

## 2 Dessorção Térmica

A prática das técnicas de remediação de áreas degradadas apresentou um maior desenvolvimento a partir da década de 70. Desde então, tem havido um acelerado crescimento de informações e conhecimentos sobre a eficiência e limitações das diferentes técnicas desenvolvidas.

A partir de um levantamento detalhado das condições hidrogeológicas do local e da caracterização dos contaminantes, várias opções de técnicas de controle e remediação podem ser selecionadas e combinadas para se ter a remediação do local, como mostra a Tabela 1 (Evans, 1991). É importante ainda que se tenha um conhecimento das propriedades de degradação dos contaminantes e sua reatividade de ordem físico-química com o solo. (Gusmão, 1999).

A identificação do método mais apropriado para a remediação de um dado local é um processo difícil e requer a avaliação de uma série de fatores (Wood, 1997), incluindo:

- aplicabilidade e eficácia
- quanto ao nível de remediação demandado
- disponibilidade, limitações e custos
- categoria de desenvolvimento
- impacto potencial ambiental
- necessidade operacional de informação e monitoramento.

Como técnicas de descontaminação existem os métodos de tratamento que visam reduzir a concentração e/ou toxicidade dos contaminantes, e os métodos de confinamento, que tem como objetivo principal a redução da mobilidade dos contaminantes.

Wood (1997) agrupa os métodos de remediação em duas categorias: os métodos geotécnicos e as técnicas processuais. Os métodos geotécnicos incluem a remoção para tratamento *a posteriori*, e o uso de formas de contenção. As técnicas processuais incluem os processos físicos, químicos e biológicos de estabilização/solidificação, e os térmicos. Estas técnicas podem ser utilizadas

como tratamentos únicos ou combinados. Embora muitas técnicas processuais estejam em vários estágios de desenvolvimento, o número de tecnologias que têm sido comprovadas ou que estão amplamente disponíveis é consideravelmente pequeno. Os processos estabelecidos disponíveis são, dentre outras técnicas: incineração, dessorção térmica, vitrificação, solidificação/estabilização, tratamento biológico, eletrocinese, extração por vapor e lavagem de 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
Linhas de esgoto contaminado									X

- (1) Drenagem / controle da água superficial.
- (2) Controles de poluição do ar.
- (3) Controle do lixiviado e da água subterrânea.
- (4) Controle de imigração 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 das linhas dos sistemas sanitários (água e esgoto).

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

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

A dessorção térmica é uma tecnologia de tratamento inovador para solos, lamas ou sedimentos contaminados com resíduos tóxicos, baseando-se no aquecimento direto do solo (tratamento físico-térmico), sendo utilizada para separar contaminantes com baixo ponto de ebulição (vaporização). Dentre estes se encontram os contaminantes orgânicos, tais como PCBs, PAHs (hidrocarbonetos poliaromáticos), dioxinas, pesticidas, produtos derivados do petróleo, cianetos e metais pesados tais como o mercúrio. A função desta tecnologia é aquecer o solo contaminado por um determinado período de tempo, até uma temperatura suficiente para volatilizar a água e os contaminantes, para posterior tratamento dos gases. (USEPA, 2001)

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 técnica de dessorção térmica pode ser aplicada tanto no local contaminado (dessorção térmica *in situ*) ou com extração do solo contaminado (dessorção térmica *ex-situ*).

Os sistemas de dessorção térmica *on site* tratados *ex-situ* são geralmente classificados em dois grupos, com unidades de aquecimento direto e indireto. Nas unidades de aquecimento direto transfere-se calor através da radiação e convecção de gás para o sólido. O aquecimento indireto transfere calor através da técnica por condução ou promove aquecimento através de bastonetes de resistência elétrica colocados no solo, sendo então os contaminantes volatilizados e expelidos para o sistema de controle de emissão. Podem existir processos de pré-tratamento, tais

como: secagem e ajuste de pH. Os processos pós-tratamento são: o tratamento dos sólidos (resfriamento), e o tratamento de gases (separadores ciclones, oxidadores térmicos, resfriadores evaporativos, condensadores, sistema de carvão ativado, etc).

A escavação de solos é uma tecnologia que torna o processo mais caro devido à mobilização de equipamentos, custo de transporte e reconstrução da área escavada, bem como aumenta o risco de disposição e dispersão do contaminante enquanto manuseado. A dessorção térmica *in situ* 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 2 mostra uma comparação de preços (em Libras Esterlinas) entre diferentes técnicas de remediação.

Tabela 2- Custo para técnicas de remediações. (Wood, 1997).

Técnicas de Remediação	Custo (em £)
Correções de superfície	10 - 40 / t
Escavação e destruição off-site	7 - 50 / t
Sistema de cobertura	20 - 30 / m <sup>2</sup>
Contenção	10 - 50 / t
Parede de lama vertical: rasa	30 - 60 / m <sup>2</sup>
Parede de lama vertical: funda	60 - 120 / m <sup>2</sup>
Lavagem de solo	50 - 250 / t
Extração de vapor do solo <i>in situ</i>	10 - 90 / t
Estabilização/solidificação <i>in situ</i>	60 - 110 / t
Técnicas eletrocinéticas <i>in situ</i>	40 - 120 / t
Tratamento biológico: lagoa de sedimentação	50 - 80 / t
Tratamento biológico: torre biológica	15 - 45 / t
Tratamento biológico: compostagem	10 - 100 / t
Tratamento biológico: cultura anexa	5 - 60 / t
Tratamento biológico: <i>in situ</i>	5 - 160 / t
Tratamento biológico: aeração	15 - 80 / t
<b>Tratamento térmico</b>	<b>40 - 700 / t</b>
<b>Incineração</b>	<b>50 - 1200 / t</b>
Vitrificação forno-básico	30 - 500 / t
Estabilização/solidificação <i>ex situ</i> : inorgânico	20 - 35 / t
Estabilização/solidificação <i>ex situ</i> : orgânico	40 - 60 / t
Solidificação: cimento e pozolânico básico	20 - 170 / t
Solidificação: cal	20 - 40 / t
Extração de solvente	30 - 600 / t
Dehalogenação	150 - 420 / t

De acordo com a Tabela 2 as maiores faixas de variação de preços estão relacionados aos processos de tratamento térmico e de incineração, ressaltando a grande importância no conhecimento dos parâmetros térmicos para uma boa estimativa do tempo e do custo necessário para o tratamento de descontaminação.

A dessorção térmica *in situ*, ilustrada na Figura 1, baseia-se no aquecimento direto do solo em seu local de origem através da aplicação de cobertores térmicos (a) ou de bastonetes térmicos (b), 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 contém uma resistência (fonte de aquecimento). Estas caixas de aço são colocadas na superfície do terreno.

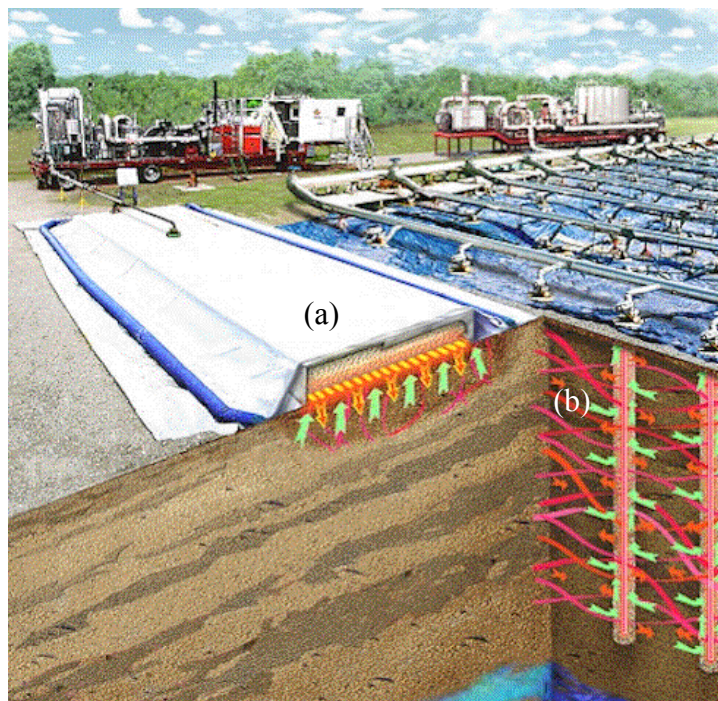


Figura 1 – Sistemas de Dessorção Térmica *in situ* (Terratherm, 2001).

Os cobertores térmicos diferem dos métodos tradicionais, pois além de não necessitarem de escavação, os instrumentos de aquecimento encontram-se na superfície do solo. Este processo de dessorção térmica através de cobertores foi desenvolvido pela Shell Oil, no final dos anos 80, e tem sido utilizado para remediar locais com vazamentos de óleo. Em 1996, o processo tornou-se

disponível comercialmente quando a Shell formou a Terratherm, que já remediou vários locais com eficiência maior que 98%. Os cobertores são elétricos e necessitam de uma fonte geradora de 1 a 2,5 MW, dependendo do âmbito do projeto.

Os cobertores são efetivos para locais onde a fonte ou pluma de contaminação não se aprofunda mais do que 90 cm (Terratherm, 2001). Os cobertores utilizados pela empresa Terratherm, consistem em seções de caixas de aço com as seguintes dimensões: 2,4 m de largura por 6 m de comprimento e 30,5 cm de espessura, em uma malha de aço inoxidável. Varetas de aquecimento são introduzidas através da malha, um tapete de borracha é usado como isolamento recobrimo o sistema (Figura 1).

As maiores vantagens da técnica de dessorção térmica é que podem ser efetivadas 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 *in situ* é completa e o processo não é prejudicado pela heterogeneidade do subsolo, além de ser rápida e segura. Este método quando comparado a outras técnicas de remediação *in situ*, não requer que produtos químicos de qualquer natureza sejam injetados no subsolo como processo de remediação.

Para contaminantes com alta solubilidade, a secagem do solo pode ser necessária. Quando a adsorção for significativa, altas temperaturas e / ou longos tempos de remediação serão necessários.

Comparado com um processo de injeção de fluido para descontaminação, o processo de condução de calor é mais uniforme nas direções verticais e horizontais, aquecendo pôr igual todo o volume de solo. Além do mais os processo de vaporização dos contaminantes é agilizado pelo aumento da permeabilidade, devido ao processo de secagem e trincamento do solo, permitindo que o vapor contaminado seja direcionado para a zona de captura. A efetiva combinação do aquecimento com o fluxo de vapor, faz com que os contaminantes no solo sejam completamente removidos com uma eficiência de aproximadamente 100%. Um outro fator que ajuda na eficiência deste tratamento é que a área contaminada pode ser aquecida a altas temperaturas durante vários dias, estudos de laboratório e campo confirmaram que a combinação de altas temperaturas durante um elevado período de tempo resultaram numa remoção extremamente

eficiente inclusive para contaminantes com altos pontos de ebulição. (Chang, 2001)

Os passos num processo de dessorção térmica ocorrem da seguinte maneira: primeiramente acontece a condução térmica no solo, seguido da vaporização do fluido que está contido neste solo. Após a vaporização ocorre a oxidação e pirólise do contaminante, seguida da coleta dos vapores para posterior tratamento dos mesmos em superfície. Os vapores têm que ser colhidos rápida e eficazmente para evitar que se condensem novamente em zonas mais frias do solo.

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

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

Os sistemas de dessorção térmica são baseados no princípio de que a pressão de vapor de contaminantes orgânicos cresce com a elevação de temperatura. A relação entre temperatura e pressão de vapor para vários componentes orgânicos pode ser estimada usando a equação de Antoine que tem a seguinte forma genérica (EPA, 1988):

$$\ln(\text{VP}) = \text{ANTa} - \text{ANTb} / (\text{T} + \text{ANTc}) \quad (1)$$

Onde:  $\ln(\text{VP})$  – logaritmo da pressão de vapor

ANTa- coeficiente A da equação de Antoine

ANTb- coeficiente B da equação de Antoine

ANTc- coeficiente C da equação de Antoine

T – temperatura

Os coeficientes ANT são parâmetros dependentes das unidades de pressão e temperatura usadas. Na Figura 2 mostra-se a relação entre temperatura e pressão de vapor para o benzeno, etilbenzeno e naftaleno, ilustrando-se bem o mecanismo

de transferência de calor e massa com o uso da equação de Antoine. Através da Figura 2 fica evidente a alta volatilidade do benzeno, pois mesmo a pequenas temperaturas já é possível volatilizá-lo. Também se observa através desta figura que a pressão de vapor dos compostos varia bastante com a temperatura.

Segundo Miller et al. (1990) e Feenstra (1990), apud Nobre et al. (1998), a tecnologia de dessorção térmica permite uma maior taxa de extração dos contaminantes, em função principalmente do aumento das taxas de transferência da fase livre do contaminante para a fase gasosa ou fase dissolvida na água. Sabe-se que a transferência de massa é função de diversos fatores, tais como:

- viscosidade da água e do contaminante;
- tensão superficial entre o contaminante e a fase gasosa; e,
- solubilidade efetiva do contaminante.

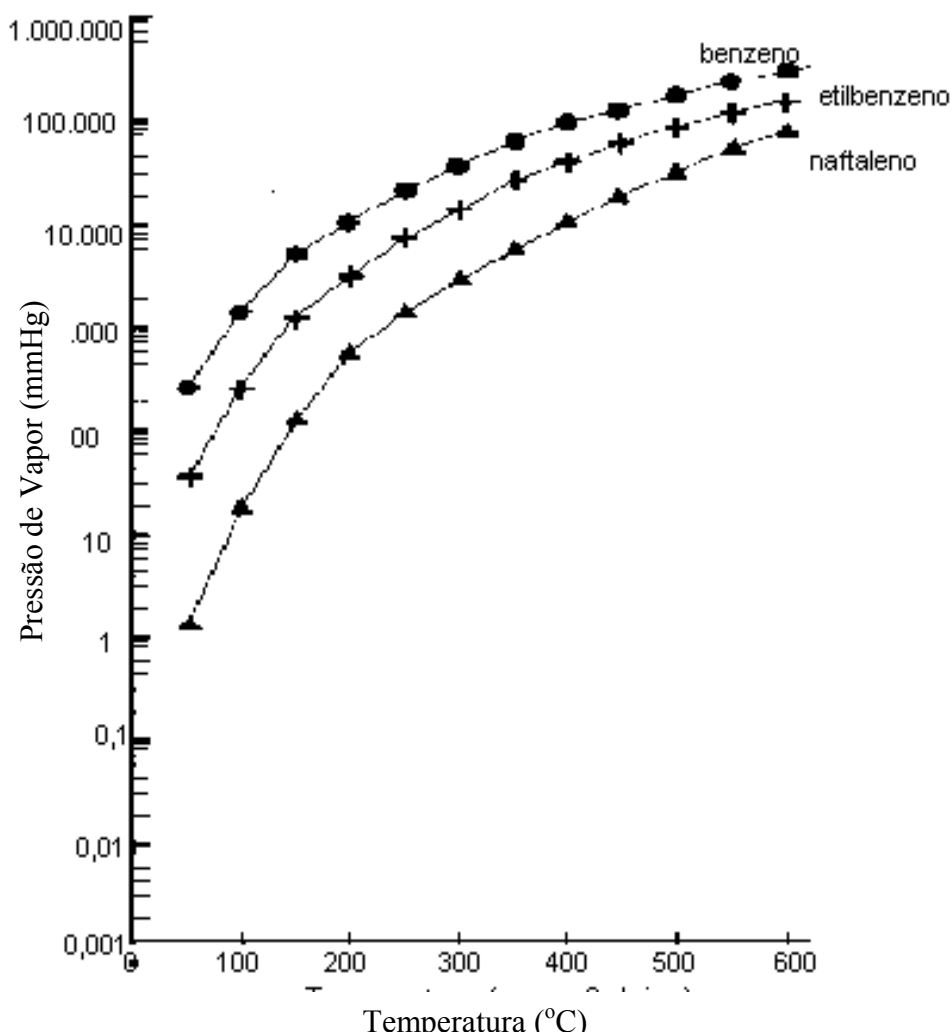


Figura 2- Relação entre temperatura e pressão de vapor (EPA, 1998)



Na maioria dos casos de remediação de solos e águas subterrâneas, a fonte de contaminação pode ser constituída de uma mistura de compostos químicos com distintas propriedades termodinâmicas, e que se encontra, normalmente, imobilizada em camadas geológicas com diferentes permeabilidades. Assim, com a aplicação da energia térmica, a evaporação se processa conforme a concentração da fase gasosa de cada componente em equilíbrio com a massa líquida não miscível. Para pressões próximas às atmosféricas, em compostos com pontos de ebulição menor que a água (100 °C), pode ocorrer a vaporização completa da fase líquida do contaminante com custos relativamente reduzidos. Nobre et al. (1998) sugere que compostos voláteis e semivoláteis podem ser, de fato, eliminados através de processos térmicos, com grande eficiência.

Davis (1997) descreve que existem três métodos genéricos que podem ser usados para injetar ou aplicar calor num subsolo para atingir a remediação: injeção em forma de gases quentes, aquecimento através de energia eletromagnética, e, injeção de água quente.

A energia elétrica tem sido aplicada ao solo em variações de baixa frequência, usando força elétrica tal como frequência de rádio. A transferência de calor se dá a níveis moleculares, usando-se do mesmo processo de aquecimento de microondas, mas com uma frequência e taxa de aquecimento muito menores. As temperaturas do solo e do contaminante com esta técnica podem atingir até 300°C, dependendo das propriedades do solo, não sendo muito efetiva para solos argilosos e siltosos (Cliff, 2000). A frequência de rádio é uma técnica muito utilizada em países frios para controlar a temperatura do solo, melhorando substancialmente o aumento nas taxas de bioremediação (melhor faixa de temperatura para a bioremediação é por volta de 30°C).

Para aquecimento elétrico, as propriedades elétricas do solo e a presença de água são importantes na determinação da eficiência no processo de aquecimento. O aquecimento elétrico já foi provado efetivo no meio arenoso, e ainda tem um potencial maior do que os outros métodos em meios porosos de baixa permeabilidade, tais como argilas. O aquecimento elétrico se aplica bem a meios com baixa permeabilidade e quando se tem uma heterogeneidade significativa.

A eficiência da técnica de dessorção térmica é primeiramente uma função do máximo de volume de solos atingidos pela temperatura durante o tratamento e

o tempo de residência no meio contaminado. Vários fatores afetam a eficiência e/ou aplicação da dessorção térmica *in situ*:

- ponto de ebulição do contaminante
- sistema de vácuo
- temperatura de tratamento dos sólidos e tempo de residência
- tipo de solo e tamanho efetivo dos grãos (permeabilidade do solo a ser tratado)
- concentração de matéria orgânica
- quantidade de metais no solo a ser tratado
- grau de mistura solo-contaminante

O processo de dessorção térmica permite que ocorra uma revegetação da área tratada, mesmo que no local não seja feito nenhum tipo de fertilização ou outro tipo de intervenção. Quando se utiliza de baixas temperaturas e pressões, pode-se deixar o subsolo ameno para ser tratado com bioremediação, ou quando se utiliza de altas temperaturas, o subsolo pode ser esfriado para depois se restabelecer no local uma população microbiológica. Segundo Cummings (2000), alguns microorganismos sobrevivem a altas temperaturas. Este mesmo autor cita que, quando num processo de remediação pôr dessorção térmica ficar um resíduo de contaminante, este subsolo pode ser tratado por um processo de atenuação natural.

Uma outra importante característica do processo é que a condução de calor aumenta a permeabilidade nas regiões secas, permitindo que esta técnica seja aplicada a argilas e siltes de baixas permeabilidades, onde provavelmente outros processos de remediação não seriam eficientes.

De acordo com USEPA (2001) a limpeza do solo e da água subterrânea através de métodos térmicos pode levar desde poucos meses até vários anos. E 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 m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup> (US\$ 10 a 50 menos do que os métodos tradicionais)
- em Liverpool – UK, solos com concentrações 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.

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 o seus pontos de ebulição, eles sobem para a superfície como vapor. Através do sistema de extração à vácuo, os vapores são coletados e encaminhados para o equipamento de tratamento. O processo tem uma eficiência de remoção maior que 99%.

EPA (1998) cita uma técnica de tratamento através de aquecimento do solo com bastonete, onde o meio contaminado é aquecido a temperaturas entre 149 e 649°C, dependendo esta temperatura do ponto de ebulição dos contaminantes, do critério e do grau de limpeza, e, do tempo de residência do tratamento. As maiores temperaturas de tratamento estão ligadas aos orgânicos menos voláteis, como os pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH's) e PCB's. Nesta mesma referência citam-se vários casos históricos tratados com dessorção térmica que obtiveram eficiência da ordem de 99%. Existe o caso de Old Marsh no Arizona – EUA que tratou uma quantidade de 54.000 t. contaminadas com pesticidas, com 99,9% de eficiência. Outros casos históricos de menor volume são os caso de Harbor Point – NY e da Companhia TH de Agricultura e Nutrição, na Georgia, que trataram solo contaminado com BTEX e PAH's, e pesticidas mais DDT respectivamente, com eficiência de 99% em ambos os casos.

Baker (2000) cita os trabalhos feitos na Termelétrica de Missouri, MO. A contaminação era de PCBs com concentração máxima de 20.000 ppm. O ponto de ebulição deste tipo de contaminante é da faixa de 380 a 415°C. A área contaminada era composta de um solo argiloso, com uma profundidade de contaminação de 3 metros. O nível d'água se encontrava a 3,5 m da superfície. Utilizou-se 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.

Cummins (2000) cita três locais contaminados com materiais diferentes que foram tratados com a técnica de dessorção térmica. Em Chicago, IL, a contaminação ocorria por PCE, sendo tratado com uma remoção final de 75% ao custo de US\$ 87/m. Em Stoke, IL a área contaminada era de um solo siltoso com lentes de argila contaminado com TCE, sendo que a remoção total atingida no local foi de 99%, a um custo de US\$ 35/m. Um outro solo formado por siltes e pedregulhos contaminado por TCE em Portland, OR, teve uma remoção total de contaminantes de 99,9% com um custo de US\$ 46/m.

O projeto de remediação do polo industrial de Visalia –USA, teve como objetivo limpar o subsolo do local a níveis de contaminação aceitáveis a um baixo custo e com um tempo mais rápido que o processo de bombeamento, sendo usado o tratamento térmico com bastonetes. Foram tratados 7200 m<sup>2</sup> com profundidade variável de 6 a 29 metros sendo removido 1.300 toneladas de creosoto (DNAPL). Se tivesse sido utilizado bombeamento para se tratar o local, gastar-se-ia 6.800 dólares por litro de creosoto removido enquanto todo o processo de dessorção térmica custou 35 dólares por litro, e o tempo necessário para essa remediação por bombeamento seria de 3250 anos contra os 3 anos gastos para se limpar a área. (CH2MHILL, 2000)

Shimizu et al. (2002) apresentou resultados extremamente satisfatórios de remediação utilizando-se de métodos de aquecimento de solo e extração de vapor para solos de baixa permeabilidade contaminados com TCE. Ensaio de laboratório demonstraram que a permeabilidade do ar e os sistemas absorção/dessorção dependem da temperatura do solo.

Jorge (1999) desenvolveu um sistema off-site de Dessorção Térmica. O programa experimental demonstrou que a dessorção térmica é bastante eficaz no

tratamento de solos finos contaminados com compostos orgânicos que apresentam alta persistência e baixa mobilidade, como o Ascarel.

Experimentos de Dessorção Térmica *In Situ* numa areia contaminada com óleo foram executados por Portes (2002). Um mini-cobertor térmico de aço inox 316 de 1mm de espessura com sistema para liberação de gases, foi acoplado a placas aquecedoras de cerâmica, e este, foi posicionado no topo de um tanque de tijolo refratário com dimensões internas de 400mm x 400mm x 470mm. A temperatura máxima do ensaio foi de 600°C. Os ensaios demonstraram que a utilização de cobertores térmicos pode ser uma solução extremamente eficaz e rápida, sendo 100% eficaz quando a contaminação por derrame encontra-se nas proximidades da superfície – até 20 cm. (Araruna Jr. et. al.)

## 2.1 Contaminantes

Para se avaliar e pesquisar como o aquecimento pode atingir o processo de remediação de um solo, é essencial que se entenda as propriedades dos contaminantes, antes de tratá-los. Os efeitos de temperatura para uma boa remediação não dependem somente das propriedades dos contaminantes como também dos mecanismos limitadores para a taxa de remoção do contaminante.

As propriedades físico-químicas dos contaminantes orgânicos que influenciam no fluxo são: densidade, viscosidade, pressão de vapor, solubilidade e razão de difusão. As interações dos contaminantes com outras fases são feitas através de adsorção/dessorção e interações capilares.

Os passos para se atingir a vaporização do contaminante são os seguintes:

- evaporação
- destilação por vapor
- ebulição
- oxidação
- pirólise

Para contaminantes orgânicos voláteis (combustíveis e solventes clorados), com o aumento de temperatura a pressão de vapor cresce exponencialmente (conforme mostra a Figura 2), aumentando a razão 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 (creosotos, piches, dentre outros) o aumento de temperatura também faz com que a pressão de vapor aumente exponencialmente fazendo com que a viscosidade decresça exponencialmente, decrescendo também as tensões interfaciais e aumentando desta maneira a permeabilidade relativa destes tipos de compostos.

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. O efeito da temperatura na solubilidade é dependente do composto químico, sendo que normalmente a pressão de vapor cresce com a temperatura, conforme ilustra a Figura 2. Em geral, quando um composto químico é aquecido, a sua densidade diminui, sendo a sua pressão de vapor aumentada. Sua adsorção na fase sólida ou na matéria orgânica é diminuída e sua difusão molecular na fase aquosa e gasosa é aumentada. Dados têm mostrado que o coeficiente de difusão em líquidos é proporcional a temperatura.

O processo de difusão em gases é muito maior do que em líquidos. Como a viscosidade de gases é aproximadamente duas ordens de magnitudes menor que a viscosidade de líquidos, a conversão de um líquido em um gás irá aumentar em muito a sua mobilidade, facilitando assim a sua remoção.

Num solo, quanto maior a quantidade de matéria orgânica, torna-se mais difícil de se retirar o contaminante, até mesmo com aquecimento, e quanto menor o teor de matéria orgânica maior será a quantidade de contaminante na fase água e ar.

Contaminantes com os menores pontos de ebulição geralmente têm maior pressão de vapor. Para compostos com alto ponto de ebulição e 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.

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

A Tabela 3 mostra as propriedades de alguns contaminantes orgânicos. Esta tabela foi elaborada com base em Davis, 1997 tendo sido acrescentados alguns contaminantes. É interessante se notar a quantidade de contaminantes com o ponto de ebulição inferior a 100°C.

Tabela 3 – Propriedades de alguns compostos orgânicos que tem sido encontrados em áreas contaminadas.

Contaminante Orgânico	Ponto de Ebulição (°C)	Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (25°C)	Solubilidade na água (mg/L)	Pressão de vapor (mmHg)	
					10°C	50°C
Diclorometano	40	1,3182 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 Sis-Dicloroetileno	60	1,2649 25°C	0,445	800 a 20°C	104,8	580,0
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	90,0	485,3
N-Hexano	68,7	0,659	0,300	9,5	80,8	407,5
1,1,1-Tricloroetano	74,1	1,3303 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 25°C	0,908	800 a 20°C	58,3	332,8
2- Butanone (metil-etil cetona)	79,6	0,7994 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 25°C	0,894	58 a 25°C	50,5	272,3
Tricloroetileno – TCE	87,3	1,4578 25°C	0,545	1100 a 25°C	37,6	256,7
Tolueno	110,6	0,8647 25°C	0,56	515 – 540 a 25°C	14,3	579,1 100°C
Tetracloroetileno - PCE	121,3	1,613 25°C	0,844	150 a 25°C	9,0	400 100°C
N- Octano	126	0,6986 25°C	0,508	0,7 a 20°C	6,5	368,7 100°C
Clorobenzeno	131,7	1,1007 25°C	0,753	490 a 25°C	6,9	323,7 100°C
Etilbenzeno	136,2	0,8654 25°C	0,631	160 a 25°C	6,0	295,7 100°C
Xileno	138,4	0,8577	0,608	160 a 25°C	4,5	238,9 100°C
Dicloro-benzeno	173	1,2988 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 20 °C		190 a 20°C	8,8	
Cloroetano		0,65 20 °C		5710 a 20°C	755	
HCH	65	1,87				
Hexadecano	286,9	0,773	3,032	0,0063	<1	<1