tipos de metais. Já, o carvão em pó, tem as mesmas funções que o granular, porém, exige que se tenha um filtro, seguido por um tanque de decantação (YUNG-TSE, 2006 e USEPA, 2021b).

Os tanques de carvão ativado podem variar em tamanho desde um tambor de 55 galões até um tanque de 6 metros de altura e 3 metros ou mais de diâmetro (USEPA, 2021b), como mostrado na Figura 11.

Figura 11: Fotos de sistemas de tratamento de águas subterrâneas utilizando tanques de carvão ativo granulado



Grande sistema de tratamento de águas subterrâneas com cinco tanques de GAC



Pequeno sistema de tratamento de águas subterrâneas com dois tanques de GAC

Fonte: USEPA, 2021b.

O tratamento com carvão ativado geralmente consiste de uma ou mais colunas ou tanques preenchidos com CAG. Água ou vapores contaminados são normalmente bombeados através de uma coluna de cima para baixo, mas é possível um fluxo ascendente. Como a água ou o ar contaminado flui através do CAG, os contaminantes sorvem para as superfícies externas e internas dos grânulos. A água e o ar que saem do recipiente serão mais limpos. Análises químicas de ar e de água na saída devem ser realizados para verificar se a remoção dos contaminantes está ocorrendo. Caso o tratamento não esteja sendo eficiente, o carvão ativado precisará ser substituído (USEPA, 2012a).

A eficácia do carvão ativado para a remoção de diversos poluentes se dá pela sua área de superfície, que pode variar de 500 a 1400 m²/g. Alguns têm grandes áreas de superfície de até 2.500 m²/g (ZHANG et al., 2017). De acordo com Yung-Tse (2006), o tamanho das partículas de carbono influencia na taxa de adsorção, mas não na capacidade de adsorção, a qual está relacionada com a área total da superfície. A redução do tamanho das partículas não afeta a superfície de um determinado peso. O tamanho das partículas

afeta principalmente a hidráulica do sistema, filtrabilidade e características de manuseio. A Figura 12 mostra os contaminantes sendo adsorvidos pelo CAG (USEPA, 2021b).

Figura 12: Desenho Esquemático – Contaminantes e vapores adsorvidos ao CAG



Fonte: USEPA, 2021b.

Muranaka et al. (2010) ainda destaca que a atração de uma substância em uma solução (adsorbato) para uma partícula de carvão ativado (adsorvente) ocorre em três etapas distintas:

- A molécula adsorvida deve ser transferida da fase de massa da solução para a superfície da partícula adsorvente. Após, deve-se passar por uma película de solvente que envolve a partícula adsorvente. Isso é chamado de difusão de filme;
- A molécula de adsorbato deve ser transferida para um sítio de adsorção no interior do poro. Este processo é conhecido como difusão de poros;
- O adsorbato deve ficar aderido à superfície do adsorvente. Esta é a real etapa de adsorção.

Muranaka (2010), destaca que os materiais adsorvidos e saturados no carvão ativado, muitas vezes são descartados em aterros sanitários sem um tratamento adequado, sendo possível ocorrer infiltração de contaminantes tóxicos no meio ambiente. Assim,

uma outra possibilidade de destinação é a incineração, mas esta possui a desvantagem em ter um alto custo operacional e de emissão de compostos tóxicos. No entanto, também existem métodos que permitem a regeneração do carvão de maneira que esse material possa ser reutilizado em diversos ciclos de adsorção. O processo de regeneração do carvão ativado pode ocorrer de três formas: térmica, biológica e química. Estes buscam devolver a capacidade adsorptiva original do carvão, através da remoção dos contaminantes adsorvidos (ZHANG et al., 2017).

O processo de regeneração térmica é considerado a técnica mais propagada dentre as tecnologias de regeneração. Essa técnica tem como objetivo aquecer o carvão ativado a altas temperaturas, a partir de uma atmosfera inerte, onde os contaminantes sorvidos são decompostos, danificando, assim, o mínimo possível a estrutura do carvão (MURANAKA et al., 2010).

Esse processo apresenta como desvantagem o elevado consumo de energia utilizado para manter as temperaturas elevadas; possível formação de subprodutos perigosos, os quais podem ser expelidos no meio ambiente; baixa taxa de recuperação da capacidade adsorptiva do carvão; estrutura micro porosa do material é alterada, quando são realizadas sobre condições oxidantes (SANTOS, 2021).

O processo de regeneração biológica baseia-se na biodegradação dos contaminantes sorvidos no carvão ativado através da ação de microrganismos, evacuando as áreas ativas do carvão, permitindo que mais poluentes sejam adsorvidos. Apesar de ser viável do ponto de vista econômico, é um processo lento e necessita que as espécies adsorvidas sejam totalmente biodegradáveis, limitando, assim, que esta tecnologia seja utilizada (MURANAKA et al., 2010).

O processo de regeneração química baseia-se em utilizar reagentes químicos para decompor os contaminantes aderidos ao carvão ativado. Estudos demonstraram como desvantagens, que a capacidade de adsorção do carvão ativado quando submetido a esses métodos de regeneração, normalmente, não é totalmente recuperada devido à presença de solvente residual. Além disso, ocorre apenas uma transferência de fase do contaminante, gerando um resíduo secundário o qual necessita de tratamentos posteriores (SANTOS, 2021).

8.3 Oxidação Térmica

A oxidação térmica é aplicada para tratamento de vapores, onde tem a capacidade de remover compostos orgânicos voláteis de correntes gasosas com elevadas concentrações. Neste sistema, quanto maior for a temperatura, mais rápida é a degradação dos contaminantes, com decomposição cerca de 95 % a 99 %. No entanto, como a temperatura de operação está dentro da faixa de valores 300-1100 °C, pode-se ter a formação de NO_x através do N₂ que se encontra presente no ar. Este tipo de oxidação pode ser regenerativa (utilizada para purificação do ar de exaustão contendo solventes e odores incômodos) ou recuperativa (garante diminuição do odor), distinguindo-se pelo tipo de equipamento e pela forma de recuperação de calor do processo (MELO JÚNIOR, 2018).

As vantagens da oxidação térmica recuperativa são: concepção simples e compacta; solução econômica quando associada a um sistema de recuperação de energia térmica; fácil operação e manutenção. Enquanto as desvantagens são: elevado consumo energético e elevada temperatura dos gases na saída do sistema (COELHO, 2021).

As vantagens da oxidação térmica regenerativa são: temperatura de combustão é elevada constantemente; elevada eficiência de degradação de contaminantes independentemente do tipo de compostos; pode funcionar em modo auto térmico; elevada eficiência térmica. Já as desvantagens são: formação de vários produtos secundários tóxicos e grande desperdício de energia, devido às elevadas temperaturas de operação (COELHO, 2021).

A Figura 13, mostra um sistema de remediação em área contaminada com a utilização de oxidação térmica. O funcionamento de um sistema de tratamento com oxidador térmico, como mostrado na Figura 14, pode se dar do seguinte modo:

- 1- O sistema recebe uma massa de ar contendo uma concentração de contaminantes diluídos com ar atmosférico. Esta massa de ar é pré-aquecida em um trocador de calor.
- 2- Os vapores são aquecidos eletricamente até uma temperatura reativa, podendo esta variar de 300°C a 600°C.

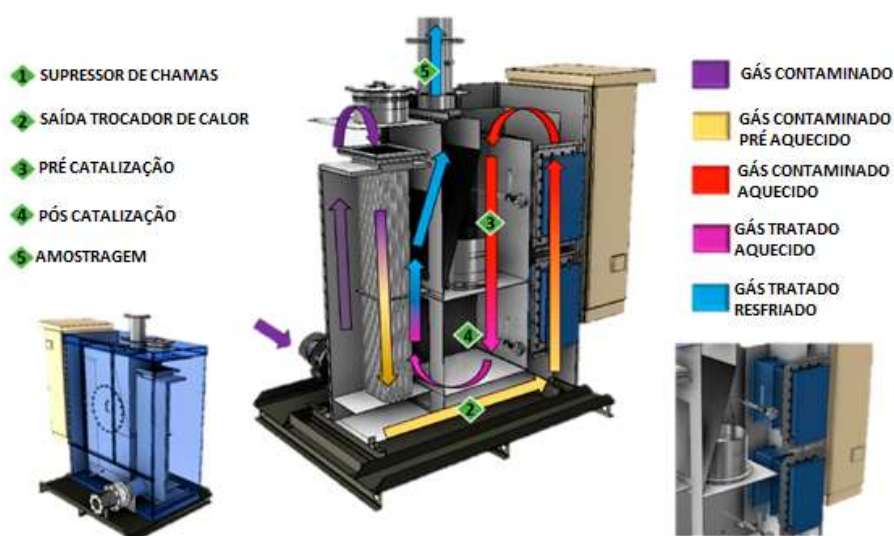
- 3- O ar carregado de COV, já na faixa de temperatura ideal de reação, passa então por um leito catalítico monolítico, onde os contaminantes são convertidos, através de uma reação exotérmica segura, em CO_2 e H_2O .
- 4- O fluxo de ar tratado passa então pelo trocador de calor, que tem do outro lado o ar contaminado da entrada do equipamento, recuperando desta forma o calor gerado na reação e utilizando-o no pré-aquecimento, gerando assim economia de energia.

Figura 13: Foto de um sistema de tratamento por oxidação térmica



Fonte: Fotografia cedida pela Reconditec.

Figura 14: Sistema de funcionamento de um oxidador térmico



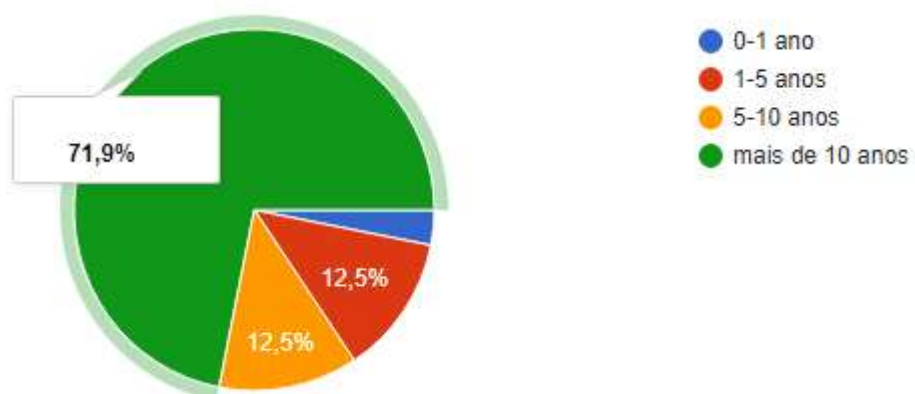
Fonte: Imagem cedida pela Reconditec.

9. DISCUSSÕES

Tendo em vista que as técnicas mais empregadas na remediação de áreas contaminadas são MPE e P&T, efluentes gerados a partir destes sistemas devem ser tratados antes de serem lançados no meio ambiente. Contudo, durante as buscas bibliográficas sobre tecnologias de tratamentos de efluentes provenientes de sistemas de remediação de áreas contaminadas, foram encontrados pouquíssimos estudos nas bases de buscas utilizadas (google acadêmico, periódico capes e Scopus), exceto para carvão ativado. Para as técnicas apresentadas neste estudo são encontrados estudos apenas para aplicação no setor industrial, o que torna inviável para áreas contaminadas, uma vez que exige sistemas menores e com custos também menores.

Para melhor esclarecimento sobre qual tipo de tratamento de efluentes é mais utilizado no mercado de áreas contaminadas, foi elaborado um formulário e distribuído via mídias sociais a profissionais que trabalham neste setor. Dentre os 32 profissionais que responderam ao questionário, como mostrado no gráfico da Figura 15, 71,9 % já trabalham na área a mais de 10 anos, 12,5 % entre 05 e 10 anos e 01 a 05 anos. Aqueles que trabalham a menos de 1 ano é de 3,1%. Assim, a pesquisa, dá condições de compreender o que o mercado mais aplica, pois a maioria dos profissionais que responderam ao formulário tem experiência de mais de 5 anos de experiência. Quanto à formação acadêmica destes profissionais, 40,6 % são engenheiros ambientais, 18,8 % geólogos e químicos e 9,4 % são gestores ambientais.

Figura 15: Gráfico: tempo de experiência de profissionais com atividades em áreas contaminadas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Conforme as respostas dos formulários, quanto ao uso das tecnologias de tratamento de efluentes em áreas contaminadas, os profissionais responderam o seguinte:

- 78,1% já usaram carvão ativado;
- 21,9% já usaram Oxidação térmica; e
- 1% já usou *air stripping*.

Assim, é possível verificar que a técnica de adsorção em carvão ativado é a mais utilizada, conforme as respostas da pesquisa, porque é considerada mais simples, a qual baseia-se na passagem da água ou contaminada ou vapor em colunas contendo, principalmente carvão ativo granulado. O que torna o uso desta tecnologia ser mais usada, também, é a sua capacidade de sorção de diversos compostos, como os orgânicos aromáticos, fenólicos, pesticidas, metais. Compostos diferentes podem coexistir em uma única área, assim, o carvão pode tratar não somente os compostos voláteis como assim faz o *air stripping* e a oxidação térmica, mas também, os demais que apresentam características físico-químicas diferentes, além de possuir menor custo. O tratamento com carvão ativado granulado também é a abordagem mais comum para tratar águas subterrâneas e vapor do solo contaminados. As unidades de GAC podem ser trazidas ao local e instaladas relativamente rápido, eliminando a necessidade de transportar água contaminada para tratamento fora do local.

O *air stripping* é uma maneira eficaz de remover COVs da água contaminada, onde os *air strippers* podem ser levados para o local, evitando a necessidade de transportar o efluente líquido para tratamento fora da área bombeada. O *air stripping* foi selecionado para uso em centenas de locais do *Superfund* e outros tipos de locais nos Estados Unidos. Apesar de ser um sistema simples de ser operado e ter sua confiabilidade comprovada, este ainda é pouco utilizado no Brasil, pois produz resíduo (material empacotado) e este precisa ser tratado antes de ser disposto e também pela dificuldade em atingir o padrão de qualidade da água para ser descartada no meio ambiente. Além de que, é necessário um sistema de tratamento de vapores, provenientes da separação física da fase dissolvida.

Dados sobre o uso de oxidação térmica ainda são incipientes. O que se tem, são as experiências de empresas fornecedoras que desenvolvem os seus próprios sistemas, porém, acabam não realizando publicações e por muitas vezes, nem patentes possuem.

No entanto, devido à sua versatilidade e alta eficiência, existe um potencial para o aumento da aplicação da remediação por processos térmicos em território brasileiro. Isto é comprovado pela pesquisa, onde verificou que 21,9% dos entrevistados utilizaram ou ainda utilizam esta técnica. Estudos são necessários, para melhor avaliação da sua performance nas condições encontradas em território nacional, bem como o desenvolvimento de formas que resultem em maior sustentabilidade. O oxidador térmico é aplicado para o tratamento exclusivamente de vapores.

A Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens das três técnicas apresentadas neste estudo.

Tabela 1: Vantagem, desvantagem e contaminante tratado vistos nos diversos tratamentos de efluentes estudados neste trabalho.

TRATAMENTO	EFLUENTE TRATADO	VANTAGEM	DESVANTAGEM	CONTAMINANTE TRATADO
Air Stripping	Líquido	- sistema simples a ser operado	- a técnica produz resíduo e este precisa ser disposto adequadamente	- COVs
		- ocupa pouco espaço - comprovada confiabilidade - aplicada em amplas variações de concentrações de efluentes - técnica eficaz e de baixo custo	- o gás removido deve ser tratado - os padrões de qualidade da água para consumo humano podem ter dificuldade de ser atingido - o crescimento de bactérias e precipitação de ferro podem	- SCoVs
Carvão Ativado	Líquido e gasoso (vapor)	- alta eficácia na remoção de contaminantes orgânicos voláteis (COVs)	colmatar o sistema e aumentar gastos com manutenção	
		- considerado o adsorvente mais poderoso do mundo - baixa reatividade ácido/base - alta estabilidade térmica - em sua regeneração pode ser utilizado em diversos ciclos de adsorção - um dos meios mais eficazes para remoção de contaminantes - custo inferior em relação a tratamentos similares - custos com instalações do carvão em pó menor que do carvão granular - eficazes na remoção de contaminantes orgânicos	- grande problema quanto ao seu descarte - gera resíduo altamente contaminado - muitas vezes descartado sem tratamento adequado - alto custo operacional para ser incinerado - emissão de compostos tóxicos em sua incineração - elevado consumo de energia no processo de regeneração térmica - possível formação de subprodutos perigosos	- fenóis - fosfatos e nitratos - trihalometanos - pesticidas - herbicidas - hidrocarbonetos aromáticos - metais
Oxidação Térmica	Gasoso (vapor)	- conceção simples e compacta	- elevado consumo energético	- COVs
		- solução econômica quando associada a recuperação de energia térmica - fácil operação e manutenção - temperatura de combustão é elevada constantemente - elevada eficiência de degradação de contaminantes - pode funcionar em modo auto térmico - elevada eficiência térmica	- elevada temperatura dos gases na saída do sistema - formação de vários produtos secundários tóxicos - grande desperdício de energia (elevadas temperaturas de operação)	- fenóis

Fonte: Autoria própria, 2022.

10. CONCLUSÃO

O gerenciamento de áreas contaminadas configura ainda um dos maiores desafios ambientais para os órgãos reguladores, empreendedores, acadêmicos, profissionais e sociedade mundial. Atividades de remediação de áreas contaminadas também geram efluentes, que se não tratados adequadamente, podem continuar a impactar o meio ambiente. As técnicas de remediação bombeamento e tratamento, extração multifásica, extração de vapor, extração em duas fases e barreiras hidráulicas produzem efluentes líquidos e/ou gasosos que devem ser tratados antes do seu descarte final.

As técnicas de tratamento mais aplicadas em áreas contaminadas são *air stripping*, carvão ativado e oxidação térmica. Contudo, estudos científicos a cerca destas tecnologias aplicadas às áreas contaminadas, ainda são muito escassos. O carvão ativado é o mais utilizado, devido à sua praticidade e tratar efluentes líquidos e gasosos, e ter o menor custo, apesar de poder se tornar um resíduo que também precisa de destinação.

A técnica *air stripping* apresenta eficácia na remoção apenas de compostos voláteis, e ainda é necessário um sistema de tratamento para os vapores, devido à transferência de massa líquido-gasoso. Ainda, o material utilizado no *air stripper*, deverá ser destinado como resíduo, o que pode impactar ainda mais o meio ambiente.

Já na oxidação térmica, estudos garantem a queima de praticamente todos os compostos orgânicos voláteis e solventes, com responsabilidade, promovendo benefícios ao meio ambiente. Mas esta tecnologia ainda é pouco utilizada e dados sobre seu uso ainda são incipientes.

Recomenda-se que mais estudos sobre o tratamento de efluentes provenientes de sistemas de remediação sejam realizados. Além, do desenvolvimento de tecnologias que torna o processo mais sustentável e com menos descarte de resíduos.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANM, M. Limpeza por meio de extração multifásica de uma área contaminada com vários VOC. *In*: MOERI, E.; COELHO, R.; MARKER, A. **Remediação e revitalização de áreas contaminadas**. São Paulo: Signus Editora, 2004.

ALBERTO, M. C.; CHANG, K. H. Os desafios da remediação por bombeamento e tratamento em domínios geológicos complexos: o uso de modelos estocásticos para auxiliar na determinação da zona de captura. **Águas Subterrâneas**, v. 25, n. 1, 5 abr. 2011.

BALDWIN, B. R. et al. Enumeration of aromatic oxygenase genes to evaluate biodegradation during multi-phase extraction at a gasoline-contaminated site. **Journal of hazardous materials**, v. 163, n. 2–3, p. 524–530, 2009.

BASALEH, A. A.; AL-MALACK, M. H. Utilization of Municipal Organic Solid Waste for Production of Activated Carbon in Saudi Arabia. **Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)**, v. 43, n. 7, 2018.

BOULDING, J. R. **Epa Environmental Engineering Sourcebook**. CRC Press. 1st Edition. 1996. Disponível em: [≤https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203756720-15/air-stripping-aqueous-solutions-1-jim-rawe?context=ubx>](https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203756720-15/air-stripping-aqueous-solutions-1-jim-rawe?context=ubx). Acesso em: 12 de mar. 2022.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria N° 038/2017/C, de 17 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual n° 13.577/2009 e seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto n° 59.263/2013, e dá outras providências. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**: seção 1: Poder Executivo, edição n° 127(28), p. 47-52, 02 out. 2017. Disponível em: [≤https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>](https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf). Acesso em: 21 nov. 2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo. Boletim 2020**. Série Relatórios. São Paulo: CETESB, 2021a. Disponível em: [≤https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2021/07/Boletim-de-Qualidade-da-Aguas-Subterraneas-no-Estado-de-Sao-Paulo-2020.pdf>](https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2021/07/Boletim-de-Qualidade-da-Aguas-Subterraneas-no-Estado-de-Sao-Paulo-2020.pdf). Acesso em: 11 set. 2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Metodologia de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Série Relatórios - Seção 1.6. São Paulo: CETESB, 2021b. Disponível em: [≤https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-](https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-)

contaminadas/introducao-ao-gerenciamento-de-areas-contaminadas/metodologia-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas>. Acesso em: 11 set. 2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relação de áreas Contaminadas**. Série Relatórios - Seção 1.6. São Paulo: CETESB, 2021c. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/Ordem-alfabetica.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2022.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria N° 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021. Dispõe sobre a Aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**: seção 1: Poder Executivo, edição n° 131(240), p. 60, 17 dec. 2021. São Paulo: CETESB, 2021d. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-125-2021-E-Atualizacao-dos-Valores-Orientadores-paa-solo-e-aguas-subterraneas.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2021.

COELHO, Rui. **Técnicas de Tratamento de Efluentes Gasosos**. Disponível em: <<https://artigos%20091221/Apresentacao.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2021.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 275, de 25 de abril de 2001. Estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduos, a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para a coleta seletiva. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: Seção 1, Brasília, DF, p. 80, 19 de junho de 2001.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. - (OBS.: Alterada pelas Resoluções n° 370/2006, 397/2008, n° 410/2009, e n° 430/2011. Complementada pela Resolução n° 393/2007). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: Brasília, DF, n° 53, p. 58-63, 18 de março de 2005.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: Brasília, DF, n° 66, p. 64-68, 7 de abril de 2008.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 410, de 04 de maio de 2009. Prorroga o prazo para complementação das condições e padrões de lançamento de efluentes, previsto no art. 44 da Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, e no Art. 3° da Resolução n° 397, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: Brasília, DF, p. 64-68, 5 de abril de 2009.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: Brasília, DF, nº 92, p. 89, 16 de maio de 2011.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: Brasília, DF, nº 223, p. 155, 21 de novembro de 2018.

DE PAULA E SILVA, F.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, p. 19–36, 2005.

FRAUENSTEIN, J. **EUGRIS: "European Sustainable Land and Groundwater Management Information System"**. In: CONSOIL 2003: 8º International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil. Germany: 2003. Disponível em: <<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20553769>>. Acesso em: 10 jan. 2022

FREIRE, P. A. DE C.; TRANNIN, I. C. DE B.; SIMÕES, S. J. C. Bombeamento e tratamento da fase livre em Aquífero Litorâneo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 461–470, 2014.

FURTADO, M. Remediação de solos: Para afastar o perigo que se esconde nos subterrâneos das grandes cidades, meios legais e econômicos devem fomentar obras de descontaminação. **Revista Química e Derivados**, n. 437, p. 28–44, 2005.

GANIYU, S. O.; SABLE, S.; EL-DIN, M. G. Advanced oxidation processes for the degradation of dissolved organics in produced water: A review of process performance, degradation kinetics and pathway. **Chemical Engineering Journal**, v. 429, p. 132492, 2022.

GIBBS, L. **Learning from Love Canal: A 20th anniversary retrospective**. Disponível em: <http://www.environlink.org/environarts/arts_and_activism/LoisGibbs.html>. Acesso em: 7 set. 2021.

KITTEL, J. A. et al. **Bioslurping-vacuum-enhanced free-product recovery coupled with Bioventing: a case study**. The Proceedings of the 1994 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Remediation Conference. **Anais...**Houston, TX: Ground Water Publishing Company, 1994.

KUEPER, B. H. et al. **An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface**. Bristol, UK: Environment Agency R&D Publication, 2003. v. 133

MELO JÚNIOR, R. P. DE. **Fabricação e caracterização de óxidos de níquel, ferro, cobalto e gálio para aplicações fotônicas**. Tese (Doutorado)—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

MORAES, S. L. DE; TEIXEIRA, C. E.; MAXIMIANO, A. M. DE S. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. 1ª Edição revisada ed. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: BNDES, 2014.

MURANAKA, CÍ. T. **Combinação de adsorção por carvão ativado com processo oxidativo avançado (POA) para tratamento de efluentes contendo fenol**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 25 jun. 2010.

NYSDOH, N. Y. S. D. OF H. **Love Canal, a special report to the Governor and Legislature**. Albany, N.Y: The Office, New York State Dept. of Health, Health Communications Group, 1981.

OLIVEIRA, E. DE. Barreira hidráulica para contenção de plumas de contaminação. *In*: OLIVEIRA, E. DE. **Hidrogeologia Ambiental: Contaminação de Solo e Águas Subterrâneas**. São Paulo: ABAS – Informa. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2016. p. 155.

PAPADOPOULOS, S.; VATSERIS, C. **Air sparging for site remediation**. Thessaloniki: IntergeoEnvironmental Technology Ltd., 2005.

PEREIRA, W. S.; FREIRE, R. S. Ferro zero: uma nova abordagem para o tratamento de águas contaminadas com compostos orgânicos poluentes. **Química Nova**, v. 28, p. 130–136, 2005.

ROCHE, R. **Vamos entender o que é remediação e seus métodos? Roberto Roche - QSMS-RS e Sustentabilidade**, 2008. Disponível em: <<https://robertoroche.com.br/passivo-ambiental-e-remediacao-de-areas-impactadas-o-responsavel-pode-ser-voce/>>. Acesso em: 5 set. 2021

SANTOS, D. H. DA S. **Avaliação da Eficiência dos Processos Oxidativos Avançados na Regeneração de Carvão Ativado Saturado com Poluente Orgânico**. Monografia Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2021.

SANTOS, E.; UNGARI, H.; SANTOS, M. **Principais técnicas de remediação e gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos no Estado de São Paulo**. Monografia—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 8.468, de 08.09.1976. Aprova o Regulamento da Lei n.º 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**: Diário Oficial-Executivo, p. 1-4, 9 set. 1976.

SCHMIDT, C. **Remediação in situ de solos e águas subterrâneas contaminados por líquidos orgânicos não miscíveis em água (NAPLs)**. Rio de Janeiro: COAMB / FEN / UERJ, 2010. v. 1

SIEGRIST, R. L.; CRIMI, M.; SIMPKIN, T. J. **In situ chemical oxidation for groundwater remediation**. 1. ed. New York: Springer, 2011. v. 3

SUTHERSAN, S. S.; PAYNE, F. C. **In Situ Remediation Engineering**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

TAVARES, S. DE L. Técnicas de remediação. *In*: TAVARES, S. DE L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013. p. 61–90.

TIBURTIUS, E. R. L.; PERALTA-ZAMORA, P.; LEAL, E. S. Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. **Química nova**, v. 27, p. 441–446, 2004.

USACE, U. A. C. OF E. **Engineering and design: multi-Phase extraction**. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1999. Disponível em: <https://clu-in.org/download/techfocus/mpe/MPE-EM_1110-1-4010.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2021.

USACE, U. A. C. OF E. **Operation and maintenance of extraction and injection wells at HTRW sites**. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 2000. Disponível em: <<https://permanent.fdlp.gov/lps104913/entire.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

USACE, U. A. C. OF E. **Engineering and Design: ICE ENGINEERING**. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 2002. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1612.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2021.

USEPA - United State Environmental Protection Agency.. **A Citizen's Guide to In Situ Soil Flushing**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 1996. Disponível em: <<https://frtr.gov/matrix/documents/Soil-Flushing/1996-A-Citizens-Guide-to-In-Situ-Soil-Flushing.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

USEPA - United State Environmental Protection Agency.. **In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil: Engineering Forum Issue Paper**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2006. Disponível em: <<https://semspub.epa.gov/work/HQ/175834.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

USEPA - United State Environmental Protection Agency. **A Citizen's Guide to Bioremediation**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2012a. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/a_citizens_guide_to_bioremediation.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2021.

USEPA - United State Environmental Protection Agency. **Community Guide to In Situ Chemical Oxidation**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2012b. Disponível em: <<https://semspub.epa.gov/work/HQ/401601.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

USEPA - United State Environmental Protection Agency. **Superfund Remedy Report** 16th Edition. EPA-542-R-20-001 Office of Land and Emergency Management, July, 2020. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/100002509.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

USEPA - United State Environmental Protection Agency. Community Guide to Air Stripping. Office of Land and Emergency Management (5203P) | EPA-542-F-21-001. | 2021a. Disponível em: <<https://semspub.epa.gov/work/HQ/401577.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

USEPA - United State Environmental Protection Agency. Community Guide to Granular Activated Carbon Treatment. Office of Land and Emergency Management (5203P) | EPA-542-F-21-001. 2021b. Disponível em: <<https://semspub.epa.gov/work/HQ/401595.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

VODYANITSKII, Y. N.; KIRILOVA, N. Soil contamination by organic micropollutants. **Annals of Agrarian Science**, v. 13, n. 3, p. 8–15, 2015.

YUNG-TSE, H et al. **Handbook of Environmental Engineering**. Advanced Physicochemical Treatment Processes. v. 4, p. 123–153, 2006.

ZHANG, H. et al. Removal of aqueous Pb (II) by adsorption on Al₂O₃-pillared layered MnO₂. **Applied Surface Science**, v. 406, p. 330–338, 2017.

ZHAO, S. et al. Adsorption of phosphorus by different biochars. **Spectroscopy Letters**, v. 50, n. 2, p. 73–80, 2017.