

## 2 Revisão bibliográfica

O presente capítulo apresenta uma breve descrição do processo de dessorção térmica, detalhando as suas vantagens e fazendo uma abordagem do fluxo de calor em meios porosos.

### 2.1. Do processo térmico de remediação e da escolha da técnica mais adequada de descontaminação

A transmissão de calor de um corpo quente para um corpo frio é um fenômeno físico que o homem percebeu desde a mais remota época. De acordo com Araújo (1970), o controle, o manejo e o aproveitamento prático-econômico deste fenômeno são assuntos relativamente recentes, interessando cientistas, matemáticos e engenheiros de várias especialidades.

De fato, o uso de processos térmicos, vem se difundindo nos últimos anos na engenharia ambiental como uma alternativa eficiente e, em alguns casos, a solução mais econômica e rápida para a remediação de áreas contaminadas.

O processo ideal de remediação de áreas contaminadas deve atingir as seguintes metas:

- Levar o nível de contaminação do ambiente a índices aceitáveis;
- Evitar a migração de contaminantes e
- Produzir um efluente limpo.

Porém, é necessário, antes da escolha de qualquer técnica de remediação a ser utilizada, fazer um levantamento detalhado das condições hidrogeológicas do local e a devida caracterização dos contaminantes presentes na área. Várias opções de técnicas de controle e remediação podem ser selecionadas e combinadas para se ter a remediação do local. A Tabela 1, adaptada de Evans(1991), mostra algumas das técnicas de remediação já empregadas. No entanto, segundo Gusmão (1999), é importante ainda que se

tenha um conhecimento das propriedades de degradação dos contaminantes e sua reatividade de ordem físico-química com o solo.

Tabela 1 - Técnicas para Controle e Remediação de Áreas Contaminadas(Evans, 1991).

Problema do Local	Técnica de remediação								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Volatilização de substâncias químicas no ar		X							
Lançamento de particulados na atmosfera		X							
Produção de poeira por construção pesada ou outras atividades		X							
Escoamento superficial do contaminante	X								
Erosão superficial provocada pela água ou vento	X								
Escoamento superficial do lixiviado	X								
Contato de corpos de água com resíduos	X								
Migração vertical ou horizontal do lixiviado			X				X		
Nível freático próximo à superfície podendo resultar em contaminação da água subterrânea ou interferir com outras técnicas de remediação.			X						
Infiltração de água pluvial no terreno para formação de lixiviado	X		X						
Evidência de migração lateral no subsolo, de metano ou outros gases tóxicos				X					
Materiais dispostos aleatoriamente em superfície (lagoas de rejeitos, pilhas de resíduos, etc.).					X		X	X	
Contaminação de água superficial ou subterrânea através de resíduos líquidos ou pastosos					X		X	X	
Solos contaminados					X		X	X	
Gases perigosos e/ou tóxicos que tenham sido coletados								X	
Sedimentos contaminados					X	X		X	
Contaminação do sistema de distribuição de água									X
Rede de esgoto contaminado									X

(1) Drenagem / controle da água superficial.

(2) Controle de poluição do ar.

(3) Controle do lixiviado e da água subterrânea.

(4) Controle de migração do gás.

(5) Escavação e remoção do resíduo/solo e disposição em aterros.

(6) Remoção e contenção de sedimentos contaminados.

(7) Tratamento *in situ*.

(8) Tratamento direto do resíduo.

(9) Controle de linhas de sistemas sanitários (água e esgoto).

A escolha do método mais adequado, para a remediação de um determinado local, é um processo difícil e requer a avaliação de uma série de fatores, como sugere Wood (1997):

- Aplicabilidade e eficácia;
- Disponibilidade, limitações e custos;
- Categoria de desenvolvimento;
- Impacto potencial ambiental e
- Necessidade operacional de informação e monitoramento.

São encontradas na literatura, publicações e estudos de casos mostrando que o processo de dessorção térmica *in situ* (DTIS) é um método que atende a esses fatores (Beker e Bierschenk, 2001; EPA, 1993; Blanchard e Stamnes, 1997). Esse processo vem sendo utilizado e aperfeiçoado nos últimos anos, se colocando como uma alternativa eficiente para limpeza de áreas contaminadas.

## 2.2.

### A técnica de dessorção térmica e suas aplicações

A dessorção térmica é um método de remediação que separa fisicamente os contaminantes voláteis e alguns semivoláteis do solo, lama e sedimento, por aquecimento direto em temperaturas altas por um período de tempo suficiente para volatilizar a água e os contaminantes sem oxidá-los para posterior tratamento dos gases (EPA, 1995).

De acordo com Hansen *et al.* (1998), a técnica de dessorção térmica tem se mostrado eficiente, estando o sucesso da técnica diretamente associada as temperaturas atingidas pelo meio contaminado e pelo tempo de aplicação da temperatura no meio. Segundo Hansen (*op. cit.*), para meios contaminados por PCB's e HPA's tem-se reduzido, a níveis residuais, esses contaminantes para temperatura na faixa de 300°C a 400°C.

Segundo a Terratherm (2003), a técnica de dessorção térmica *in situ* (DTIS) utiliza a transmissão direta de calor para remoção de substâncias

químicas perigosas de meios sólidos, como rocha, solos e lamas. É um método de aplicação rápida e tem mostrado eficiência na limpeza de áreas afetadas por uma grande variedade de contaminantes voláteis e semi-voláteis, como:

- Hidrocarbonetos;
- DNAPL's;
- LNAPL's;
- PCB's;
- Pesticidas;
- Dioxinas;
- Solventes clorados;
- Resíduos de explosivos e
- Mercúrio.

A eficácia da técnica de dessorção térmica é primeiramente uma função do volume de solo aquecido durante o tratamento e o tempo de residência no meio contaminado. De acordo com Aines *et al.* (2000), vários são os fatores que afetam a eficiência e/ou aplicação da dessorção térmica *in situ*, incluindo:

- Ponto de ebulição do contaminante;
- Sistema de vácuo;
- Tipo de solo e tamanho efetivo dos grãos (permeabilidade do solo a ser tratado);
- Teor de matéria orgânica;
- Quantidade de metais no solo a ser tratado e
- Grau de mistura solo-contaminante.

Segundo Vinegar *et al.* (1998), a eficácia do método de dessorção térmica, está intimamente ligada em fazer com que os contaminantes possam atingir seus pontos de ebulição e, conseqüentemente, sua pressão de vapor. O aumento da temperatura provoca um aumento da energia cinética média das partículas do líquido, havendo assim um maior número de partículas com energia cinética suficiente para passar da fase líquida à fase gasosa. A ebulição acontece quando a sua pressão de vapor iguala a pressão atmosférica.

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 da técnica de aquecimento (EPA, 1998). O efeito da

temperatura na solubilidade é dependente do composto químico, sendo que normalmente a pressão de vapor cresce com a temperatura (EPA, *op. cit.*). Em geral, quando um composto químico é aquecido, a sua densidade diminui, sendo a sua pressão de vapor aumentada. Paralelamente, sua adsorção na fase sólida ou na matéria orgânica é reduzida e sua difusão molecular na fase aquosa e gasosa aumentada (EPA, *op. cit.*).

A Tabela 2 apresenta algumas propriedades de contaminantes orgânicos, comumente encontrados em áreas contaminadas.

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

Contaminante orgânico	Ponto de ebulição (°C)	Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )	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	1,2444	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 Dicloroetileno	60	1,2649 a 25°C	0,445	800 a 20°C	104,8	580,0
Tricloroetano	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	90,0	485,3
N-Hexano	68,7	0,659	0,300	9,5 a 20°C	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
Tetracloro de carbono	76,8	1,5833 a 25°C	0,908	800 a 20°C	58,3	332,8
2-Butanona (metil-etil cetona)	79,6	0,7994 a 25°C	0,405	26,8	52,6	314,3
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
1,2- Dicloroetano	84	1,257 a 25°C	0,779	8700 a 20°C	40,0	278,6
Tricloroetileno	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	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
Etilbenzeno	136,2	0,8654 a 25°C	0,631	160 a 25° C	6,0	295,7 a 100°C

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

Contaminante orgânico	Ponto de ebulição (°C)	Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (25°C)	Solubilidade em água (mg/L)	Pressão de vapor (mmHg)	
					10°C	50°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
Hexadecano	286,9	0,773	3,032	0,0063	<1	<1
Tricloroetileno		1,314 a 20°C		1100 a 20°C	75,0	
Tetracloroetileno		1,65 a 20°C		140 a 20°C	18,7	
Para - xileno		1,06		190 a 20°C	8,8	
Cloroetano		0,65 a 20°C		5710 a 20°C	5710	
Hexaclorociclo - hexano	65	1,87 a 20°C				

É interessante observar na Tabela 2 que muitos dos compostos perigosos têm pontos de ebulição em torno de 100°C, que é uma temperatura não muito elevada para os padrões de temperatura potenciais dos sistemas de dessorção térmica.

De acordo com Stegemeier e Vinegar (1995), eventualmente, os contaminantes presentes no solo estão misturados a outros contaminantes ou até mesmo dissolvidos em água. Isso faz com que o ponto de ebulição seja diferente do ponto de ebulição do composto em seu estado puro. Segundo Stegemeier e Vinegar (*op. cit.*), uma solução de dois compostos, com pontos de ebulição diferentes, tem ponto de ebulição menor que o maior ponto de ebulição de seus compostos. Em solos muito úmidos, os quais quando submetidos ao processo de dessorção térmica, produz-se muito vapor d'água que retarda o aquecimento do meio levando a um maior consumo de energia. Um ponto importante para esses casos citados por Stegemeier e Vinegar (*op. cit.*) é com respeito a um ponto ideal de umidade para solos potenciais de sofrerem um processo térmico de remediação. Assim, o teor de umidade não deve ser muito elevado, a ponto de fazer com que se demore a atingir a temperatura desejada, nem muito seco, a ponto de ter ponto de ebulição muito elevado, e assim tenha um maior gasto de energia. Com a mistura dos contaminantes em água se reduziria o ponto de ebulição das substâncias nocivas as quais se deseja retirar

do meio, e dessa maneira, com um ponto de ebulição diminuído ter-se-ia um menor gasto de energia e os níveis desejados de contaminantes no solo poderiam ser atingidos mais facilmente.

Nobre (2004) menciona que comumente é associado à descontaminação o termo mobilização de contaminantes. Entretanto não é garantido que mobilizando os contaminantes, principalmente os miscíveis, quando reduzido sua viscosidade com a elevação da temperatura, está se garantindo a descontaminação. Esses podem migrar para outras áreas, e ficarem ainda mais difíceis de serem removidos.

Segundo Stegemeier e Vinegar (1995), o fato de baixar a viscosidade da água e contaminantes pode ter seu aspecto positivo, pois facilita o fluxo e a remoção dos contaminantes. Por outro lado, essa redução da viscosidade facilita o fluxo no material, uma vez que a viscosidade está diretamente relacionada com a permeabilidade. Isto pode fazer com que o contaminante migre para outras áreas antes que esse atinja seu ponto de ebulição, ficando ainda mais longe da fonte aquecedora e dessa forma não ser retirado da área a qual é aplicado o processo de dessorção térmica.

De acordo com Vinegar *et al.* (1998), a pluma de contaminação deve ser bem delimitada antes do início da aplicação da dessorção térmica *in situ*, localizando os contaminantes bem como suas concentrações a diversas profundidades. A Figura 1, adaptada de Vinegar *et al.* (*op. cit.*), exemplifica um caso em uma área, previamente a sua remediação, onde foi determinada para diversas profundidades os níveis de contaminação por PCB.

Esta determinação detalhada apresentada na Figura 1 deve servir de parâmetro para, posteriormente à limpeza da área contaminada, certificar-se do sucesso do método de remediação utilizado, fazendo comparações com investigações ao fim do processo de remediação.

Deve-se também ter um monitoramento de áreas próximas ao local contaminado para onde pode ter havido migração de contaminantes, sugere Vinegar *et al.* (1997).

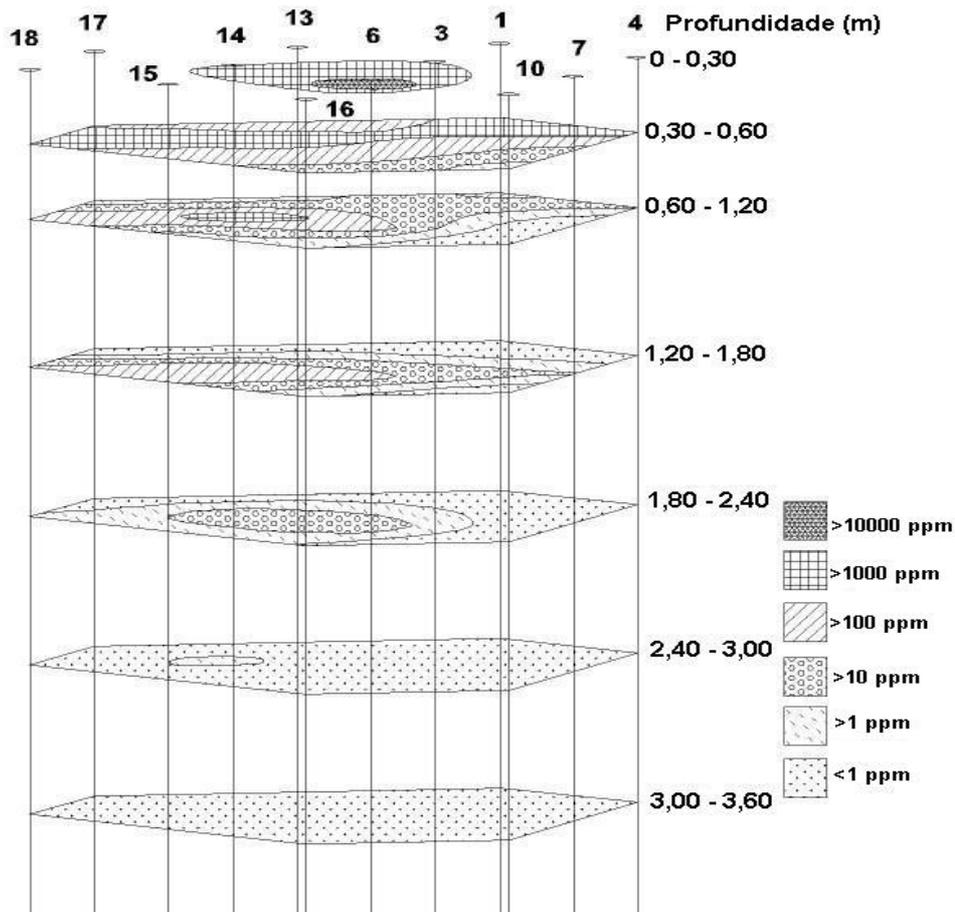


Figura 1 – Controle das concentrações iniciais de PCB, Vinegar *et al.* (1997).

Um esquema de um típico sistema de aquecimento do processo de dessorção térmica *in situ* é apresentado na Figuras 2. Nela são apresentados dois tipos de equipamentos para aquecimento. O primeiro, cobertor térmico, é mais utilizado para limpeza de contaminações mais superficiais. Já o segundo, bastonete térmico, é empregado para zonas mais profundas.

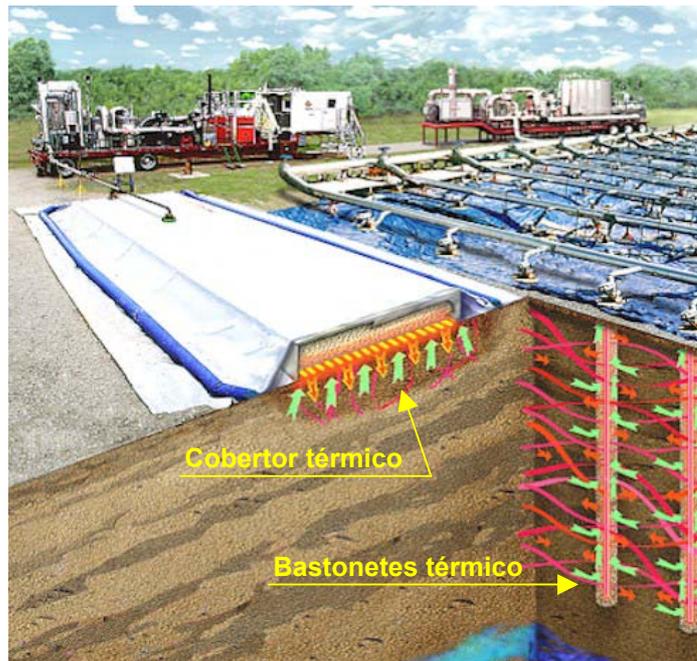


Figura 2 – Cobertor térmico e bastonetes térmicos, TerraTherm (2004).

De acordo com a Terratherm (2001) os cobertores são efetivos para locais onde a fonte ou a pluma de contaminação não se aprofunda mais do que 90cm. Os cobertores utilizados pela empresa Terratherm, consistem em seções de caixas de aço com: 2,4m de largura, 6m de comprimento e 30,5cm de espessura, em uma malha de aço inoxidável.

Simulações numéricas para o sistema de aquecimento utilizando cobertores térmicos, usados em um pequeno campo piloto onde foram utilizados cobertores térmicos para a descontaminação foram apresentadas por Stegemeier e Vinegar (1995). Elas mostraram que contaminantes próximo à superfície podem ser removidos em um tempo razoável. Para contaminantes leves, a menos de um metro de profundidade em um solo seco, a remediação pode reduzir os contaminantes a níveis bem baixos em menos de dez dias, e para contaminantes leves até cerca de 30cm pode se atingir níveis residuais em até 24 horas.

A Tabela 3, apresenta os valores de temperaturas atingidas através da aplicação da dessorção térmica *in situ*, usando um cobertor térmico em um solo contaminado por n-hexadecano ( $n - C_{16}H_{34}$ ), cujo ponto de ebulição é de 287°C. A eficácia do tratamento é mostrada na Tabela 4.

Tabela 3 – Resumo das temperaturas versus profundidade, Stegemeier e Vinegar (1995)

<b>Máxima temperatura atingida no solo</b>	
<b>Depois de 65 horas de aquecimento</b>	
Profundidade (cm)	Temperatura máxima (°C)
0	575
15	345
30	195
45	102
60	91

Tabela 4 – Percentual de n-hexadecano removido e quantidade residual desse por camada de solo, Stegemeier e Vinegar (1995)

Camada (cm)	Quantidade residual de $n - C_{16}H_{34}$ (ppm)	Removido (%)
0-15	0,42	99,94
15-30	14,26	98,00
30-45	176,86	74,70

Portes (2002) sugere que essa técnica pode reduzir substancialmente a contaminação do material quando este é submetido a temperaturas acima de 300°C. Em seu trabalho, Portes (*op. cit.*), relata que altas temperaturas nesse material pode levar a carbonização do contaminante.

Já os bastonetes térmicos podem ser aplicados teoricamente a qualquer profundidade, como demonstrado por Vinegar *et al.* (1997).

Segundo Reed (1998), os bastonetes aquecem o solo a uma temperatura que varia entre 215 e 800°C, dependendo do contaminante. Quando os contaminantes alcançam os seus pontos de ebulição, eles sobem para a superfície como vapor. Através do sistema de extração a vácuo, os vapores são coletados e encaminhados para o equipamento de tratamento. De acordo com o autor, a remoção dos contaminantes é maior que 99%.

Baker (2000) relata os trabalhos realizados na Termelétrica de Missouri, MO. A contaminação era de PCB's com concentração máxima de 20.000 ppm. O ponto de ebulição deste tipo de contaminante é da faixa de 380°C a 415°C. A área contaminada era composta de um solo argiloso, com uma profundidade de contaminação de 3m. O nível d'água se encontrava a 3,5m da superfície e se utilizaram tanto cobertores quanto bastonetes térmicos. A eficiência de aplicação

da técnica de dessorção térmica neste local foi de 99% e não se registrou nenhuma migração de contaminantes para áreas vizinhas.

A Tabela 5, adaptada de Baker e Kuhlman (202), apresenta alguns locais onde foi utilizada a DTIS como técnica de remediação. Na Tabela 5, também são apresentados os contaminantes presentes, bem como as concentrações desses antes e após o processo visando a descontaminação. Os resultados apresentados nesta Tabela, atestam a eficácia do procedimento na remediação de solos contaminados por compostos orgânicos.

Tabela 5 – Locais onde foi aplicado a dessorção térmica (Baker e Kuhlman, 2002).

Local	Contaminante	Concentração inicial (ppm)	Concentração final (ppm)
S. Glens Falls, NY	PCB 1248/1254	5000	<0,8
Cape Girardeau, MO	PCB 1260	500	<1
	PCB 1260	20000	<0,033
Portland, IN	1,1-DCE	0.65	<0,033
	PCE/TCE	3,500/79	0,053
Vallejo, CA	PCB 1254/1260	2200	<0,5/0,02
Tanapag, Saipan	PCB 1254/1260	10000	<1
Eugene, OR	Benzeno	33	<0,044
	Gasolina / Diesel	33000/9300 + produtos livres	250000 lbs. do produto livre removidos
Ferndale, CA	PCB 1254	800	<0,17

### 2.3.

#### Vantagens do uso da dessorção térmica *in situ* (DTIS)

A maior vantagem do uso da técnica de dessorção térmica *in situ* é, que ela pode ser efetiva tanto para locais com nível muito baixo de contaminação, quanto para locais altamente contaminados, conforme pode ser visto na Tabela 5. A destruição dos contaminantes *in situ* é completa e o processo não é prejudicado pela heterogeneidade do subsolo. Este método, quando comparado a outras técnicas de remediação *in situ*, não requer que produtos químicos de qualquer natureza sejam injetados no subsolo como auxílio no processo de remediação (Duarte, 2004).

A DTIS tem características as quais lhe dão um diferencial em relação a outros métodos (EPA, 1999), como:

- Aplicável diretamente na superfície próxima a contaminação;
- Efetividade para uma grande variedade de contaminantes (até aqueles com pontos de ebulição substancialmente maiores que o da água);
- Habilidade de reduzir a contaminação para níveis muito baixos e
- Facilidade de operação para remediação rápida e barata de uma variedade ampla de solos em condições de superfície.

Aines *et al.* (2000) associam as vantagens desse método a diversos fatores, entre os quais:

- Aumento da volatilidade dos contaminantes;
- Rápida transferência de massa;
- Rápida difusão e evaporação;
- Aceleração das reações químicas;
- Aquecimento de solos pouco permeáveis;
- Baixa a viscosidade da água e contaminantes.

Todos esses fatores estão relacionados diretamente ao aquecimento do meio contaminado.

O processo de DTIS oferece várias vantagens em relação aos métodos tradicionais que utilizam calor com o princípio fundamental para limpeza de meios sólidos, como é o caso da incineração.

Stegemeier e Vinegar (1995) sugere que o processo de incineração possui uma série de fatores que o torna uma alternativa mais onerosa, que causa mais impacto e ainda oferece um risco de provocar uma contaminação secundária durante seu processo de tratamento. No processo de incineração o material contaminado tem de ser removido da área em que se encontra, ser transportado para uma central de incineração e, depois de tratado, pode ser ou não devolvido ao lugar original. Isso onera esse método de tratamento, visto que as centrais de incineração nem sempre estão próxima das áreas que precisam ser descontaminadas. Os equipamentos e materiais envolvidos na mobilização e transporte do material a ser incinerado são contaminados quando em contato

como o mesmo. Durante o transporte, caso o material esteja seco, pode ser produzido uma poeira contaminada e se espalhar pelo caminho por onde é transportado. No caso do material estar muito úmido, pode haver uma drenagem de líquidos contaminados e, da mesma forma que o material seco, provocar contaminação durante o trajeto.

Outros métodos que envolvem biorremediação ou remediação de solos por algum tipo de substância química não têm provado ser suficientemente eficazes em remover substâncias químicas para níveis extremamente baixos ou para concentrações residuais quando combinações altamente tóxicas ou carcinogênicas estejam presentes (Stegemeier e Vinegar, *op. cit.*).

A DTIS oferece maior segurança quanto ao risco de uma contaminação secundária, visto sua aplicação direta na área afetada, sem causar maiores impactos de acordo com Stegemeier e Vinegar (*op. cit.*). A DTIS é versátil e pode ser utilizada em vários locais onde a escavação não é possível, abaixo e ao redor de estruturas, por exemplo.

Quando é abordada a técnica da dessorção térmica *in situ* está se falando de uma tecnologia que tem um custo efetivo mais baixo que incineração. De acordo com Baker (2000), os custos para aplicação da técnica de dessorção térmica variam de 75 a 260 dólares por m<sup>3</sup>. A Tabela 6 mostra um comparativo de preços entre diferentes técnicas de remediação realizado por Wood (1997).

Tabela 6 – Comparativo de preços entre diferentes técnicas de remediação (Wood, 1997).

<b>Técnicas de Remediação</b>	<b>Custo (em \$)</b>
Correções de superfície	18 – 72 / t
Escavação e destruição off-site	13 – 90 / t
Sistema de cobertura	36 – 54 / m <sup>2</sup>
Contenção	18 – 90 / t
Parede de lama vertical: rasa	54 – 108 / m <sup>2</sup>
Parede de lama vertical: funda	108 – 216 / m <sup>2</sup>
Lavagem de solo	90 – 450 / t
Lavagem físico-química	90 – 306 / t
Extração de vapor do solo <i>in situ</i>	18 – 162 / t
Estabilização/solidificação <i>in situ</i>	108 – 198 / t
Técnicas eletrocinéticas <i>in situ</i>	72 – 216 / t
Tratamento biológico: lagoa de sedimentação	90 - 144 / t

Tabela 6 (continuação) – Comparativo de preços entre diferentes técnicas de remediação (Wood, 1997).

<b>Técnicas de Remediação</b>	<b>Custo (em \$)</b>
Tratamento biológico: torre biológica	27 - 81 / t
Tratamento biológico: compostagem	18 - 180 / t
Tratamento biológico: cultura anexa	9 - 108 / t
Tratamento biológico: in situ	9 - 288 / t
Tratamento biológico: aeração	27 - 144 / t
<b>Incineração</b>	<b>90 - 2160 / t</b>
Vitrificação forno-básico	54 - 900 / t
Estabilização/solidificação ex situ: inorgânico	36 - 63 / t
Estabilização/solidificação ex situ: orgânico	72 - 108 / t
Solidificação: cimento e pozolânico básico	36 - 306 / t
Solidificação: cal	36 - 72 / t
Extração de solvente	54 - 1080 / t
Dehalogenação	270 - 756 / t

Conforme pode ser visto na Tabela 6, a incineração é a técnica mais onerosa. Quando se compara a faixa de valores sugerida por Baker (2000) observa-se que a dessorção térmica possui um valor competitivo.

#### **2.4.Comportamento do fluxo de fluido e calor no processo de dessorção**

O fluxo de calor em solos, embora não venha sendo muito estudado na área geotécnica, é extremamente importante com relação: a poluição térmica, a permanente estabilização do meio poroso por aquecimento, a transmissão de eletricidade pelo subsolo e, por fim, a remediação de áreas degradadas utilizando-se do aquecimento do subsolo.

De acordo com Duarte (2004), a profundidade de penetração do calor dentro de uma massa de solo e a amplitude de variação diária de temperatura são influenciadas pelas propriedades térmicas do solo. A penetração de calor durante um dia é da ordem de 0,3 à 0,8m.

O processo de dessorção térmica *in situ* pode ser descrito pelas equações fundamentais de fluxo de fluido e de calor (Stegemeier, 1998).

Para o fluxo do fluido é considerado que este está no regime permanente de fluxo e é descrito pelas equações de Darcy para cada uma das fases do

fluido. A maioria dos processos de DTIS envolve o fluxo de óleo e água da fase líquida, vapor d'água, voláteis produtos da volatilização de óleos e outros contaminantes e, ainda, o fluxo de ar presente nos vazios do meio contaminado (Stegemeier, *op. cit.*).

A Equação 01, descreve o processo de fluxo de um cobertor térmico. A forma radial, mostrada na Equação 02, descreve o processo de fluxo dos bastonetes térmicos. Nas equações de Darcy as propriedades do material (permeabilidade absoluta e porosidade) são diferenciadas das propriedades do fluido (viscosidade e densidade). A presença de fluidos diferentes e multifásicos são descritos por uma correção da permeabilidade relativa que é função da saturação de cada fase. Todas as propriedades empregadas nas Equações 1 e 2 podem variar com a temperatura (Stegemeier, 1998).

$$q_L = \frac{kk_r A \Delta p}{\mu \Delta l} \quad (01)$$

$$q_R = \frac{2\pi k k_r h \Delta p}{\mu \ln(r_e/r_w)} \quad (02)$$

onde:

$q_{L,R}$  = vazão;

$k$  = permeabilidade absoluta;

$k_r$  = permeabilidade relativa;

$A$  = área;

$\Delta p$  = variação de pressão;

$\Delta l$  = comprimento do caminho de fluxo;

$\mu$  = viscosidade;

$r_e$  = raio externo;

$r_w$  = raio do poço (bastonetes) e

$h$  = comprimento do poço

No processo de DTIS ocorre aquecimento do meio por transmissão de calor por condução e por radiação.

Vinegar *et al.* (1997) afirmam que o aquecimento por condução térmica é responsável por mais de 80% da transferência de calor do processo de

dessorção térmica. Uma característica importante citada por Vinegar *et al.* (*op. cit.*) é da criação de uma zona de alta temperatura ( $> 537^{\circ}\text{C}$ ) nas proximidades dos aquecedores, que causa a destruição rápida dos contaminantes antes que eles saiam do meio contaminado.

No processo de condução térmica, é considerado que ocorre transmissão de calor no regime permanente e transiente (Stegemeier, 1995).

Fourier, conforme ilustrado na Figura 3, o fluxo de calor que atravessa um material plano de espessura “ $dx$ ” e área “ $dA$ ” normal ao fluxo, sendo “ $t_1$ ” e “ $t_2$ ” as temperaturas extremas ao material, é diretamente proporcional à área “ $dA$ ” enquanto que a diferença de temperatura é inversamente proporcional à espessura “ $dx$ ”. A equação 3 exprime numericamente esta afirmação.

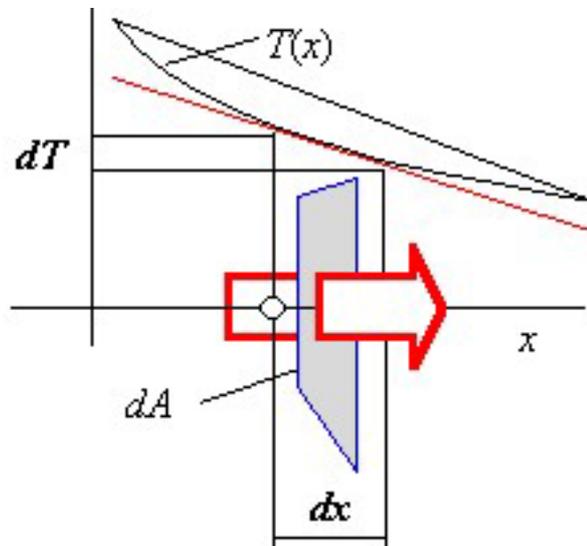


Figura 3 – Esquema do fluxo de calor que atravessa um material

$$q \Rightarrow \frac{dA}{dx}(t_1 - t_2) \tag{03}$$

Substituindo os tipo de materiais, Fourier observava que, apesar de mantidas invariáveis as demais condições, o fluxo de calor não era igual. O fluxo variava com a natureza do material ensaiado.

Surgiu então o conceito de um valor particular para cada material. Este valor foi denominado de coeficiente de condutividade térmica  $\lambda$ , que ao ser introduzido na Equação 03, produz a seguinte relação.

$$q = \frac{\lambda A}{dx}(t_1 - t_2) \tag{04}$$

O fluxo de calor por condução pode ser comparado ao fluxo de um fluido através de um meio poroso. A permeabilidade é análoga ao coeficiente de condutividade térmica. A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é definida como a quantidade de calor que passa numa unidade de tempo através de uma unidade transversal, devido a um gradiente de temperatura aplicado na direção do fluxo.

A Tabela 7, adaptada de Mitchell (1993), apresenta alguns valores típicos de condutividade térmica, e também valores de calor específico “c” e de capacidade de aquecimento volumétrico “C”.

Tabela 7 - Propriedades Térmicas do Solo (adaptada de Mitchell, 1993).

<b>Condutividade Térmica</b>	<b>Material</b>	<b>W / m / °K</b>
	Ar	0,024
	Água	0,60
	Gelo	2,25
	Granito	2,76
	Folhelho	1,56
	Cobre	389
<b>Condutividade Térmica</b>	<b>Material</b>	<b>W/m/°K</b>
	Valores médios de solos	0,25 – 2,9 (~1,7)
	Quartzo	8,4
	Matéria Orgânica	0,25
<b>Calor específico</b>	<b>Material</b>	<b>cal/g°C</b>
	Quartzo	0,175
	Valores médios de solos	0,175
	Matéria orgânica	0,46
	Água	1,00
	Ar	0,24
<b>Capacidade de Aquecimento Volumétrico</b>	<b>Material</b>	<b>cal/cm<sup>3</sup>°C</b>
	Água	1,0
	Valores médios de solos	0,46
	Quartzo	0,46
	Matéria Orgânica	0,60
	Ar	0,00029

Calor específico é a capacidade de mudar em 1°C a temperatura de um peso unitário de um dado material (cal/g°C). A capacidade de aquecimento volumétrico é a capacidade de mudar a temperatura de um volume unitário em 1°C (cal/cm<sup>3</sup>°C). Assim a capacidade de aquecimento volumétrico é o produto do calor específico pelo peso específico “ $\rho$ ”(g/cm<sup>3</sup>), de acordo com

$$C = c.\rho \quad (05)$$

O comportamento do fluxo de fluido para cobertores térmico segundo Stegemeier (1998) pode ser descrito pela lei de Fourier. As Equações 06 e 07 descrevem o fluxo de calor por condução no regime permanente, sendo a equação 06 a forma linear que representa o cobertor térmico e a Equação 07 a forma radial para o sistema de aquecimento que utiliza bastonetes térmicos.

$$q_{hl} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta L} \quad (06)$$

$$q_{hr} = \frac{2\pi\lambda h\Delta T}{\ln(r_e/r_w)} \quad (07)$$

onde:

$q_{L,R}$  = vazão;

$\Delta T$  = variação de temperatura;

$\Delta L$  = comprimento do caminho de fluxo;

$\lambda$  = condutividade térmica;

$r_e$  = raio externo;

$r_w$  = raio do poço (bastonetes) e

$h$  = comprimento do poço.

Devido à existência de fluxo de calor e fluxo de fluido simultaneamente, e como o fluxo de calor é bem mais lento que o fluxo de fluido, muitas vezes se faz necessário considerar o regime transiente para o processo (Stegemeier, 1998).

O regime transiente de transmissão de calor é aquele em que o fluxo de calor que atravessa um corpo varia com o tempo, e, portanto, a temperatura de um ponto interior ao corpo é variável (Araújo, 1970).

O fluxo de calor no regime transiente é expresso pela Equação 8:

$$q = -\lambda A (T_i - T_f) \frac{e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}}}{\sqrt{\pi\alpha t}} \quad (08)$$

onde:

$q$  = fluxo de calor;

$\lambda$  = condutividade térmica;

$\alpha$  = difusividade térmica;

$x$  = distancia;

$t$  = tempo;

$T_i$  = temperatura inicial na face A;

$T_f$  = temperatura final na face A e

$A$  = área.

Outro coeficiente útil no processo de transferência de calor, presente na Equação 08, é a difusividade térmica ( $\alpha$ ). Matematicamente a difusividade térmica é a razão da condutividade pelo produto do calor específico ( $c$ ) e densidade ( $\rho$ ), de acordo com:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (09)$$

Altos valores de difusividade térmica implicam na capacidade de mudanças rápidas e consideráveis na temperatura. Um solo deve ter uma difusividade térmica muito maior quando está congelado do que quando estiver descongelado, devido a dois fatores: os altos valores de condutividade térmica de solos congelados e os baixos valores de calor específico do gelo quando comparado à água líquida.

Segundo Vinegar (1995) o aquecimento por radiação é importante apenas na região próxima dos aquecedores e para aquecedores com temperatura superior a 537°C. Vinegar (*op. cit.*) relata que na região próxima aos bastonetes térmicos ocorre uma área de sobreaquecimento. Na prática, o aquecimento por radiação é desconsiderado tanto para cobertores térmicos como para bastonetes térmicos, visto a radiação provocar o aquecimento de uma pequena porção do meio tratado (Stegemeier, 1998). O aquecimento por radiação é aquele no qual uma fonte quente aquece uma fonte fria sem, entretanto, aquecimento do meio entre as duas fontes (Araújo, 1970). O processo obedece a seguinte expressão matemática:

$$F_o = S(T_1^4 - T_2^4) \left( \frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \right) f \quad (10)$$

Onde:

$S$  = constante de Stephan-Boltzmann;

$e$  = emissividade;

$f$  = fator de forma;

$T_1$  = temperatura emitida e

$T_2$  = temperatura absorvida.

Nessa fórmula aparece o termo emissividade,  $e$ , que se refere à fração de energia que um corpo emite quando comparado com a emissão de um corpo negro submetido à mesma temperatura.

## 2.5.

### Sistema de dessorção térmica e tratamento de gases

Um sistema mais completo de dessorção térmica *in situ* envolve desde da limpeza do meio sólido contaminado como também o tratamento das emissões gasosas produzidas no processo de dessorção.

Stegemeier e Vinegar (1995) descrevem um equipamento de dessorção térmica bem como o seu procedimento de funcionamento. Esse sistema, visto na Figura 4, utiliza vácuo para extração das emissões produzidas.

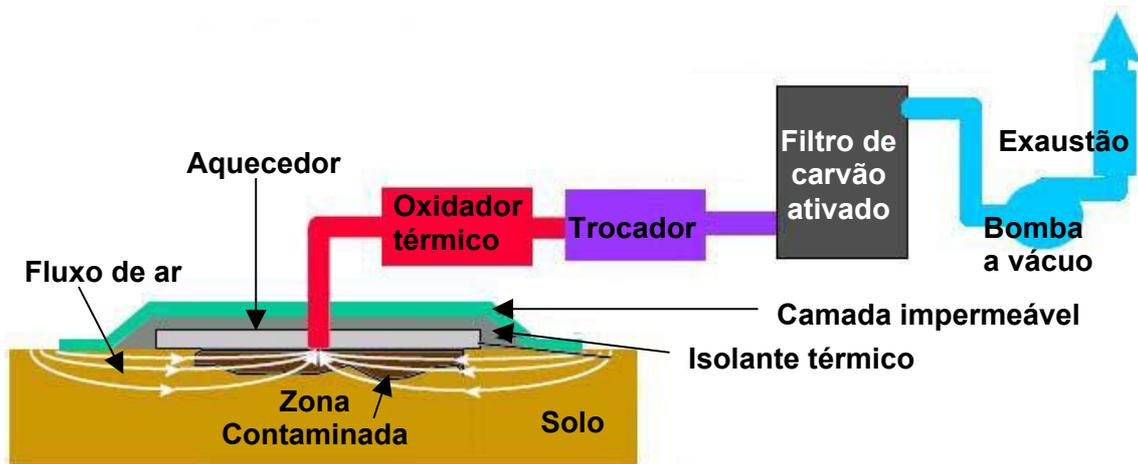


Figura 4 – Esquema do sistema de dessorção térmica *in situ*, Terratherm.

O sistema apresentado por Stegemeier e Vinegar (1995) utiliza como fonte aquecedora cobertores térmicos os quais são colocados diretamente sobre o solo contaminado. Possui sobre o cobertor um sistema de isolamento térmico, visto esquematicamente na Figura 5, que impede a perda de calor para o meio externo, e sobre esse uma manta em silicone para vedação que se estende além da área do cobertor térmico impedindo a saída das emissões gasosas direto para atmosfera. O fluxo de calor por condução térmica, e os incrementos de temperatura gradual fazem com que os contaminantes sejam removidos por vários mecanismos, incluindo: evaporação, ebulição, destilação a vapor, pirólise, oxidação entre outras reações químicas, sugere Baker e Kuhlman (2002).

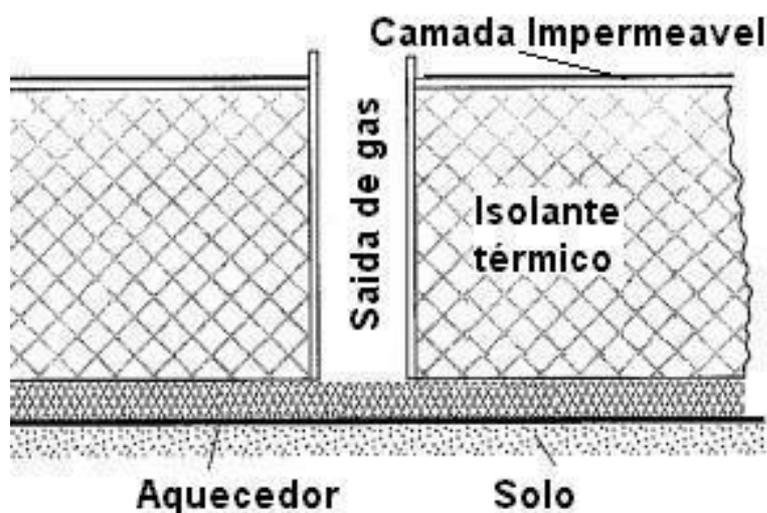


Figura 5 – Detalhes do cobertor térmico.

Baker e Kuhlman (2002) apresentam faixas de temperaturas onde ocorrem os mecanismos de remoção dos contaminantes. Essas faixas estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Mecanismos de remoção dos contaminantes versus temperatura (Baker e Kuhlman, 2002).

Evaporação	
Ebulição ( $H_2O$ e VOC's)	$\leq 100^\circ\text{C}$
Destilação a vapor (arrasto)	
Ebulição (SVOC's)	
Pirólise (craqueamento térmico) e	$\geq 100^\circ\text{C}$
Oxidação	

Os produtos volatilizados são capturados pelo sistema a vácuo e passam por um processo de descontaminação.

No sistema de dessorção apresentado por Stegemeier e Vinegar (1995), o sistema de aplicação de vácuo além de fazer as emissões passarem pelo sistema de tratamento das emissões, tem o papel de manter o fluxo de ar e de contaminante dentro do cobertor térmico. Stegemeier e Vinegar (*op. cit.*) relatam que o fluxo de ar dentro do cobertor térmico é de fundamental importância para os processos de evaporação, ebulição, destilação a vapor, oxidação e pirólise que podem ocorrer no processo. Na Figura 6 é possível verificar o fluxo de ar provocado pelo bombeamento a vácuo.

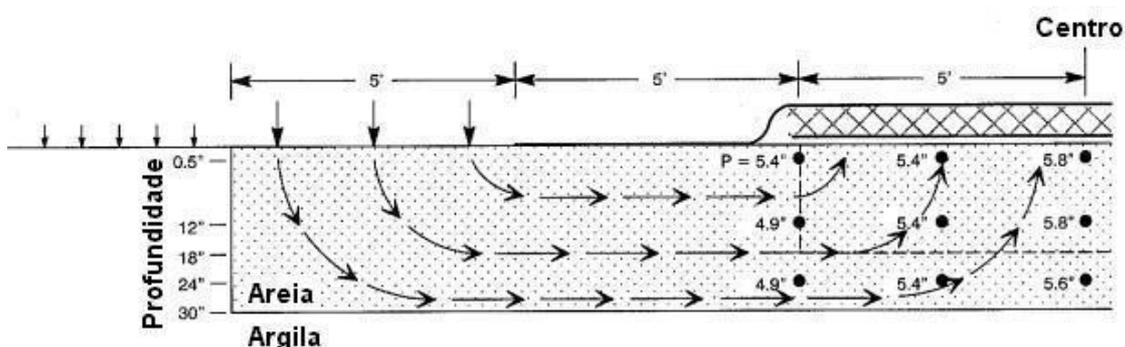


Figura 6 – Fluxo de ar provocado pelo bombeamento a vácuo.

Segundo Baker e Kuhlman (2002) para hidrocarbonetos e para o TCE as reações são:

Hidrocarbonetos:



TCE:



Na Figura 7 apresenta, esquematicamente, como os compostos perigosos são oxidados através do processo de dessorção térmica.

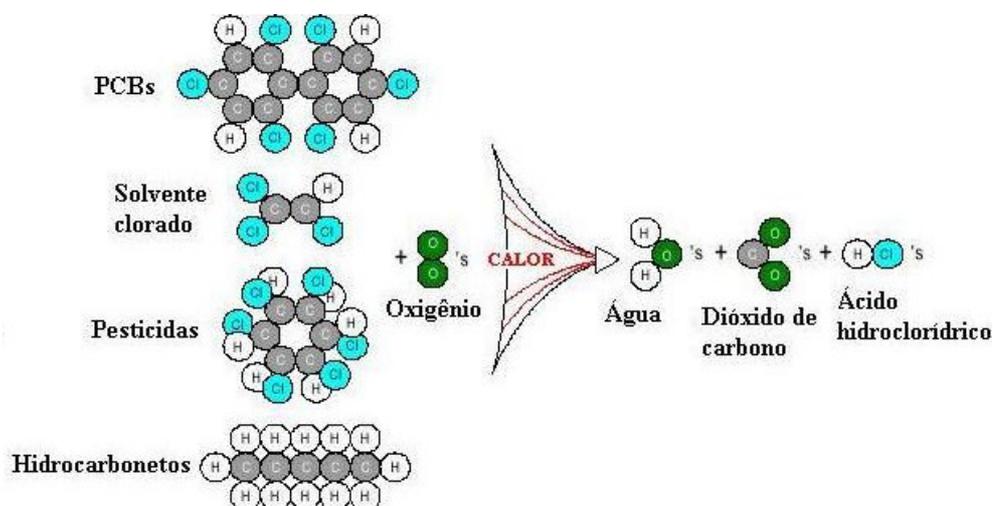


Figura 7 – A química do tratamento por oxidação. (TerraTherm,1999)

Antes do início do aquecimento é aplicado vácuo para criar um fluxo de fora da área coberta pela manta de silicone para dentro do sistema de dessorção térmica, conforme mostra a Figura 6. A aplicação de vácuo tem como função arejar o meio contaminado para facilitar o processo de dessorção. No caso de hidrocarbonetos de petróleo, a ventilação impede a formação de coque, e faz com que sempre se tenha um fluxo ascendente dos contaminantes volatilizados.

Além disto, a sucção provocada no solo impede a migração de contaminantes para áreas distantes da fonte de aquecimento conforme citado no item 2.2.

O sistema de tratamento das emissões gasosas produzidas no processo de descontaminação está instalado na linha do sistema a vácuo. Isto assegura a qualidade do ar dos gases a serem aspirados pela bomba a vácuo, melhorando sua eficiência.

O sistema de tratamento das emissões é geralmente composto de alguns equipamentos, como um condensador (troca de calor), uma câmara de carvão ativado (filtro), e um oxidador térmico.

Os oxidadores térmicos destroem os contaminantes ainda presente nas emissões gasosas por oxidação ou pirólise, dependendo se há presença ou não de ar. Os contaminantes vaporizados pelo cobertor térmico ou pelos bastonetes, são succionados pelo sistema de vácuo e os gases são destruídos quando alcançam as elevadas temperaturas do oxidador térmico, onde os contaminantes são transformados em dióxido de carbono e água, conforme sugere a Figura 7.

Os condensadores são recomendados para processos onde os gases aspirados estejam contaminados por agentes químicos ou com excesso de umidade, comprometendo o funcionamento da bomba e, conseqüentemente, a eficiência no vácuo final. O condensador resfria as emissões gasosas e assim faz-se a captação de líquidos. A esses líquidos é dados um destino final.

No sistema de descontaminação dos gases apresentado por Stegemeier e Vinegar (1995), o condensador é o segundo equipamento na linha de tratamento das emissões ficando logo após o oxidador térmico. A troca de calor provocada pelo condensador faz com que a adsorção pelo filtro de carbono ativado seja mais eficaz.

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 é regenerado e pode ser reutilizado.

Alguns fatores podem afetar a adsorção pelo carvão ativado. Manbe (1988), menciona:

- Composição química das espécies a serem adsorvidas;
- Características físicas e químicas do carvão ativado, tais como área superficial, tamanho e formato dos poros, composição química;
- Características físicas e químicas do adsorbato (contaminante), tais como tamanho da molécula, polaridade e composição química;

- Características do contaminante tais como temperatura e pH;
- Concentração do adsorbato e
- Tempo de residência.

A eficiência do filtro de carvão ativado é função do fluxo de ar, da temperatura e do teor de umidade (EPA, 1994). Altas temperaturas e umidade podem reduzir a capacidade de adsorção do carvão ativado.