

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma descrição do processo de dessorção térmica como técnica de remediação de solos contaminados. As suas vantagens e desvantagens e as principais características do processo também serão apresentadas e discutidas, assim como as propriedades e características dos principais contaminantes. Também será abordado o fluxo de calor e a transferência de calor em meios porosos.

2.1. Contaminantes

É indispensável o conhecimento das propriedades do contaminante e dos principais componentes do meio para se prever seu comportamento no ambiente.

Os principais processos de interação entre um contaminante e o ambiente na camada superficial são as retenções, quer seja por adsorção, absorção ou precipitação; a transformação biótica (biodegradação) ou abiótica (degradação físico-química) e o transporte por volatilização, lixiviação ou escoamento superficial e no subsolo, os mecanismos de transporte são advecção, difusão e dispersão. Assim pode-se dizer, de maneira geral, que o contaminante poderá ser retido, transformado ou transportado (Melo, 2003).

Os compostos orgânicos voláteis (VOCs) e compostos orgânicos semivoláteis (SVOCs) no solo são vaporizados e/ou destruídos por um número diverso de mecanismos, incluindo:

- evaporação, destilação por vapor, ebulição a temperaturas inferiores a 100°C;
- oxidação e pirólise (decomposição química em ausência de oxigênio) a temperaturas superiores a 100°C.

Atingir a pressão de vapor e aumentar a taxa de vaporização são geralmente os mecanismos mais importantes para se conseguir uma boa remediação, utilizando-se a técnica de aquecimento (Duarte, 2004).

A Tabela 1 mostra propriedades de alguns contaminantes orgânicos encontrados em áreas contaminadas. Esta tabela foi elaborada com base em Davis (1997).

É importante notar que o ponto de ebulição da maioria dos contaminantes é inferior a 100°C, que é uma temperatura não muito elevada para os padrões de temperatura potenciais dos sistemas de dessorção térmica. A observação da pressão de vapor mostra que, em geral, quanto o menor o ponto de ebulição é a pressão de vapor a 25°C. Os contaminantes com o menor ponto de ebulição também geralmente têm o menor calor de vaporização; estes contaminantes são relativamente fáceis de volatilizar. Logo, os compostos com alto ponto de ebulição requerem muita energia para convertê-los à fase gasosa.

Tabela 1 - Propriedades de alguns compostos químicos orgânicos encontrados em áreas contaminadas (Modificado de Davis, 1997).

Contaminante orgânico	Ponto de ebulição (°C)	Densidade (Mg/m ³)	Viscosidade (25°C)	Solubilidade em água (mg/L)	Pressão de vapor (mmHg)	
					10°C	50°C
Diclorometano	40	1,3182 a 25°C	0,413	20000 a 20°C	260,9	>760
1,2 Dicloroetileno	49	12,444	0,317	600 a 20°C	198,7	>760
Acetona	56,3	0,7899	0,306	∞	121,7	622,4
1,1 Dicloroetano	57,4	1,17	0,464	5500 a 20°C	125,8	608,6
1,2 Sis – Dicloroetileno	60	1,2649 a 25°C	0,445	800 a 20°C	104,8	580
Tricloroetano (cloroforme)	61,2	1,49	0,537	8000 a 20°C	98,6	541,3
1-Hexano	63,5	0,675	0,252	50 a 20°C	90	485,3
N-Hexano	68,7	0,659	0,300	9,5	80,8	407,5
1,1,1- Tricloroetano	74,1	1,3303 a 25°C	0,793	4400 a 20°C	67,4	360,1
Metanol	64,6	0,791	0,544	∞	58,5	400
Tetracloroeto de carbono	76,8	1,5833 a 25°C	0,908	800 a 20°C	58,3	332,8
2-Butanone (metil-etil cetona)	79,6	0,7994 a 25°C	0,405	26,8	52,6	314,3

Tabela 2 (cont.) - Propriedades de alguns compostos químicos orgânicos encontrados em áreas contaminadas (Modificado de Davis, 1997).

Contaminante orgânico	Ponto de ebulição (°C)	Densidade (Mg/m ³)	Viscosidade (25°C)	Solubilidade em água (mg/L)	Pressão de vapor (mmHg)	
					10°C	50°C
Benzeno	80,1	0,88	0,604	1770 a 25°C	47,8	307,8
Ciclohexano	80,7	0,7731 a 25°C	0,894	58 a 25°C	50,5	272,3
Tricloroetileno – TCE	87,3	1,4578 a 25°C	0,545	1100 a 25°C	37,6	256,7
Tolueno	110,6	0,8647 a 25°C	0,56	515-540 a 25°C	14,3	579,1 a 100°C
Tetracloroetileno – PCE	121,3	1,613 a 25°C	0,844	150 a 25°C	9,0	400 a 100°C
N-Octano	126	0,6986 a 25°C	0,508	0,7 a 20°C	6,5	368,7 a 100°C
Clorobenzeno	131,7	1,1007 a 25°C	0,753	490 a 25°C	6,9	323,7 a 100°C
Etilbenzeno	136,2	0,8654 a 25°C	0,631	160 a 25°C	6,0	295,7 a 100°C
Xileno	138,4	0,8577	0,608	160 a 25°C	4,5	238,9 a 100°C
Dicloro-benzeno	173	1,2988 a 25°C	1,044	80 a 25°C	2,2	67,1
Dodecano	216,5	0,75	1,383	0,0034		19,5
Naftaleno	218	0,97		32 a 25°C		22,7
1-Metil Naftaleno	244,8	1,020		28,5		0,043
P-Xileno		1,06 a 25°C		190 a 20°C	8,8	
Cloroetano		0,65 a 25°C		5710 a 20°C	755	
HCH	65	1,87				
Hexadecano	286,9	0,773	3,032	0,0063	<1	<1

Para contaminantes orgânicos voláteis (combustíveis e solventes clorados), com o aumento de temperatura a pressão de vapor cresce potencialmente conforme mostra a Figura 1, aumentando a taxa de solubilidade e dissolução, diminuindo desta forma a adsorção do mesmo na matriz do solo, aumentando assim a razão de difusão. Quando se trata de orgânicos semivoláteis e não voláteis o aumento de temperatura também faz com que a pressão de vapor aumente

potencialmente fazendo com que a viscosidade decresça potencialmente, decrescendo também as tensões interfaciais e aumentando desta maneira a permeabilidade relativa destes tipos de compostos (Duarte, 2004).

O efeito da temperatura na solubilidade depende do composto químico em questão, sendo que normalmente a pressão de vapor cresce com a temperatura, conforme sugere a Figura 1. Geralmente, quando um composto químico é aquecido, a sua densidade diminui, sendo a sua pressão de vapor aumentada. Sua adsorção na fase sólida ou matéria orgânica sofre um decréscimo e sua difusão molecular nas fases aquosa e gasosa é aumentada.

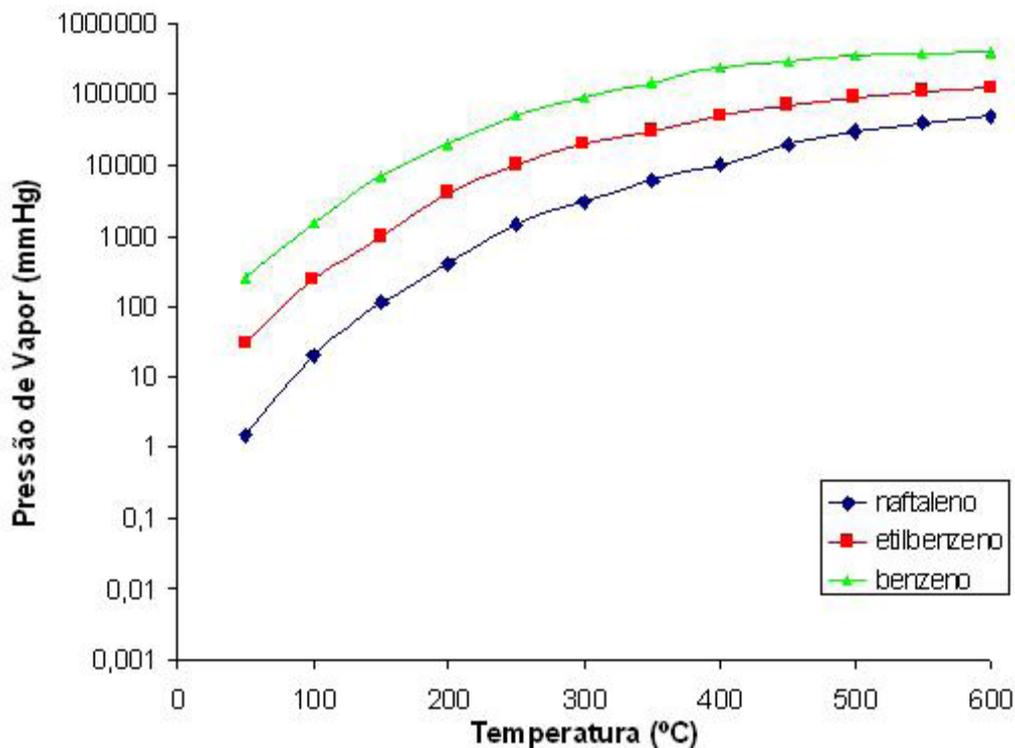


Figura 1 - Relação entre temperatura e pressão de vapor (EPA, 1998).

Conforme Duarte (2004), recentes estudos têm mostrado que o coeficiente de difusão em líquidos é proporcional à temperatura.

O processo de difusão dos gases é muito maior do que dos líquidos, já a viscosidade de gases é aproximadamente duas ordens de magnitudes menores que a viscosidade de líquidos. A conversão de um líquido em um gás irá aumentar a sua mobilidade, conseqüentemente facilitando a sua remoção.

Duarte (2004) afirma que em um solo, quanto maior a quantidade de matéria orgânica mais difícil é retirar o contaminante, até mesmo com aquecimento. Quanto menor o teor de matéria orgânica, maior será a quantidade de contaminante nas fases líquida e gasosa.

Contaminantes com menores pontos de ebulição geralmente têm maior pressão de vapor. Para compostos com alto ponto de ebulição, quando estão sendo tratados dentro de solos argilosos, a adição de calor como parte do processo de remediação irá aumentar significativamente a volatilização com o processo de extração de vapor.

Nos contaminantes oleosos a mais significativa melhoria que o aquecimento proporciona é a redução da viscosidade na fase oleosa.

2.2. Casos de Vazamento de Óleo

Os acidentes ambientais decorrem de falhas humanas sejam na manipulação direta de equipamentos ou no gerenciamento operacional inadequado que envolve a manutenção e a segurança do navio.

Em função da grande movimentação de petróleo por transporte marítimo, foi registrado em 1974 o primeiro desastre ambiental de óleo devido à colisão do petroleiro Takimiyia Maru com uma rocha submersa no interior do Canal de São Sebastião, vazando cerca de 6.000 m³ de óleo, causando mortandade de aves e prejuízos à pesca e ao turismo. Desde então outros casos ocorreram envolvendo navios, portos, terminais, oleodutos e refinarias entre outras fontes, motivando a necessidade de investimentos na prevenção e nas atividades de limpeza e remediação das áreas afetadas. No período de 1978 - 2008 foram registrados um total de 7544 acidentes no Brasil segundo estatísticas da CETESB. A Tabela 3 mostra os principais derrames de petróleo no litoral do Brasil no período de 1974 – 2009, segundo Poffo (2000).

Tabela 3 Principais derrames de petróleo no litoral de Brasil (modificado de Poffo, 2000).

Fonte	Data	Local	Volume Vazado (m ³)
N/T Takimiyia Maru	Ago/1974	São Sebastião (SP)	6.000
N/T Tarik Ibn Ziyad	Mar/1975	Baía de Guanabara (RJ)	6.000
N/T Brazilian Marina	Jan/1978	São Sebastião (SP)	6.000
Oleoduto S. Sebastião-Cubatão	Nov/1983	Bertioga (SP)	2.500
Barcaça abastecedora	Set/1984	Santos (SP)	450
N/T Marina	Mar/1985	São Sebastião (SP)	2.000
Oleoduto S. Sebastião-Cubatão	Mai/1988	São Sebastião (SP)	1
Oleoduto S. Sebastião-Cubatão	Ago/1989	São Sebastião (SP)	350
N/T Penélope	Mai/1991	São Sebastião (SP)	280
N/T Theomana	Set/1991	Bacia de Campos (RJ)	2.150
Oleoduto S. Sebastião-Cubatão	Mai/1994	São Sebastião (SP)	2.700
Ilha do Governador (RJ)	Ago/1997	Ilha do Governador (RJ)	2
N/T Smyrni	Jul/1998	Santos (SP)	40
N/T Maruim	Ago/1998	São Sebastião (SP)	15
Baía de Guanabara	Jan/2000	Baía da Guanabara (RJ)	1.292
Tramandaí	Mar/2000	Praia de Jardim do Éden (RS)	18
N/T Mafra	Mar/2000	São Sebastião (SP)	8
Baía de Guanabara	Jun/2000	Baía de Guanabara (RJ)	392.000
Refinaria Presidente Getúlio Vargas	Jul/2000	São José dos Pinhais (PR)	4.000
N/T Vergina II	Nov/2000	São Sebastião (SP)	86
Canal Sabiá	Fev/2001	Paranaguá (PR)	100
Plataforma P 36	Mar/2001	Bacia de Campos (RJ)	1.500
N/T Princess	Ago/2001	Baía de Ilha de Grande (RJ)	0.715
N/T Norma	Out/2001	Baía de Paranaguá (Paraná)	392
N/T Caronia	Feb/2002	Baía da Guanabara (RJ)	50
N/T Brotas	Mai/2002	Baía de Ilha de Grande (RJ)	16
Refinaria Landulfo Alves	Abr/2009	Baía de Todos os Santos (BA)	2,5

- N/T – navio tanque

Segundo Poffo (2000), os acidentes de navegação foram as causas mais freqüentes das ocorrências de vazamento, seguidos pelas falhas operacionais e mecânicas nos navios. A Tabela 4 apresenta as porcentagens de acidentes em diferentes atividades no período de 1978 até outubro de 2008 registrados segundo a CETESB, sendo que acidentes relacionados ao transporte rodoviário de combustível constituem os de maior porcentagem.

Tabela 4 - Porcentagens de acidentes em diferentes atividades no período de 1978 até outubro 2008, acessado em 18 de dezembro de 2008, CETESB (2008).

Período:	1978 até outubro 2008
Total de acidentes	7544
Atividades	%
Transporte Ferroviário	1,1
Mancha Órfã	1,6
Armazenamento	2,5
Transporte Marítimo	4,8
Descarte	5,3
Indústria	7,1
Postos de Combustíveis	9,0
Nada Constatado	9,3
Não Identificada	5,1
Outras	11,5
Transporte por Duto	2,6
Transporte Rodoviário	40,2

Segundo a U. S. Environmental Protection Agency (EPA), a poluição ambiental por óleo causa efeitos de curta e longa duração e traz prejuízos à saúde humana e às suas atividades socioeconômicas, aos animais e plantas e à própria natureza nos territórios atingidos (EPA, 2006).

De acordo com a freqüência de entrada os vazamentos podem ser classificados como problemas agudos ou crônicos. Os problemas agudos referem-se aos vazamentos e derrames de navios petroleiros e às atividades clandestinas de lavagem dos tanques dos mesmos. Os crônicos são aqueles gerados pela

introdução contínua de hidrocarbonetos, através de pequenos vazamentos provenientes de operações de navios e plataformas ou a introdução constante de dejetos urbanos e industriais. Os problemas acidentais, embora em menor escala, não são de menor importância, uma vez que seus efeitos são de grande envergadura (Kennish, 1997).

2.2.1. Composição e quantidade de produtos derramados

Uma tonelada de petróleo pode se espalhar sobre a superfície de 112 km² de oceano e os hidrocarbonetos podem persistir no meio por até uma década, dependendo do volume derramado, das características físico-químicas do óleo, das proporções das manchas de óleo formadas, do hidrodinamismo e da sensibilidade dos ecossistemas atingidos entre outros fatores (Poffo, 2001). A Tabela 5 mostra a classe de risco segundo a classificação da CETESB.

Tabela 5 – Classe de risco, acessado em 18 de dezembro de 2008, CETESB (2008).

Período:	1978 até outubro 2008
Total de acidentes	7544
Classe de risco	%
Oxidantes / peróxidos	1,0
Gases	9,7
Líquidos Inflamáveis	31,1
Sólidos Inflamáveis	1,7
Tóxicas / infectantes	2,4
Corrosivas	9,8
Substâncias perigosas diversas	5,4
Diversas	2,6
Não Identificadas	17,1
Não classificados	10,2
Nada constatado	8,9

2.2.2. Propriedades toxicológicas do óleo

O óleo derramado causa impactos nos organismos os quais podem ser efeitos físicos resultantes do recobrimento e efeitos químicos que estão associados

à toxicidade dos compostos presentes. Estes efeitos podem ocorrer simultaneamente em um vazamento de óleo. A diferença está centrada na combinação entre densidade e toxicidade do óleo vazado e sua variação com o tempo. Nos óleos de alta densidade, o efeito físico de recobrimento é predominante, enquanto que nos óleos de baixa densidade o efeito químico é o mais representativo (CETESB, 2008).

Os alcanos, popularmente conhecidos como as parafinas, os quais representam grande parte do óleo cru, podem causar efeitos anestésicos e narcotizantes.

O contato dos organismos com frações tóxicas do óleo pode levar à morte por intoxicação, especialmente associada às frações de compostos aromáticos. Entre os componentes mais tóxicos estão o benzeno, o tolueno e o xileno. Estas substâncias apresentam considerável solubilidade em água (especialmente o benzeno), o que torna os organismos marinhos mais vulneráveis uma vez que absorvem estes contaminantes pelos tecidos, brânquias, por ingestão direta da água ou de alimento contaminado.

2.2.3. Propriedades físicas e químicas do óleo

O petróleo apresenta milhares de compostos diferentes formando uma mistura muito complexa. Entre os principais componentes estão os hidrocarbonetos que chegam a atingir 98% da composição total. O enxofre, nitrogênio e oxigênio são os constituintes menores e apresenta metais traço como vanádio, níquel, sódio, cálcio, cobre e urânio.

Produtos refinados como gasolina, diesel, óleos lubrificantes, querosene, óleo combustível, contêm os mesmos compostos que o petróleo, mas com um intervalo de pontos de ebulição mais restrito. Além disso, em processo de refino, como o craqueamento, há geração de olefinas, que existem em alta concentração na gasolina.

A gravidade específica e a gravidade API (American Petroleum Institute) são propriedades relacionadas com a densidade e que são frequentemente utilizadas. A gravidade específica (ou densidade específica) é a razão entre a densidade do óleo e a densidade da água pura, a uma dada temperatura. A gravidade °API é mais frequentemente utilizada na indústria petrolífera do que a densidade, e refere-se a

uma temperatura de 15° C, sendo calculada conforme a equação 2.

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{densidade específica}} - 131,5 \quad (1)$$

Em geral, os óleos são classificados como:

- a) não persistentes: tendem a desaparecer rapidamente da superfície do mar (gasolina, nafta, querosene, óleos leves);
- b) persistentes: dissipam mais vagorosamente (óleos crus).

A persistência depende de sua gravidade específica que é a sua densidade em relação à água pura. Os óleos podem ser agrupados de acordo a sua gravidade $^{\circ}API$ conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação dos tipos de óleo, acessado em 18 de dezembro de 2008, CETESB (2008).

Grupo	Densidade	$^{\circ}API$	Composição	Persistência
I	< 0,8	> 45	Leve	1 -2 dias
II	0,80 a 0,85	35 a 45	Leve	3 -4 dias
III	0,85 a 0,95	17,5 a 35	Pesado	5 -7 dias
IV	> 0,95	< 17,5	Pesado	> 7 dias

Fonte: ITOPF - The International Tanker Owners Pollution Federation

A viscosidade é a medida de resistência do fluido ao movimento; quanto menor a viscosidade, mais facilmente o produto flui. Tal como a densidade, a viscosidade é influenciada pela temperatura e pelo envelhecimento do óleo, diminuindo com o aumento da temperatura e aumentando com o envelhecimento do óleo. Esta propriedade influencia o grau de espalhamento, a penetração no solo ou nos sedimentos e a seleção de equipamento mecânico para aspiração do produto (Baptista, 2005). Na Tabela 7 são apresentadas as principais características físicas de vários tipos de óleo, segundo a CETESB.

Tabela 7 – Comparação das características físicas de vários tipos de óleo, acessado em 18 de dezembro de 2008 CETESB (2008).

	Densidade específica	Grau API	Viscosidade	Ponto de Ebulição °C
Óleo cru	0,8 a 0,95	5 a 40	20 a 1000	30 a 500
Gasolina	0,65 a 0,75	60	4 a 10	30 a 200
Querosene	0,8	50	1,5	160 a 290

2.3. Processos Térmicos

Um amplo intervalo de processos térmicos está em vários estágios de desenvolvimento, embora o número de tecnologias comercialmente disponíveis consideravelmente mais restrito. As técnicas baixo desenvolvimento e comercialmente avaliáveis podem ser *in situ* ou *ex situ* (Wood, 1997). Três tecnologias *ex-situ* que operam em diferentes regimes de temperatura serão nomeadas:

- Dessorção térmica
- Incineração
- Vitrificação

A **dessorção térmica** envolve a escavação dos solos poluídos seguido pelo aquecimento na região à temperatura de 600°C. A esta temperatura os contaminantes voláteis são evaporados e subseqüentemente removidos e os gases gerados por condensação, filtração ou destruição a altas temperaturas. Após o tratamento pode ser possível o reuso do solo dependendo das temperaturas usadas e as concentrações de alguma contaminação residual. A dessorção térmica tem uso primário no tratamento de contaminação orgânica embora seja também usado para o tratamento de solos contaminados com mercúrio. As vantagens e desvantagens de processos térmicos são mostradas na Tabela 8.

As maiores vantagens da técnica de dessorção térmica é que pode ser efetiva tanto para locais com níveis muito baixos de contaminação quanto para locais altamente contaminados, apresentando um mínimo risco de mobilidade dos contaminantes. A destruição dos contaminantes é completa e o processo não é prejudicado pela heterogeneidade do subsolo, além de ser rápida e segura.

Tabela 8 - Vantagens e desvantagens de processos térmicos (WOOD, 1997).

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Potencial para a completa destruição de contaminantes.	Alto custo de alguns métodos devido ao alto requerimento de energia.
Aplicável para um amplo intervalo de tipos de solos.	O solo pode ser destruído pelas altas temperaturas.
Tecnologias estabelecidas com algumas unidades móveis para selecionar tipos de processos.	Os metais pesados não podem ser removidos.
Possível reutilização de solo se a temperatura do processo não é excessiva.	Potencial para geração de produtos combustíveis daninhos.
	Controle de emissões atmosféricas requer incluir condensação de metais voláteis.

A incineração envolve o aquecimento de solo escavado a temperaturas de 880-1200°C para destruir contaminantes. A incineração pode também ser usada para o tratamento de contaminantes líquidos e lamas. A incineração resulta na destruição da textura do solo e remoção de todos os componentes. Os resíduos também podem ter alto conteúdo de metais pesados. Os gases gerados precisam ser tratados para remover partículas e alguns produtos da combustão perigosos. O intervalo de métodos de incineração é avaliável embora o uso de fornos rotativos seja provavelmente o mais estendido. Custos do tratamento são fortemente dependentes no conteúdo de água do material tratado e algum valor calorífico que o material possa ter.

A vitrificação envolve a exposição do solo a temperaturas no intervalo de 1000-1700°C. A estas temperaturas a vitrificação do solo acontece formando um produto cristalino sólido monolítico. A tecnologia trabalha pela fusão de mineral alumínio-silicato no solo que, em resfriamento, solidifica para formar o vidro. Em solos ou resíduos onde há insuficiente alumínio-silicato estes podem ser adicionados na forma de vidro ou argila. Os produtos da vitrificação podem ter características muito baixas de lixiviação. Os gases gerados requerem tratamento para a remoção de alguns metais voláteis ou perigosos do produto da combustão. A Vitrificação é um processo custoso e igualmente é restrito em uso para contaminantes particularmente perigosos que não são facilmente tratados por outros métodos.

2.3.1. Dessorção Térmica

Wood (1997) agrupa os métodos de remediação em duas categorias: os métodos geotécnicos e as técnicas processuais. Os métodos geotécnicos empregam os métodos tradicionais como escavação e disposição em aterros ou usam sistemas apropriados de contenção. As técnicas processuais incluem os processos físicos, químicos e biológicos de estabilização/solidificação e os térmicos. Estas últimas podem ser aplicadas “*in situ*” ou “*ex-situ*”.

As técnicas de tratamento de solos contaminados devem ser encaradas como etapas do plano de remediação, já que por vezes não são aplicadas isoladamente, mas em combinação seqüencial com outras.

Em relação ao estado de desenvolvimento, as tecnologias de tratamento podem ser classificadas como convencionais ou estabelecidas ou inovadoras ou emergentes. As tecnologias de tratamento emergentes são aquelas que ainda não foram testadas na prática. As tecnologias de tratamento inovadoras caracterizam-se por já terem sido aplicadas a pelo menos um local contaminado, não existindo ainda informação suficiente de modo a permitir previsões sobre os seus custos e eficácia em diferentes condições operatórias. As tecnologias de tratamentos convencionais são as que já foram aplicadas numerosas vezes, existindo informação suficiente de modo a possibilitar prever facilmente a sua aplicabilidade noutras situações.

Em relação do local em que ocorre o tratamento, as tecnologias podem ser descritas como “*in situ*” ou “*ex situ*”. Estas últimas podem ser realizadas “*on site*” ou “*off site*”. No caso do tratamento “*in situ*” o material contaminado é tratado sem se recorrer a escavação, isto é, mais ou menos nas condições de armazenamento naturais. O tratamento “*ex situ*” envolve sempre escavação e diz-se que ocorre “*on site*” no caso do tratamento se realizar na área contaminada ou nas suas proximidades. Quando o material contaminado é tratado em local distinto, após escavação e transporte, designa-se como tratamento “*off site*”. Os tratamentos podem ser divididos em: biológicos, físico-químicos e térmicos.

O tratamento “*ex situ*” é um processo em que se recorre à escavação, tornando-se um processo caro devido à mobilização de equipamentos, custo de transporte e reconstrução da área escavada, além de aumentar o risco de disposição e dispersão do contaminante enquanto manuseado.

Existem várias tecnologias para remediação de locais contaminados, sendo que, durante a execução da etapa de caracterização, deve ser selecionada a mais adequada para o local e o contaminante.

Um processo ideal de remediação de um determinado subsolo contaminado deve:

- remover todos os contaminantes do solo.
- evitar a migração de contaminantes.
- levar a percentagem de contaminação do ambiente a índices aceitáveis.
- produzir um efluente limpo.

Segundo a U.S. Naval Facilities Engineering Service Center (NFESC, 1998) a tecnologia de dessorção térmica consiste fundamentalmente de um processo dividido em dois passos como ilustrado na Figura 2. No passo 1, o calor é aplicado ao material contaminado para volatilizar os contaminantes dentro de uma corrente de gás, que no passo 2 é tratado para conseguir os requerimentos regulamentares antes da sua descarga ao ambiente. Uma variedade de tecnologias de tratamentos de gases é usada para coletar, condensar ou destruir esses gases volatilizados.

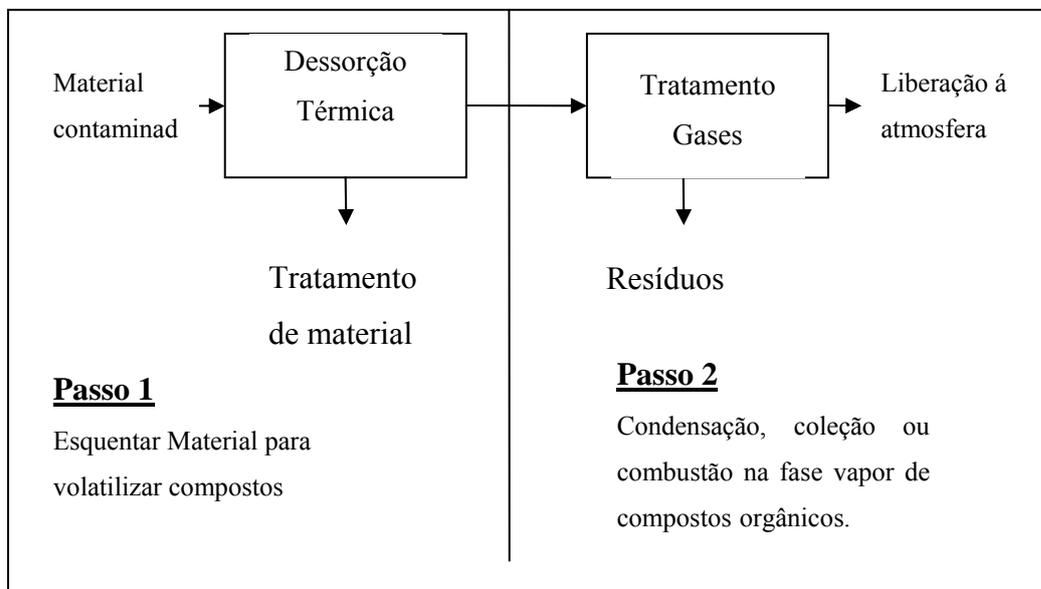


Figura 2 - Processo de Dessorção Térmica (NFESC, 1998).

A dessorção térmica é fundamentalmente um processo de separação física induzida por meio de calor. Os contaminantes são vaporizados de uma matriz sólida e são transferidos dentro de uma corrente de gás para onde eles podem ser mais facilmente manejados, passo 2. Opções usadas para manejar ou tratar os contaminantes removidos podem consistir de condensação, coleta ou combustão. Para as primeiras duas opções, condensação ou coleta, os contaminantes são tratados *off site* algumas vezes subsequente ao passo 1. Para a terceira opção, combustão, o tratamento ocorre, imediatamente depois dos gases sair do passo 1 do processo.

A técnica de dessorção térmica *in situ*, ilustrada na Figura 3, baseia-se no aquecimento direto do solo em seu local de origem através da aplicação de cobertores térmicos ou de bastonetes térmicos, com a finalidade de remover os contaminantes do solo sem a necessidade de escavá-lo ou destruir suas propriedades físico-químicas. Os bastonetes térmicos utilizam a energia elétrica para aquecer o solo através de uma resistência, criando uma fonte de vapor (obtido pela umidade contida no solo). Os cobertores térmicos consistem de seções de caixa de aço, as quais contêm uma resistência (fonte de aquecimento). Estas caixas de aço são colocadas na superfície do terreno.

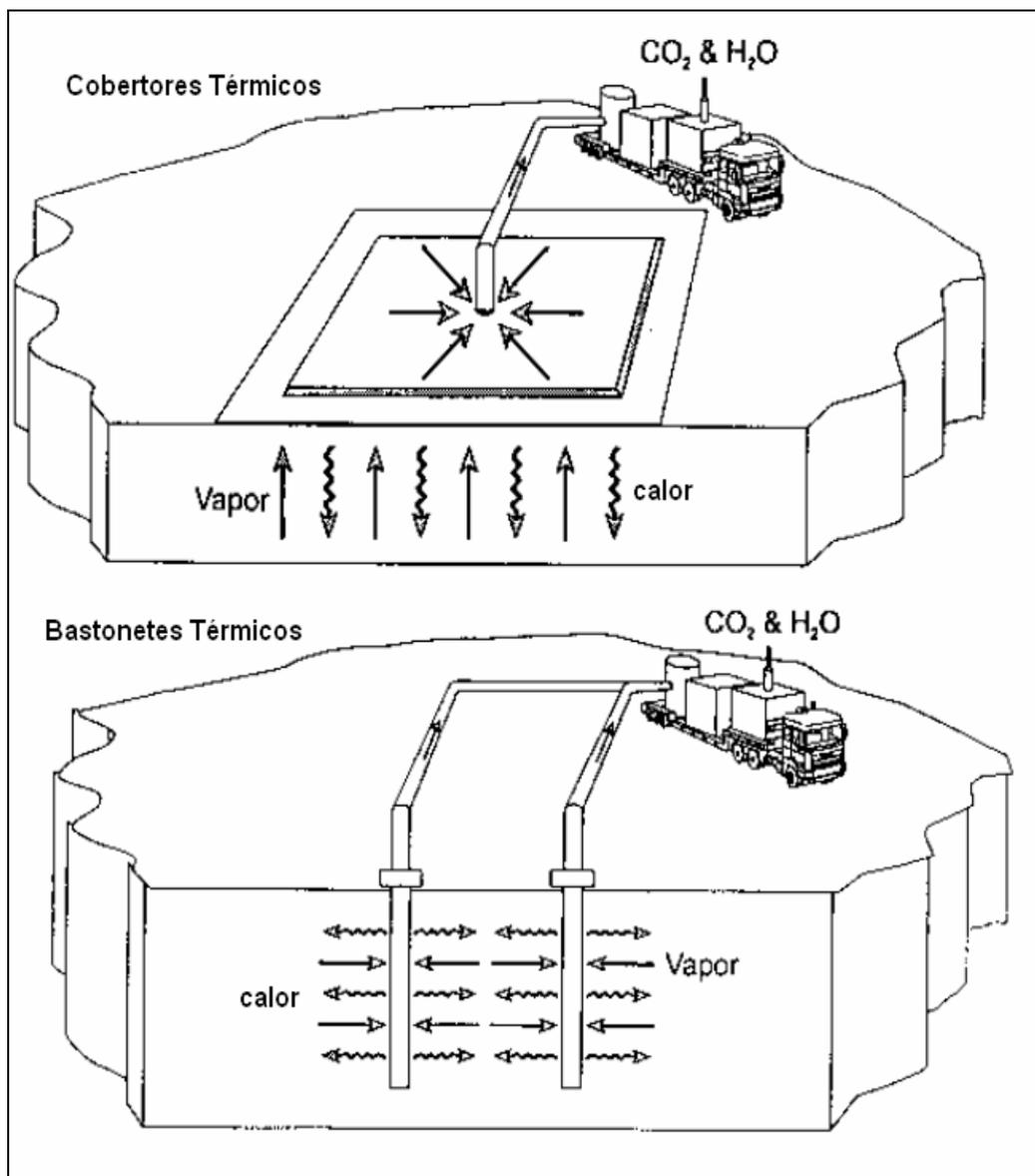


Figura 3 - Dessorção Térmica *in situ* (Stegemeier e Vinegar, 2001).

Os processos de remediação térmica são efetivos devido a vários fatores, incluindo:

- aumento da volatilidade dos contaminantes
- rápida transferência de massa
- rápida evaporação e difusão
- permite o aquecimento de solos de baixa permeabilidade
- acelera as reações químicas

A tecnologia de tratamento através de dessorção térmica é um processo diferente do tratamento por incineração. Na dessorção térmica utiliza-se do

aquecimento para se separar fisicamente o contaminante do solo, sendo o ar contaminado extraído do maciço e tratado *a posteriori*. As vantagens da dessorção térmica em relação ao método tradicional de incineração abrangem três fatores importantes: custo, reutilização do solo e gasto energético.

A composição do solo e o tratamento de temperatura influenciam fortemente na quantidade e composição dos componentes voláteis gerados durante o tratamento térmico (Piña e et. al., 2002).

2.3.2. Tecnologias In situ – Ex situ

Segundo o relatório anual de tratamento de tecnologias para a limpeza de terrenos EPA – 2004, as tecnologias para fontes de controle *in situ* são as aplicações em que o meio contaminado é tratado ou removido, sem escavação, bombeado, ou outros modos de movimentação do médio contaminante para a superfície. A implementação de tecnologias *ex-situ* requerem escavação, dragagem, ou outros processos para remover os meios contaminados antes do tratamento *on site* ou *off site*.

Segundo o relatório de EPA (2004), 863 tecnologias de tratamento foram selecionadas para fonte de controle. Destas, 42% foram tecnologias *in situ* e 58% foram tecnologias *ex situ*.

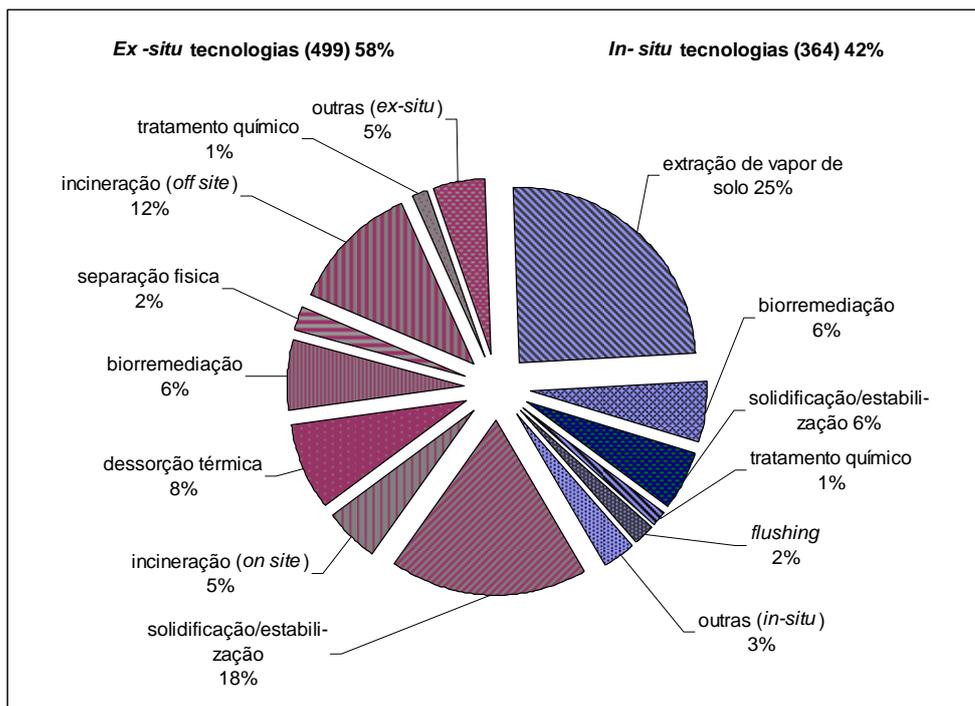


Figura 4 - Ações de remediação: projetos de controle de tratamentos (1982 – 2002).

Conforme ilustra a Figura 4, a extração de vapor de solo (213 projetos, 25%), a bioremediação (48 projetos, 6%) e a solidificação/estabilização (48 projetos, 6%) são as mais comuns tecnologias *in situ*, juntas representam 85% de todas as fontes de projetos de tratamento *in situ*. As outras tecnologias *in situ* (27 projetos, 3%) são tratamentos térmicos *In situ*, extração multifase, fitorremediação, vitrificação e separação elétrica.

As mais comuns tecnologias *ex situ* são a solidificação/estabilização (157 projetos, 18%), a incineração (147 projetos, 17%), a dessorção térmica (69 projetos, 8%), e a bioremediação (54 projetos, 6%). Estas tecnologias juntas representam 86% das fontes de tratamentos de projetos *ex situ*. As outras tecnologias *Ex situ* (42 projetos, 5%) são a extração de vapor de solos, a neutralização, a lavagem de solos, a aeração mecânica de solo, a extração de solvente, a fitorremediação e a vitrificação.

2.3.2.1. Dessorção Térmica Ex Situ

O tratamento térmico *ex situ* geralmente envolve a destruição ou remoção de contaminantes através de sua exposição a elevadas temperaturas em células de

tratamento, câmaras de combustão ou outros meios usados para conter o meio contaminado durante o processo de remediação. As principais vantagens dos tratamentos *ex situ* é que eles geralmente requerem períodos curtos de tempo, e há mais certeza acerca da uniformidade do tratamento porque se tem a habilidade de proteger, homogeneizar e mesclar continuamente o meio contaminado; embora, os processos *ex situ* requerem escavação de solos, o que incrementa o custo e engenharia para o equipamento, permitindo e tratando materiais estabelecendo trabalhos seguros. (EPA, 2007).

Na desorção térmica *ex situ*, o material contaminado é escavado e transportado para uma unidade fixa ou móvel de desorção térmica, como o *Rotary Dryer* e o *Thermal Screw* (EPA, 1999).

Os *rotary dryer* são cilindros horizontais que podem ser aquecidos direta ou indiretamente. O *dryer* normalmente é inclinado e gira a uma velocidade constante. Para as unidades *thermal screw*, transportador de parafuso sem fim ou espirais vazados são usados para transportar o meio através de uma câmara fechada. Óleo ou vapor quente circula através do espiral para indiretamente aquecer o meio (EPA, 2007).

Todo sistema de dessorção térmica requer tratamento para remover materiais particulados e contaminantes. Os materiais particulados são removidos por um equipamento de remoção convencional, como os filtros têxteis. Os contaminantes são removidos através da condensação seguida pela adsorção de carbono, ou são destruídos em uma câmara de combustão secundária ou oxidizador catalítico. A maioria destas unidades é transportável (EPA, 2007). Na Figura 5 se amostra uma aplicação da dessorção térmica *ex situ* na remediação de solos. A remediação *on site* foi para tratar 20.000 toneladas de solo contaminado com PCB em Tanapag - Saipan, a técnica utilizada foi o sistema indireto de dessorção térmica (ITD). O solo foi tratado com um *rotary dry* de aquecimento indireto.



Figura 5 - Dessorção térmica *Ex-Situ* – Tanapag, Saipan (Stegemeier & Vinegar, 2001).

Três tipos de dessorção térmica são disponíveis (EPA, *op. cit.*):

1. *Queima direta*: uma chama é aplicada diretamente sobre a superfície do meio contaminado. O propósito principal da chama é a dessorção dos contaminantes do solo ainda que alguns contaminantes possam ser termicamente oxidados.
2. *Queima indireta*: O *Rotary Dryer* aquece o fluxo de ar que, por contato direto, realiza a dessorção da água e contaminantes orgânicos do solo. A aeração térmica de baixa temperatura (LTTA) é um bom exemplo de um sistema de queima indireta que foi usada para remover do solo os compostos da família do 1,1-Tricloro-2,2-bis (4-clorofenil)-etano (DDT).
3. *Aquecimento indireto*: um *Rotary Dryer* externo volatiliza água e orgânicos do meio contaminado para dentro de um transportador inerte de fluxo de gás. O transportador de gás é mais tarde tratado para remover ou recuperar os contaminantes. O sistema de dessorção térmica *XTRAX* é um processo de dessorção de aquecimento direto seguido por um tratamento de gás, que removeu 99% de PCB de um solo contaminado.

Baseado na temperatura de operação do sistema de desorção térmica, o processo pode ser dividido em dois grupos: *High Temperature Thermal Desorption* (HTTD) e *Low Temperature Thermal Desorption* (LTTD).

O sistema HTTD, apresentado na Figura 6, aquece o meio contaminado a temperaturas que variam de 320 a 560°C. O sistema normalmente é utilizado em combinação com a incineração, solidificação/estabilização, decloração, dependendo de condições específicas do local. A tecnologia tem provado que pode produzir um nível de concentração final de contaminante abaixo de 5 mg/kg. Quando o solo experimenta altas temperaturas de dessorção pode perder muitas de suas propriedades naturais.

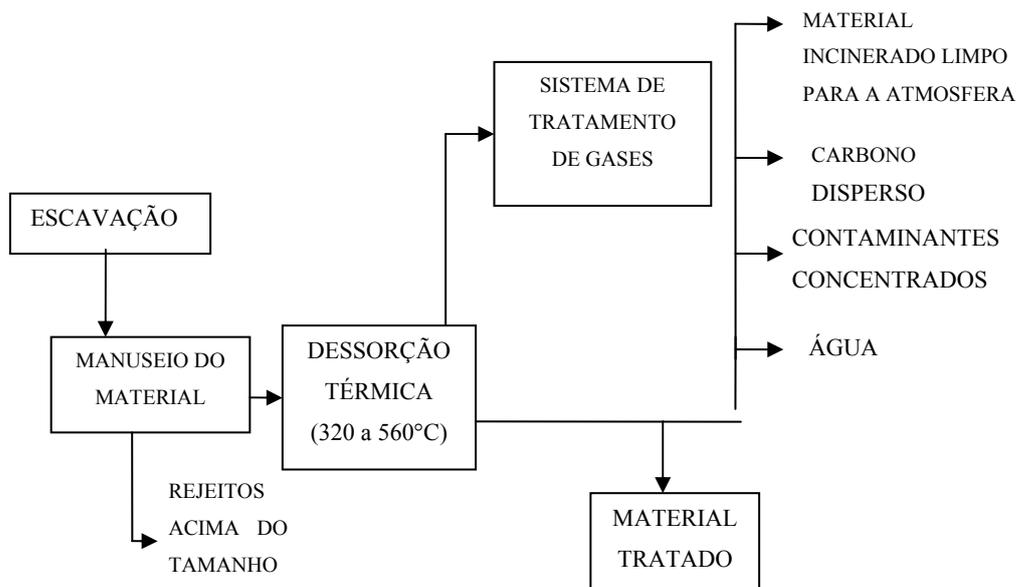


Figura 6 - Estrutura do sistema de dessorção térmica HTTD (EPA, 1999).

O grupo alvo do sistema HTTD são os compostos orgânicos semivoláteis (SVOCs), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), bifenilas policloradas (PCBs) e pesticidas.

Entretanto, compostos orgânicos voláteis (VOCs) e combustíveis podem ser tratados, mas o tratamento pode ter um custo efetivo menor. Metais voláteis podem ser removidos pelo sistema HTTD. A presença do cloro pode afetar a volatilização de alguns metais, como o chumbo. O processo é aplicável na separação de orgânicos de resíduos de refinaria, resíduos de alcatrão de carvão, resíduos de serralhas, solos contaminados com creosoto, solos contaminados por hidrocarbonetos, resíduos processados de borracha sintética, pesticidas e pinturas.

Em um sistema LTTD, esquematizada na Figura 7, os resíduos são aquecidos a temperaturas que variam de 90 a 320°C. Este sistema tem demonstrado sucesso para a remediação de hidrocarbonetos de petróleo em todos os tipos de solo. A eficiência na destruição dos contaminantes é maior que 95%. O solo descontaminado retém suas características físicas, ao menos que os contaminantes sejam aquecidos a uma taxa de temperaturas muito altas, os componentes orgânicos do solo não são danificados, qualquer capacidade do solo tratado retém a habilidade para suportar futuras atividades biológicas.

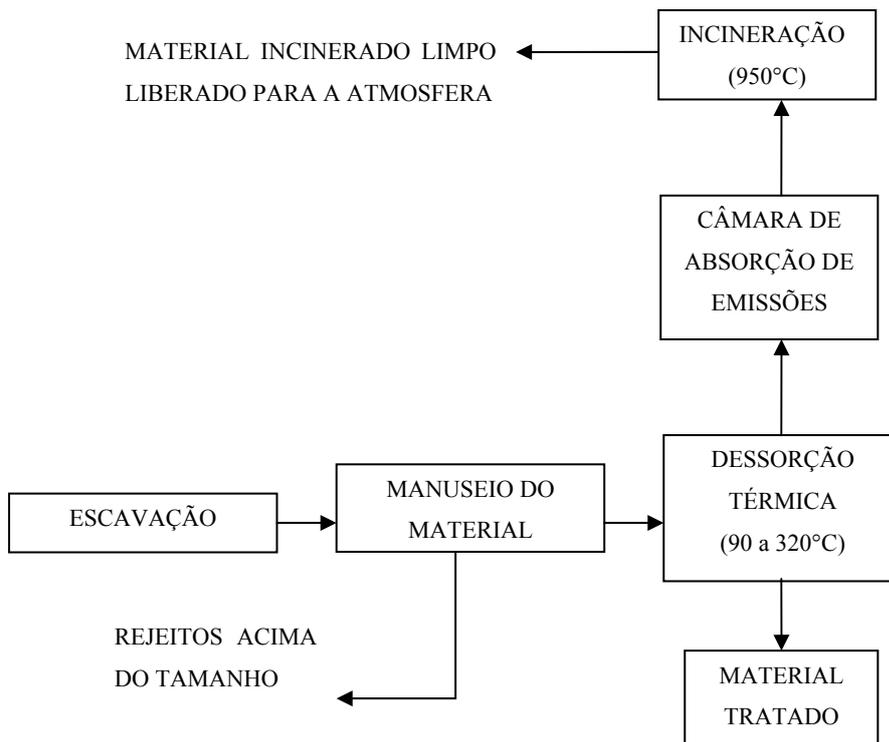


Figura 7 - Estrutura do sistema de dessorção térmica LTTD (EPA, 1999)

Os grupos de contaminantes alvo do sistema LTTD são compostos orgânicos voláteis (VOCs) não-halogenados e combustíveis, podendo também ser utilizada para tratar compostos orgânicos semivoláteis (SVOCs) com efetividade reduzida.

2.3.2.2. Sistema de Captação e tratamento de gases

No sistema de dessorção térmica apresentado pela Terratherm (1997), os contaminantes são vaporizados pelo aquecimento do solo com um grande cobertor

térmico. Os vapores contaminados são então expelidos do solo mediante a aplicação de vácuo. A maioria dos contaminantes é destruída no solo extremamente quente perto da fonte de calor. Os vapores restantes são conduzidos a um sistema de tratamento de gases que inclui um oxidador térmico e filtros de carvão ativado. Um sistema de captação e tratamento de gases foi proposto por Stegemeier & Vinegar (1995). O esquema deste sistema é apresentado na Figura 8.

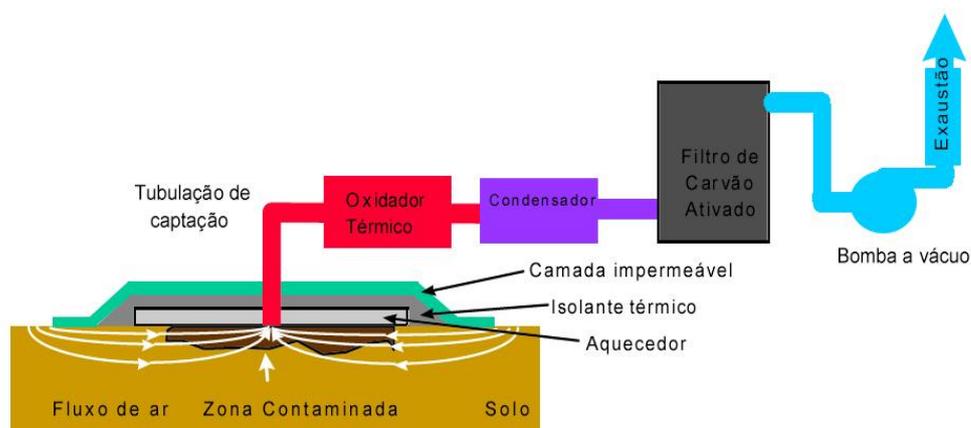


Figura 8 - Sistema de dessorção térmica, (TerraTherm, 1997).

Durante a dessorção térmica quando o solo é aquecido, compostos orgânicos Voláteis (VOCs) e semi-voláteis (SVOCs) são vaporizados e/ou destruídos por diversos mecanismos que vêm a atuar devido aos incrementos de temperatura do solo, como: evaporação, ebulição, destilação de vapor, oxidação e pirólise (Baker & Kuhlman, 2002).

Muitos contaminantes são destruídos no solo antes de chegar à superfície devido às elevadas temperaturas. Os gases produzidos são extraídos através de bombeamento para seu tratamento. No sistema de tratamento de gases o oxidador térmico destrói os contaminantes presentes nas emissões gasosas por oxidação, pirólise ou hidrólise, dependendo do conteúdo de oxigênio. Baker e Kulman (2002) apresentam um resumo dos mecanismos de destruição para hidrocarbonetos e TCE.

Hidrocarbonetos:

- Pirólise $C_{20}H_{12} \rightarrow 2OC(\text{coque}) + 6H_2$
- Hidrólise $C_{20}H_{12} + 40H_2O \rightarrow 20CO_2 + 46H_2$
 $C(\text{coque}) + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$
- Oxidação $C(\text{coque}) + O_2 \rightarrow CO_2$
 $H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$
 $C_{20}H_{12} + 23O_2 \rightarrow 20CO_2 + 6H_2O$

TCE:

- Pirólise $C_2HCl_3 + H_2O + 1.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3HCl$
- Oxidação $C_2HCl_3 + 4H_2O \rightarrow 2CO_2 + 3HCl + 3H_2$

Quando PCBs e hidrocarbonetos são aquecidos, o ácido hidroclorídrico é produzido mediante oxidação, como mostra a Figura 9. Estes ácidos são estabilizados rapidamente por precipitação com elementos naturais do solo como o ferro. Por exemplo, o ácido hidroclorídrico e o ferro formarão o cloreto de ferro, que é inofensivo e muito estável.

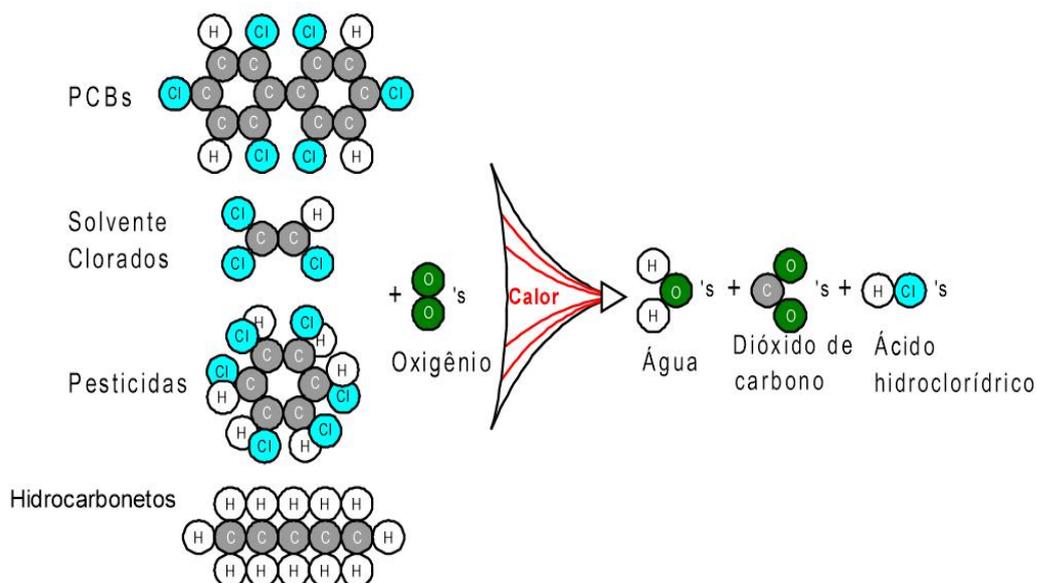


Figura 9 - Química do tratamento por oxidação (TerraTherm, 1997).

As câmaras de carvão ativado captam os hidrocarbonetos gasosos, incluindo vapores de óleo, minimizando os odores exalados. O carvão ativado usado para adsorção dos contaminantes presente nas emissões e pode ser reutilizado.

2.3.2.3.

Aplicabilidade e custos do processo de dessorção térmica.

O processo de dessorção térmica é capaz do tratamento de vários materiais, incluindo solos, sedimentos e lamas, contaminados com um amplo intervalo de contaminantes orgânicos.

Petróleo, compostos orgânicos voláteis (VOCs), compostos semi-voláteis (SVOCs), pesticidas, e outros compostos com pontos de ebulição acima de 315°C são tipicamente processados através de unidades de dessorção. Contaminantes com ponto de ebulição acima de 315°C, como os bifenilas policloradas (PCBs), dioxinas e furanos, podem ser tratados com sistemas de alta temperatura. A dessorção térmica não é efetiva para o tratamento de compostos corrosivos orgânicos (aminas, poliaminas, alquilfenoles) e reativos oxidantes (permanganatos, persulfatos, peróxidos) e redutores (arsênico, cádmio, cromo). A Tabela 9 apresenta as efetividades da dessorção térmica de vários contaminantes.

Tabela 9 - Efetividade da dessorção térmica em grupos gerais de contaminantes para solos, sedimentos, lamas e filter cake (NAVAL FACILITIES ENGINEERING SERVICE CENTER, 1998).

Grupos de Contaminantes		Efetividade			
		Solo	Lama	Sedimento	Filter Cake*
Orgânicos	Voláteis halogenados	1	2	2	1
	Semivoláteis halogenados	1	2	2	1
	Voláteis não halogenados	1	2	2	1
	Semivoláteis não halogenados	1	2	2	1
	PCBCs	1	2	1	2
	Pesticidas	1	2	2	2
	Dioxinas/Furanos	1	2	2	2
	Cianetos orgânicos	2	2	2	2
	Corrosivos orgânicos	3	3	3	3
	Inorgânicos	Metais voláteis	1	2	2
Metais não voláteis		3	3	3	3
Amiantos		3	3	3	3
Metais radiativos		3	3	3	3
Corrosivos inorgânicos		3	3	3	3
Cianetos inorgânicos		3	3	3	3
Reativos	Oxidantes	3	3	3	3
	Redutores	3	3	3	3

* Material proveniente da mistura de rocha e petróleo quando da realização da perfuração de um poço de petróleo

- 1- Efetividade demonstrada: Exitosa tratabilidade a algumas escalas completas.
- 2- Potencial efetividade: opinião do experto que trabalhara a tecnologia.
- 3- Não expectativa de efetividade.

Source: U.S. EPA, 1991, EPA/540/2-91/008.

Segundo a EPA (1999), a aplicação da dessorção térmica nos Estados Unidos e na Inglaterra tem-se tornado sinônimo de economia de tempo e de dinheiro, aliada à eficiência:

- em Albany – Georgia – EUA, 42000 toneladas de solo contaminado com pesticidas em concentrações maiores que 1000 ppm foi tratada com dessorção térmica a 515°C durante 15 min, obtendo uma eficiência de remoção maior que 98%.
- em Fort Richardson – Alasca – EUA, solos com concentrações de até 1000 ppm foram tratados com dessorção térmica com extração de vapor a vácuo, onde áreas de 3800 a 5300 m³ foram tratadas num período de 4 a 8 semanas.
- em Anchorage – Alasca – EUA, o tratamento de 226,80 kg de contaminantes em 2300 toneladas de solo por dessorção térmica, onde restou apenas 2,7 kg de contaminantes na área depois de 6 semanas de aplicação. Com um custo de US\$ 38 a 110/m³ (US\$ 10 a 50 menos do que os métodos tradicionais).
- em Liverpool – UK, solos com concentração média de PCBs de 120 mg/kg e pontos marcantes com 1300 ppm foram tratados com dessorção térmica a 450°C, reduzindo os níveis de contaminação a menos de 0,5 ppm.

Os custos da dessorção térmica são específicos e dependem das aplicações do tipo e escala do sistema, da quantidade do solo no lugar, das propriedades geotécnicas, dos requerimentos regulatórios, do conteúdo de umidade do solo, da concentração do contaminante e do critério de limpeza do solo.

A seguinte análise de custo foi desenvolvida utilizando o software Remedial Action Cost Engineering and Requirements (RACER), considerando a quantidade de material tratado e as características específicas do lugar. A Tabela 10 representa o custo estimado na aplicação da tecnologia de dessorção térmica a áreas de diversos tamanhos e complexidade (FRTR, 2009).

Tabela 10 - Custo estimado na aplicação da dessorção térmica *ex situ* (FRTR, 2009)

TECNOLOGIA	Dessorção Térmica			
	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D
PARÂMETROS CONSIDERADOS				
	Área pequena		Área grande	
	Fácil	Difícil	Fácil	Difícil
Ação de Remediação:				
Tipo de meio	Solo	Solo	Solo	Solo
Contaminante	VOCs/ combustíveis	SVOCs	VOCs/ combustíveis	SVOCs
Implementação	<i>Ex Situ</i>	<i>Ex Situ</i>	<i>Ex Situ</i>	<i>Ex Situ</i>
Definição do Sistema				
Volume do resíduo (Tons)	10 000	10 000	300 000	300 000
Tipo de Sistema	VOCs/ combustíveis	SVOCs	VOCs/ combustíveis	SVOCs
Custos Adicionais				
Projeto remediação	\$26,568	\$73,800	\$335,792	\$730,623
Custo Dessorção Térmica	\$590,402	\$1 845,009	\$9 594,049	\$24 354,104
Custo total sinalado	\$616,970	\$1 918,809	\$9 929,841	\$25 084,727
CUSTO POR METRO CÚBICO	\$81	\$252	\$44	\$110

2.4. Aquecimento do solo

O fluxo de calor em solos é extremamente importante com relação à poluição térmica, à permanente estabilização do meio poroso por aquecimento, à transmissão de eletricidade pelo subsolo e à remediação de áreas degradadas utilizando o aquecimento do subsolo.

Será dado um tratamento paralelo para fluxo de água e de calor, para uma melhor visualização dos efeitos térmicos com base no estudo de fluxo de água através dos solos.

Os fluidos e o calor fluem através do solo, sempre que o processo do fluxo não modifique o estado do solo, para cada razão de fluxo J_i , tendo uma relação linear com o correspondente gradiente, X_i , de acordo com:

$$J_i = L_{ii} \cdot X_i \quad (2)$$

Onde: L_{ii} – coeficiente de condutividade para um dado fluxo.

A equação 2 pode ser escrita da seguinte maneira para um específico fluxo:

$$\text{Fluxo de água} \quad q_h = k \cdot i_h \cdot A \quad \text{Lei de Darcy} \quad (3)$$

Fluxo de calor $q_t = \lambda \cdot i_t \cdot A$ Lei de Fourier
(4)

Onde: q_h – fluxo de água,
 q_t – fluxo de calor,
 k – condutividade hidráulica,
 λ – condutividade térmica,
 i_h – gradiente hidráulico,
 i_t – gradiente térmico.

A Tabela 11 mostra as analogias entre os fluxos de água e calor. Como as vazões e os gradientes são correlacionados linearmente, o tratamento matemático para cada tipo de fluxo é o mesmo, e as soluções para o fluxo de água podem ser usadas para fluxo de calor utilizando-se valores apropriados e condições de contorno representativas.

Tabela 11 - Analogias de Fluxo (Mitchell, 1993).

	Fluido	Calor
Potencial	Carga Total h (m)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Estocagem	Volume do fluido V (m^3/m^3)	Energia Térmica u (J/m^3)
Condutividade	Condutividade hidráulica k_h (m/s)	Condutividade térmica λ ($\text{W}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$)
Vazão	q_h (m^3/s)	q_t (J/s)
Gradiente	$i_h = -\frac{\partial h}{\partial x}$ (m/m)	$i_t = -\frac{\partial T}{\partial x}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)
Condução	Lei de Darcy	Lei de Fourier
Capacitância	Coeficiente de variação de volume $M = \frac{dV}{dh} = \frac{\gamma_w a_v}{1+e} = \frac{k_h}{c_v}$	Aquecimento volumétrico C ($\text{J}/^{\circ}\text{C}/\text{m}^3$) $C = \frac{dQ}{dT}$
Continuidade	$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla q_h = 0$	$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla q_t = 0$
Regime estacionário	$\nabla^2 q_h = 0$	$\nabla^2 q_t = 0$
Difusão	$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k_h}{M} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ $\left(\frac{k}{M} = c_v\right)$	$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ $\left(\frac{k}{C} = a\right)$

2.4.1. Propriedades Térmicas dos materiais

Condutividade Térmica de solos

O fluxo de calor através de solos é quase inteiramente por condução, sendo a radiação de pouca importância e a convecção só é importante quando há um fluxo de água ou ar. A condutividade térmica é a propriedade essencial que controla o fluxo de calor. A condutividade do fluxo de calor é realizada primariamente através da fase sólida de uma massa de solo (Mitchell, 1993). Valores de condutividade térmica em diferentes materiais são listados na Tabela 12. A faixa de valores de condutividade térmica para solos finos, tais como: siltes,

argilas siltosas, siltes argilosos e argilas é de 0,25 a 2,5 W/m.°K de acordo com Mitchell (1993).

Tabela 12 - Propriedades Térmicas de Materiais distintos (modificado de Mitchell, 1993).

Condutividade Térmica	Material	W / m / °K
	Ar	0,024
	Água	0,60
	Gelo	2,25
	Granito	2,76
	Folhelho	1,56
	Cobre	389
	Valores médios de solos	0,25 – 2,9 (~ 1,7)
	Quartzo	8,4
	Matéria Orgânica	0,25
Calor específico	Material	cal / g °C
	Quartzo	0,175
	Valores médios de solos	0,175
	Matéria Orgânica	0,46
	Água	1,00
	Ar	0,24
Capacidade de Aquecimento Volumétrico	Material	Cal / cm³ °C
	Água	1,0
	Valores médios de solos	0,46
	Quartzo	0,46
	Matéria Orgânica	0,60
	Ar	0,00029
Calor de Fusão	Água	333 kJ / kg
	Solo	$3,4 \times 10^4 \left(\frac{w}{100} \right) \cdot \gamma_d$ kJ / m ³
Calor de Vaporização	Água	2,26 MJ / kg
	Solo	$230 \left(\frac{w}{100} \right) \cdot \gamma_d$ MJ/m ³

Onde: γ_d – peso específico seco e w – umidade

Devido a condutividade térmica da água ser maior do que a condutividade térmica do ar, um solo úmido tem uma maior condutividade térmica que um solo seco.

Os seguintes fatores são conhecidos por influenciar na resistividade térmica (inverso da condutividade) de solos não saturados, segundo Brandon e Mitchell (1989).

Mineralogia - depende dos minerais constituintes (feldspato e quartzo apresentam uma maior condutividade térmica, conseqüentemente areias apresentam maiores condutividades térmicas)

Peso específico seco – quanto maior, maior a condutividade térmica, relacionado com o contato entre os grãos.

Distribuição granulométrica – solos bem graduados conduzem o calor melhor que solos uniformes (relação com o índice de vazios).

Quantidade de água na compactação - solos compactados úmidos e posteriormente secados para uma baixa umidade apresentam maior condutividade térmica que aqueles compactados a baixa umidade.

Tempo – areias com alta porcentagem de sílica, carbonatos, ou outros materiais que podem desenvolver cimentação que podem apresentar um incremento da condutividade térmica com o tempo.

Temperatura - todos os minerais cristalinos no solo mostram um decréscimo na condutividade térmica com um aumento da temperatura. Entretanto a condutividade térmica da água aumenta significativamente com o aumento de temperatura, e a condutividade térmica de poros saturados de ar aumenta com o aumento de temperatura.

Capacidade de aquecimento volumétrico (C)

A capacidade de aquecimento volumétrico (C) por unidade de volume de um solo é a energia de calor necessária para mudar a temperatura de seu volume unitário por 1°C. Este coeficiente é definido como o produto do calor específico c (cal /g°C) e da massa específica seca ρ (g/cm³).

$$C = c \cdot \rho \quad (5)$$

As frações de volume dos componentes do sólido, água e ar são apresentados como, X_s , X_w e X_a respectivamente, logo:

$$C = X_s C_s + X_w C_w + X_a C_a \quad (6)$$

Onde:

C_s , C_w e C_a são as respectivas capacidades de aquecimento por unidade de volume dos sólidos, água e ar.

A capacidade de aquecimento volumétrico para solos pode ser estimada de acordo com Sangre (1968):

Capacidade volumétrica para um solo descongelado

$$C_U = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left(0.18 + 1.0 \frac{w}{100} \right) C_w \quad (7)$$

Capacidade volumétrica para um solo congelado

$$C_F = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left(0.18 + 0.5 \frac{w}{100} \right) C_w \quad (8)$$

Onde:

γ_d = peso específico seco

w = umidade gravimétrica em porcentagem

γ_w = peso específico da água.

2.4.2. Fenômenos de Transferência de calor

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um material ou entre materiais diferentes, deve ocorrer transferência de calor. (Incropera e de Witt, 2002).

Para o cálculo da distribuição da temperatura em e ao redor de estruturas situadas no terreno normalmente utiliza-se equações diferenciais ordinárias para representar a condução de calor, junto com condições de contorno. O transporte de calor em materiais porosos e úmidos pode, sem embargo, ser influenciado por

um número de diferentes mecanismos, em adição à condução de calor (Johansen, 1975).

Os diferentes mecanismos que podem contribuir para o transporte em um material de solo úmido são: a radiação, a condução e a convecção.

Modos de transferência de calor

Distinguem-se três formas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Tais formas podem se dar isoladamente, mas principalmente ocorrem simultaneamente.

A transferência de calor por condução é o mecanismo predominante sob algumas condições. Convecção e radiação geralmente têm efeitos relativamente pequenos ou negligenciáveis, mas podem ter uma influência notável em certas situações.

Condução refere-se à transferência de calor que irá ocorrer em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, quando existe um gradiente de temperatura. A condução ocorre em todos os constituintes do solo; na parte sólida, na água e no ar dos poros.

A condução envolve a transferência de calor por interações de átomos e moléculas de um material através do qual o calor está sendo transferido.

Para a condução de calor, a equação da taxa de transferência é conhecida como a Lei de Fourier, conforme ilustra a Figura 10.

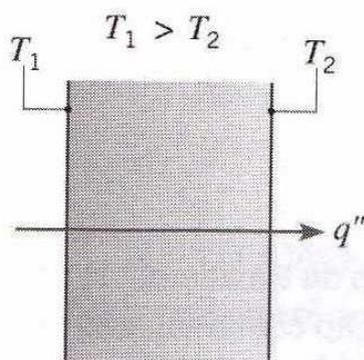


Figura 10 - Condução através de um sólido ou fluido estacionário (Incropera, 2002).

Convecção refere-se à transferência de calor que irá ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles se encontram em temperaturas diferentes.

A transferência de calor por convecção ocorre tanto em função do movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido no interior da camada limite, como ilustra a Figura 11.

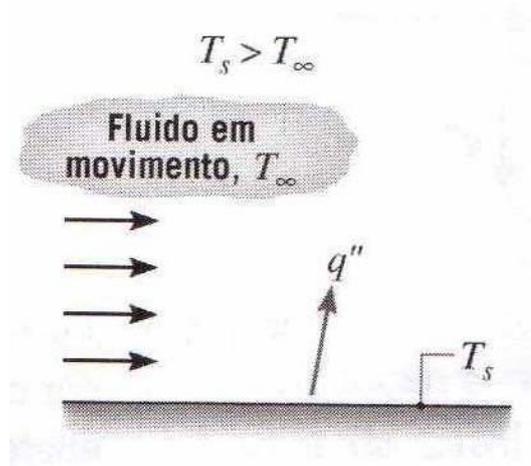


Figura 11 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento (Incropera, 2002).

Radiação, ou transferência de calor radiante, refere-se à transferência de calor entre duas superfícies, na ausência de um meio que se interpunha entre as duas, conforme ilustra a Figura 12.

Radiação térmica é a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura finita. As emissões também podem ocorrer a partir de líquidos e gases. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas, sem requerer de um meio material para a transferência de calor. A transferência por radiação ocorre de forma mais eficiente no vácuo.

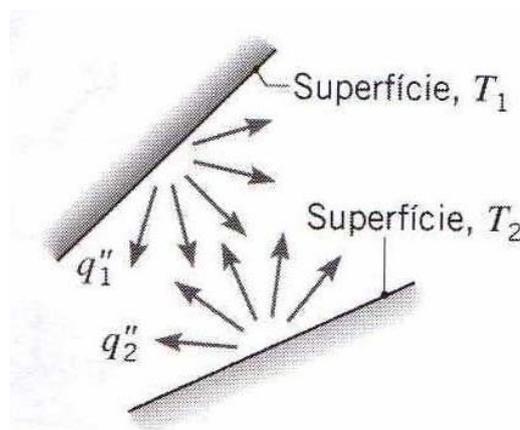


Figura 12 - Transferência líquida de calor por radiação entre duas superfícies (Incropera, 2002).