

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

Este tópico inicial apresentará, de forma concisa, uma abordagem geral sobre a relação predatória entre o homem e o meio ambiente, mostrando de forma simples como o lado ideológico da questão progrediu objetivamente até se concentrar em assuntos atuais como o gerenciamento de áreas contaminadas, período no qual já se verificou a ocorrência de um impacto ambiental e quando, conseqüentemente, se deve optar pela forma de se tentar remediar o local, objeto de estudo desta dissertação.

#### 2.1.1. Questões Ambientais

Um impacto ambiental é caracterizado quando o ar, a água, ou o solo sofrem qualquer tipo de mudança em seu estado comum afetando, de alguma forma, o ecossistema ali presente (fontes diversas). Apesar de poderem ser classificados como positivos ou negativos, é inegável que, quando se trata desta questão, a maior preocupação está relacionada aos impactos ambientais negativos, ou seja, aqueles que resultam em algum dano ou prejuízo a um ou mais destes meios já citados.

Uma busca à literatura mais recente ou até mesmo às notícias veiculadas pelos meios de comunicação – *e.g.* televisão, jornais ou revistas – permite listar alguns dos maiores responsáveis pelos problemas ambientais atuais, os quais estão mostrados na Tabela 2.1 a seguir. Como será observado, todas as atividades são decorrentes da ação antrópica, o que mostra que o homem vem degradando o meio ambiente em escala progressiva há pelo menos dois séculos, ou seja, desde a Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra ao final do século XVIII.

As conseqüências globais, resultantes do somatório de impactos ambientais locais provocados, são facilmente perceptíveis nos dias de hoje, com as

constantes alterações climáticas, aumento do buraco na camada de ozônio, derretimento das calotas polares, extinção de espécies de flora e fauna, além da má utilização dos recursos hídricos no planeta, constituindo o quadro ambiental ao qual o mundo se encontra atualmente.

Tabela 2.1 – Atividades Potencialmente Poluidoras

| Tipos de Atividades        | Principais fontes poluidoras   | Principais aspectos ambientais  | Principais tipos de contaminantes  | Impactos ambientais locais ou regionais  |
|----------------------------|--|---|--|--|
| <b>Produção</b>            | Usinas nucleares; mineração; plataformas marítimas; refinarias; fábricas e indústrias em funcionamento e/ou abandonadas; | Disposição de resíduos e/ou rejeitos; utilização excessiva de produtos químicos;  | Elementos radioativos; petróleo bruto ou derivados; produtos químicos em geral; gases tóxicos; | Poluição do ar; contaminações de água e solo devido a acidentes em geral (explosões, vazamentos ou derramamentos). |
| <b>Comércio</b>            | Postos de serviços; oficinas mecânicas; lavanderias; construção;   |   | Combustíveis; resinas; solventes; detergentes; gases tóxicos;                                  |  |
| <b>Agropecuária</b>        | Plantações e cultivos diversos; criação de animais; exploração de madeira;   | Uso predatório do solo e da vegetação; utilização excessiva de produtos químicos; | Agrotóxicos; pesticidas;   | Desmatamento; poluição do ar contaminações de água e solo;   |
| <b>Meios de Transporte</b> | Rodoviários, ferroviários, aéreos e aquáticos em geral;  | Transporte de cargas potencialmente poluidoras;                                   | Combustíveis; CO <sub>2</sub> ; produtos químicos transportados;                               | Poluição do ar; contaminações de solo e água devido a acidentes;   |
| <b>Outras</b>              | Residências; hospitais e clínicas; demais atividades;  | Disposição de resíduos sólidos urbanos e esgoto;                                  | Lixo; resíduo hospitalar; elementos radioativos; esgoto sanitário;                             |  |

Somente há algumas décadas é que se verificou um aumento com relação às preocupações que concernem estas questões. Assim, acordos e tratados (ex: Protocolo de Kyoto) foram e continuam sendo debatidos e estabelecidos por líderes de governo de todo o mundo, além de inúmeras iniciativas reativas e pró-ativas partindo da própria sociedade – e das indústrias, mais recentemente – cujos resultados podem ser vistos em, basicamente, três frentes:

1. **Criação de legislações ambientais rigorosas**, como forma de delimitar as transgressões do homem à natureza (no Brasil, o Direito Ambiental é

baseado em alguns princípios, dentre eles o da precaução/prevenção<sup>1</sup>, e o do poluidor/pagador<sup>2</sup>);

2. **Implementação de ferramentas de gestão**, no sentido de se tentar compatibilizar os objetivos econômicos de um determinado empreendimento às normas e padrões ambientais vigentes;
3. **Desenvolvimento de novas tecnologias**, de modo a fornecer o todo o apoio e infra-estrutura necessários para que as indústrias em geral continuem se desenvolvendo, porém com maior eficiência e, principalmente, de maneira segura e ambientalmente correta.

No entanto, mesmo com todas essas ações, inúmeros problemas ambientais continuam sendo detectados, o que mostra que a relação entre indústria, sociedade e meio ambiente ainda está longe de estar totalmente consolidada. Muitos acidentes envolvendo derramamentos de produtos perigosos em solos ou águas, bem como emissões líquidas e gasosas de poluentes nos corpos hídricos e na atmosfera, respectivamente, ainda são bastante observados em todo o mundo. E, como já se sabe, grande parte dos prejuízos causados à natureza tornam-se extremamente difíceis de serem remediados em sua plenitude, podendo inclusive despende de um extenso período de tempo (décadas ou mais) para tal realização.

Nestes casos, porém, espera-se que a existência de leis que punam as partes envolvidas com multas ou sanções consideravelmente altas, além de obrigá-las a se responsabilizarem pelas áreas prejudicadas e pelos seus danos correspondentes, entrem, de certa forma, estes ocorridos. Por outro lado, observa-se a ineficácia das autoridades de diversos países em policiar e fiscalizar estas inúmeras ocorrências, como é o caso do Brasil, país de extensão continental, cujas limitações da maioria dos órgãos ambientais beiram o descaso, apesar da legislação ambiental ser extremamente exigente e respeitada no mundo todo.

---

<sup>1</sup> O **princípio da precaução/prevenção** está claramente mostrado no Artigo 225, §1º, IV, da **Constituição Federal**, ao “exigir, na forma da lei, para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, estudo prévio de impacto ambiental, ao qual se dará publicidade”.

<sup>2</sup> O **princípio do poluidor/pagador** impõe ao poluidor a obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados ao meio ambiente à vista dos seguintes elementos: (i) o dano; (ii) a verificação de quem o tenha provocado; e (iii) a existência de um nexo de causalidade entre um e outro (Walacer & Graça Couto, 2003).

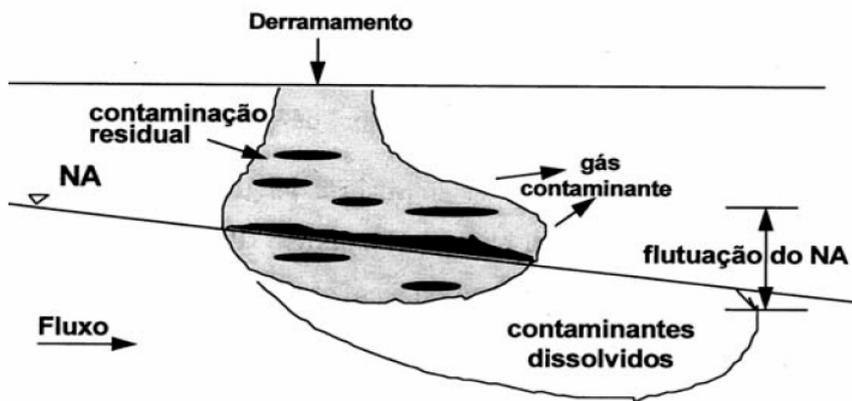
Com a dificuldade em se controlar possíveis “acidentes”, a questão da remediação de áreas contaminadas por produtos potencialmente causadores de algum dano ao ecossistema ou à saúde humana vem sendo tratada com grande relevância por parte das empresas – o maior exemplo é a **PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A** – e dos órgãos governamentais, a partir do **Ministério do Meio Ambiente**. Atualmente, inúmeros trabalhos de pesquisa, como estes que vêm sendo estabelecidos pelo **Núcleo de Geotecnia Ambiental – NGA** da **Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**, são realizados em instituições de todo o mundo na tentativa de se buscar novas tecnologias para combater esta problemática. Obviamente, por disponibilizarem de um maior capital financeiro, os países mais desenvolvidos sempre obtiveram maiores chances e opções de introduzir e implementar novas técnicas, desenvolvendo assim, ao longo do tempo, métodos cada vez mais sofisticados e capazes de obter bons resultados em locais que tenham sofrido algum prejuízo ambiental. Aliado a isto, está o fato deles possuírem uma boa política ambiental.

Contudo, nos dias de hoje, observa-se que é possível desenvolver tecnologias compatíveis em países de menor poder aquisitivo, como é o caso do Brasil, onde estas pesquisas voltadas para a área de meio ambiente crescem cada vez mais e produzem resultados bastante satisfatórios. Além do capital intelectual existente, parcerias entre instituições universitárias, empresas e os órgãos de pesquisa são vistas como fundamentais para que projetos desta área sejam desenvolvidos em maior quantidade e com maior qualidade. E, aos poucos, é isto o que vem ocorrendo, como pode ser visto na relação entre o **NGA/PUC-Rio**, companhias estatais / empresas privadas, além dos órgãos públicos de apoio à pesquisa, com trabalhos voltados para a inovação tecnológica, bem como o intercâmbio de experiências e conhecimentos. Apesar de isso ocorrer em mais algumas instituições acadêmicas, tal exemplo deveria ocorrer com mais frequência no Brasil.

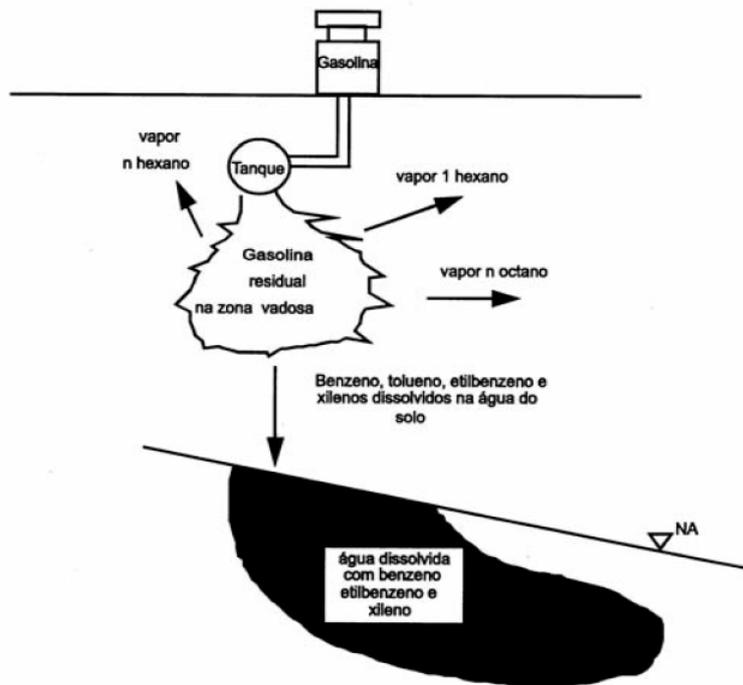
### **2.1.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas**

Quando ocorre um evento, em geral um acidente, onde há a liberação de compostos químicos sob fase líquida, o material derramado se acumula no terreno (asfalto, chão de fábrica ou solo aberto) e, dependendo das suas características, passa a se infiltrar no solo. Durante a sua percolação, o

contaminante pode ser adsorvido pelos grãos do solo ou se mobilizar livremente pelos seus poros. Aos poucos, ele vai se dispersando no meio, passando a percorrer caminhos que são influenciados diretamente pelas propriedades físico-químicas do solo – granulometria, permeabilidade, condutividade térmica, porosidade, pH, dentre outras. Um dos seus destinos, por exemplo, pode ser um corpo hídrico a partir do qual ele, possivelmente, se dispersará com maior facilidade e, conseqüentemente, causará maiores danos ao meio ambiente e às demais partes envolvidas.



a)



b)

Figura 2.1(a) e (b) – Casos de contaminação do solo (apud Bicalho, 1997)

Na Figura 2.1, mostrada na página anterior, observam-se dois casos típicos de contaminação do solo e lençol freático por compostos químicos orgânicos. No primeiro caso – Figura 2.1 (a) – ocorre um derramamento na superfície do terreno que, em geral, é imediatamente perceptível por quem se encontra junto ao local ou por quem causou o problema. Já no segundo caso – Figura 2.1(b) – o vazamento ocorre a partir de um tanque de armazenamento subterrâneo, algo bastante comum nos postos de combustíveis existentes no Brasil<sup>3</sup>, e que, muitas vezes, só se torna perceptível após algum tempo. Em ambos os casos ilustrados, o contaminante percola pelo solo em direção a um meio que sirva como barreira (seja pela menor permeabilidade, seja por outras características físicas) ou às águas subterrâneas, onde ele inclusive poderá se dispersar com maior facilidade, potencializando o problema.

O fato é que, obviamente, quanto mais tempo se demora em se observar que está ocorrendo algum tipo de vazamento, sobretudo em casos semelhantes ao da Figura 2.1(b), ou quanto mais lentos são procedidos os planos de emergência para se tentar sanar o problema, maiores serão os danos ambientais e os seus riscos associados (contaminação de solo, água, explosões e outros). Logo, o gerenciamento da área contaminada torna-se mais dispendioso e com grandes chances de ser menos eficaz.

O campo de pesquisa que envolve a remediação de locais que sofreram danos ambientais como estes mostrados acima é, de certa forma, extenso. Como se sabe, o planejamento para escolha da técnica a ser utilizada depende de importantes fatores, os quais só podem ser determinados a partir de uma detalhada investigação geo-ambiental a ser realizada no próprio local contaminado. Os principais fatores estão apresentados a seguir:

- **Identificação das fontes primárias e secundárias de contaminação;**
- **Identificação do tipo de contaminante e suas características físico-químicas** (composição, concentrações, volatilidade, solubilidade,

---

<sup>3</sup> De acordo com dados fornecidos pela **Agência Nacional de Petróleo – ANP**, existem 33.620 postos revendedores de combustíveis automotivos cadastrados em todo o Brasil. No entanto, dados estatísticos e estimativas de diversos estados indicam que grande parte deles se encontra em condições críticas de funcionamento, ou seja, apresentando grandes problemas de vazamento (Viana, 2004).

cosolvência, pH, dentre outras) e de mobilidade (dispersão, advecção, difusão, adsorção e decaimento em relação ao meio);

- **Determinação da intensidade da contaminação** (se possível, quantificação e extensão da pluma) e **possíveis locais de influência**;
- **Identificação das características hidrogeológicas** – localização georeferenciada, tipo de solo, presença de nível freático, condições de fluxo – e **ambientais da região contaminada e de locais próximos a ela**;
- **Determinação do risco de este evento causar algum dano às partes envolvidas no processo**, em geral ao homem e ao ecossistema.

De posse destes, o gestor da área irá avaliar, dentre as tecnologias de remediação que se aplicam ao caso, os aspectos que levam em consideração as vantagens e desvantagens acerca da viabilidade física da sua aplicação – *in situ*, *on site* ou *off site* – bem como o tempo que elas necessitariam para obter os melhores resultados. Por fim, e talvez o aspecto que é mais levado em consideração, há os custos financeiros associados à sua utilização.

Atualmente, existem algumas técnicas amplamente conhecidas e utilizadas no mercado, que se diferenciam umas das outras a partir de especificidades como aplicabilidade, eficiência, estrutura e o custo de implementação.

Outro tipo de distinção entre elas se refere à sua funcionabilidade, ou seja, qual é o seu objetivo durante a remediação. Para isso, de acordo com Duarte (2004), há os chamados “métodos de tratamento”, que visam reduzir / eliminar a concentração e/ou a toxicidade dos contaminantes, e os denominados “métodos de confinamento”, que objetivam apenas a redução da mobilidade do contaminante.

Segundo Wood (1997) ainda há outra maneira de se classificar a execução das tecnologias de remediação, conforme mostrado a seguir:

- **Métodos geotécnicos**: remoção para tratamento *on site* ou *off site*, juntamente com o uso de formas de contenção (barreiras hidráulicas, por exemplo);

- **Técnicas processuais:** processos físicos, químicos e biológicos de estabilização e/ou solidificação e processos térmicos que são realizados, na maioria das vezes, *in situ*.

A Tabela 2.2, a seguir, apresenta algumas das técnicas direcionadas para remediação de solos, classificando-as de acordo com as tipologias apresentadas.

Ressalta-se a dificuldade em se determinar exatamente o custo total de algumas técnicas, já que muitas delas contêm despesas relacionadas com a remoção e o transporte do material contaminado, dentre outras, o que pode encarecê-la proporcionalmente. Outro fator importante diz respeito à variedade de tecnologias que podem representar a mesma técnica (ex: vários tipos de ‘*pump-and-treat*’), o que também pode incorrer em mudanças de custos.

Faz-se necessário observar também que as técnicas podem ser utilizadas tanto isoladamente quanto em conjunto com outras e, em geral, isto pode ocorrer quando há uma influência positiva entre elas, ou seja, quando uma auxilia ou aumenta a eficiência da outra. Baker *et al* (2004), em um caso de remediação de um sítio contaminado por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, em Massachussets, Estados Unidos, utilizaram, *a priori*, o bombeamento, para retirar parte da fase líquida mais densa (DNAPL – *dense non-aqueous phase liquid*) para, em seguida, utilizar a dessorção térmica *in situ* (detalhes da técnica serão descritos a partir dos próximos tópicos) para reduzir a presença de compostos orgânicos voláteis (VOC – *volatile organic compounds*) e semi-voláteis (SVOC – *semi-volatile organic compounds*).

Tabela 2.2 – Técnicas de remediação de solo e água existentes no mercado (fontes diversas)

| Técnica  | Aplicabilidade            | Funcionalidade (Duarte, 2004) | Forma de Execução (Wood, 1997) | Custo (U\$) (Wood, 1997) |
|--|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| ' <i>Pump and Treat</i> ' (bombeamento e tratamento)         | <i>In Situ / On Site</i>  | Tratamento                    | Método Geotécnico              | Não encontrado           |
| ' <i>Vacuum Enhanced Recovery</i> '                          | <i>In Situ / On Site</i>  | Tratamento                    | Método Geotécnico              | Não encontrado           |
| Lavagem (de solo ou físico-química)                          | <i>Off Site / On Site</i> | Tratamento                    | Técnica Processual             | 90 – 450/t               |
| Eletrocinese   | <i>In Situ</i>            | Tratamento                    | Técnica Processual             | 72 – 216/t               |
| Estabilização/Solidificação                                  | <i>In Situ / On Site</i>  | Tratamento/ Confinamento      | Técnica Processual             | 108 – 198/t              |
| Incineração  | <i>On Site / Off Site</i> | Tratamento                    | Método Geotécnico              | 90 – 2160/t              |
| Vitrificação   | <i>On Site / Off Site</i> | Tratamento/ Confinamento      | Técnica Processual             | 54 – 900/t               |
| Extração de Vapor do Solo (' <i>Soil Vapor Extraction</i> ') | <i>In Situ / On Site</i>  | Tratamento                    | Método Geotécnico              | 18 – 162/t               |
| Barreiras Reativas   | <i>In Situ</i>            | Tratamento                    | Técnica Processual             | Não encontrado           |
| Barreiras Hidráulicas  | <i>In Situ</i>            | Confinamento                  | Método Geotécnico              | Não encontrado           |
| Biorremediação   | <i>In Situ</i>            | Tratamento                    | Técnica Processual             | 9 – 288/t                |
| Fitorremediação  | <i>In Situ</i>            | Tratamento                    | Técnica Processual             | Não encontrado           |
| Atenuação Natural  | <i>In Situ</i>            | Tratamento                    | Técnica Processual             | Zero                     |

Uma vez definida(s) a(s) técnica(s) a ser(em) utilizada(s), resta apenas o licenciamento do projeto, por parte de órgão ambiental. No Brasil, de acordo com o artigo 2º, parágrafo 1º, da **Resolução CONAMA nº 237 de 1997**, a recuperação de áreas contaminadas ou degradadas está sujeita ao licenciamento ambiental, o qual é fornecido mediante entrega e aprovação do Estudo de Impacto Ambiental<sup>4</sup> – EIA, e respectivo Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente<sup>5</sup> – RIMA, “ao qual dar-se-á publicidade, e lhe será garantida a realização de audiências públicas<sup>6</sup>, quando couber, de acordo com a

<sup>4</sup> **Estudo de Impacto Ambiental:** estudo realizado por equipe multidisciplinar, a fim de se detectarem e analisarem todos os danos causados aos meios antrópico, físico e biológico, além dos recursos ambientais antes, durante e após o tratamento, contemplando ainda alternativas tecnológicas para solução do problema (**Resolução CONAMA 01/86**)

<sup>5</sup> **Relatório de Impacto Ambiental:** resumo do EIA em linguagem clara e acessível apresentando, principalmente, as suas conclusões (**Resolução CONAMA 01/86**)

<sup>6</sup> **Audiências Públicas:** São legitimados a convocá-las o Ministério Público, Organizações Não-Governamentais – ONGs e um mínimo de 50 pessoas, devem ser avisadas com 15 dias de antecedência e publicadas no Diário Oficial e em mais dois jornais de grande circulação (**Resolução CONAMA 09/87**)

regulamentação”. Este documento, bem como todo o projeto, será avaliado pelo órgão competente – federal, estadual ou municipal – e discutido durante as audiências, podendo, inclusive, serem exigidas alterações ou mudanças, as quais deverão ser devidamente cumpridas.

Depois de liberada a licença, o gestor da área contaminada estará apto a realizar o serviço de remediação. A partir daí, faz-se necessário um monitoramento contínuo da sua ação, a fim de se atingirem os objetivos traçados inicialmente. No caso destes não serem alcançados durante o período de tempo estipulado, o projeto deverá ser revisto e reformulado.

## 2.2. Dessorção Térmica

Uma das técnicas não apresentada na Tabela 2.2 do tópico anterior, e objeto de estudo desta dissertação, é a dessorção térmica. Estudos bibliográficos mostram que ela foi implementada há mais de dez anos, nos Estados Unidos, por uma divisão da **Royal Dutch Shell** que, por sua vez, passou a fabricar sistemas com instrumentos que aplicassem este tipo de técnica (**TerraTherm Inc.**).

Já no Brasil, ela vem sendo desenvolvida pelo **NGA/PUC-Rio** há cerca de sete anos, como pode ser observado nos trabalhos realizados por Portes (2002), Pires (2004), Duarte (2004) e Baptista (2004).

Seu principal objetivo é tentar remediar solos que tenham sofrido algum tipo de contaminação orgânica – organoclorados; hidrocarbonetos derivados do petróleo; hidrocarbonetos policíclicos aromáticos; dioxinas; pesticidas; e outros resíduos orgânicos – por meio do seu aquecimento direto sob altas temperaturas.

A importância de existir uma tecnologia alternativa como esta e, principalmente, que pode ser fabricada no Brasil, tem três motivos básicos:

1. Tentar oferecer ao mercado nacional uma tecnologia limpa (sem a utilização de produtos químicos), eficiente e com baixo custo de operação em relação às outras;

2. Apresentar uma resistência às tecnologias ofertadas por empresas estrangeiras;
3. Motivar outras instituições/empresas brasileiras a se esforçarem com este mesmo sentido.

Como amostra do seu potencial de mercado está o fato de que a produção mundial de produtos químicos orgânicos sintéticos atinge cerca de 200 milhões de toneladas todo o ano. Na década de 90, por exemplo, existiam mais de 70.000 produtos químicos comerciais apenas nos Estados Unidos, sendo introduzidos 3.000 novos produtos a cada ano (Catallo & Portier, 1992). E, de acordo com a agência americana de proteção ambiental (**USEPA – U. S. Environmental Protection Agency**), 65 classes destas substâncias são consideradas perigosas por causa dos seus efeitos tóxicos, carcinogênicos e teratogênicos<sup>7</sup> (*apud* Moreira & Siqueira, 2002).

Além disso, todo esse potencial petrolífero observado atualmente no Brasil, tanto 'on shore' (Recôncavo Baiano, por exemplo), quanto 'off shore' (Bacia de Campos, litoral do Paraná, Espírito Santo e outros), também o coloca como um país potencialmente poluidor, o que igualmente representa um grande campo de atuação para este tipo de tecnologia. Apenas como observação, as atividades 'off shore' não geram resíduos, apesar de possuírem um grande risco de causar impactos ambientais. As principais fontes, neste caso, são os trabalhos de refino do óleo.

A título de ilustração, a Tabela 2.3, mostrada a seguir, apresenta algumas das atividades industriais que podem gerar contaminação de resíduos orgânicos em solos e águas subterrâneas, em contraste com os inorgânicos, juntamente com o nível de risco associado a um possível acidente, condição esta que, em geral, pode ser proporcional à magnitude do empreendimento:

Esta tabela também mostra a importância deste tipo de resíduo – contaminantes orgânicos – na intensa fase industrial na qual o mundo se encontra. Logo, os seus potenciais riscos associados estão constantemente presentes nos dias de hoje e, portanto, requerem maiores cuidados.

---

<sup>7</sup> **Teratogenia:** formações e desenvolvimento de anomalias no útero que levam à malformação (Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa)

Tabela 2.3 – Tipo e risco de contaminação provenientes das atividades industriais (fontes variadas, *adapt. Viana, 2002*)

| Atividade Industrial   | Contaminação        | Nível de Risco |
|--|---------------------|----------------|
| Tratamento e armazenagem, de produtos perigosos; aterros sanitários; lixões                      | Orgânica/Inorgânica | Alto           |
| Refinarias e produção petroquímica   | Orgânica/Inorgânica |                |
| Produção de compostos químicos orgânicos   | Orgânica            |                |
| Produção de compostos químicos inorgânicos   | Inorgânica          |                |
| Produção de pesticidas   | Orgânica            |                |
| Extração e processamento de minérios   | Inorgânica          |                |
| Lavagem / Reciclagem de tambores e tanques   | Orgânica            |                |
| Produção de fertilizantes  | Inorgânica          | Mediano        |
| Garagens / Postos de serviços  | Orgânica            |                |
| Processamento de minerais (cimento, tijolos, etc), matérias de construção civil e metalomecânica | Inorgânica          |                |
| Produção de têxteis e tinturaria   | Orgânica            |                |
| Produção de produtos de madeira  | Orgânica            |                |
| Trabalhos de impressão   | Orgânica            | Baixo          |
| Produção de veículos   | Orgânica            |                |
| Produção de produtos detergentes e desinfetantes   | Orgânica            |                |

Com relação ao princípio da dessorção térmica, propriamente dito, ele parte basicamente da relação direta entre pressão e temperatura. O processo de dessorção é o inverso ao da adsorção (Sracek, 2005).

Portanto, sabendo-se que a pressão de vapor de um contaminante cresce com a elevação da temperatura – conforme se pode observar na equação de Antoine, mostrada abaixo – é possível remover a sua fase líquida, que se encontra nos vazios ou absorvida às partículas sólidas de um meio poroso, transformando-a em fase gasosa a partir da simples aplicação de calor:

$$\ln P_{\text{vapor}} = A - \left( \frac{B}{T + C} \right) \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

- $P_{\text{vapor}}$ : pressão de vapor do contaminante [ $\text{kg.m/s}^2$ ];
- A, B e C: constantes;
- T: temperatura do contaminante [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Ademais, o fato de se impor um alto grau de temperatura em um solo contaminado implica em um aumento na volatilidade dos contaminantes, taxa de transferência de massa, evaporação e na taxa de difusão, além de catalisar as suas reações químicas (Duarte, 2004).

Logo, à medida que se aumenta esta pressão de vapor, aumenta-se a transferência de massa da fase líquida do contaminante para a fase gasosa e este fluxo de energia pode se dar até que esta primeira fase seja completamente suprimida. Durante este período, modificam-se as viscosidades do contaminante e da água, a tensão superficial entre o contaminante e a fase gasosa, e a solubilidade efetiva do contaminante (Duarte, 2004).

Baseado nisso, foram desenvolvidos alguns modelos básicos de protótipos – diferenciados pela sua estrutura e forma de aplicação – capazes de transferir calor para o material ao qual se deseja descontaminar. Suas características serão detalhadas ao longo do texto.

Porém, basicamente, quando um deles entra em funcionamento, ao ser colocado em contato direto com o solo, passa a emitir calor que, ao longo do tempo e dependendo das características do meio poroso e da potência calorífica empregada, se propaga. Conforme explicações anteriores, no momento em que a temperatura do solo, aplicada por este aparelho, supera o ponto de ebulição do contaminante, este começa a ser volatilizado, independentemente se ele se localizava nos poros ou adsorvido às partículas de solo.

Ressalta-se aqui que podem haver níveis mais baixos de temperatura onde alguns compostos destes contaminantes já são volatilizados, como é o caso da gasolina, onde a temperatura de ebulição dos compostos BTEX – benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, componentes mais comumente encontrados na gasolina brasileira – varia conforme a Tabela 2.4, mostrada na página seguinte.

Neste caso, por exemplo, alguns estudos realizados e casos reais publicados por algumas instituições privadas, dentre elas a **TerraTherm Inc.**, estimam que a temperatura a ser aplicada para que o contaminante líquido seja completamente volatilizado do solo, e em maior parte destruído, seja de cerca de 400°C. Entretanto, quando este composto encontra-se em solos, este valor será proporcional ao volume a ser aquecido e ao tempo de aplicação do calor, o que também é observado pela companhia supra-citada.

Tabela 2.4 – Ponto de Ebulição dos BTEX (Davis, 1997, *apud* Baptista, 2004)

| Compostos BTEX     | Ponto de Ebulição (°C) | Densidade (mg/m <sup>3</sup> ) | Viscosidade (a 25°C) | Solubilidade em água (mg/L) | Pressão de Vapor (mm de Hg) |          |
|--------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|
|                    |                        |                                |                      |                             | 10°C                        | 50°C     |
| <b>Benzeno</b>     | 80,1                   | 0,880                          | 0,604                | 1.770 *                     | 47,8                        | 307,8    |
| <b>Etilbenzeno</b> | 136,2                  | 0,865 *                        | 0,631                | 160 *                       | 6,0                         | 295,7 ** |
| <b>Tolueno</b>     | 110,6                  | 0,865 *                        | 0,560                | 515 a 540 *                 | 14,3                        | 579,1 ** |
| <b>Xileno</b>      | 138,4                  | 0,858                          | 0,608                | 160 *                       | 4,5                         | 238,9 ** |

\* a 25°C

\*\* a 100°C

A Tabela 2.4 mostra também algumas propriedades físico-químicas destes compostos as quais são constantemente modificadas quando submetidas a altas variações de temperatura, conforme será explicado posteriormente.

Mas, voltando à idéia da aplicação da dessorção térmica, quando a fase líquida é transformada em fase gasosa, ela passa a se mobilizar livremente pelos vazios do solo, tornando-se assim, mais simples de ser removida da região onde se encontra, caso sejam utilizados sistemas a vácuo eficientes e bem distribuídos espacialmente ao longo de todo o volume de solo. Posteriormente, todo material aspergido pode ser destruído ou tratado de maneira adequada.

Um dos pontos contrários à utilização da dessorção térmica para remediar solos contaminados por compostos orgânicos é a possibilidade do surgimento de dioxinas a partir das reações físico-químicas dos contaminantes quando submetidos a altas temperaturas. As dioxinas são emissões gasosas que representam um grande grupo de compostos orgânicos altamente tóxicos e que podem ser letais à saúde humana em pequenas concentrações (DQ/UFSC, 1999). Em geral, são originadas de produtos que contêm cloro, no entanto é possível que haja o seu aparecimento a partir de outros compostos.

Com relação a isto, ainda são necessários mais estudos científicos para se ter uma maior certeza sobre o assunto.

Com relação aos demais gases, tipicamente procura-se captá-los e direcioná-los para um sistema de tratamento físico-químico próprio para contaminantes orgânicos, contendo elementos como oxidadores, condensadores, separadores de líquido e filtros de carvão ativado, dentre outros, cada um exercendo a sua função específica, conforme mostrado a seguir:

- **Oxidador:** possui uma resistência elétrica interna que, ao ser acionada, oxida os contaminantes gasosos sob altas temperaturas (até 1200°C);
- **Condensador:** classificado como um “trocador de calor”, objetiva a redução da temperatura dos gases/líquidos provenientes do oxidador por meio de uma serpentina situada dentro de uma outra de maior diâmetro e que possui, internamente, um outro fluido/gás de menor temperatura;
- **Separador de líquidos:** Como o próprio nome já diz, consiste em um aparelho que separa a fase líquida da fase gasosa do efluente proveniente do condensador.
- **Filtro de Carvão Ativado:** aparelho utilizado para reter ou absorver as emissões gasosas, ainda restantes, produzidas durante todo o processo, impedindo que elas sejam lançados à atmosfera.
- **Outros: coletor de gases, coletor de efluentes, separador água/óleo, bomba a vácuo e etc.**

De acordo com Baker & Kuhlman (2002), a maioria dos contaminantes orgânicos – entre 95 e 99%, ou mais – quando submetida a altas temperaturas e sob um longo tempo de aplicação, é destruída antes de chegar à superfície, o que faz com que a massa total de contaminante volatilizado a ser tratada seja muito reduzida.

Portanto, a minoria que não é destruída, ainda no solo, é direcionada ao sistema de tratamento de gases, onde então se espera que seja completamente destruída ou, caso ainda permaneça algum resíduo, que ele esteja dentro dos limites constados nos padrões e normas ambientais vigentes. Posteriormente, ele pode receber um novo tratamento, ser lançado à atmosfera, ou re-transformado em líquido e receber outro destino adequado.

Ou seja, dependendo da natureza do contaminante, das solicitações dos órgãos ambientais e de interesses comerciais do projeto em questão, estes gases podem ser novamente transformados em fase líquida, sendo reaproveitados posteriormente – em geral, isto pode ocorrer com os resíduos oleosos utilizados como combustíveis, cuja fase gasosa pode ser condensada (transformação do gás em líquido) – e, assim, retornados à indústria para serem usados para outros fins.

Assim como realizado com as técnicas de remediação apresentadas na Tabela 2.2 do tópico anterior, a Tabela 2.5, a seguir, mostra a classificação das técnicas que utilizam o princípio da dessorção térmica, as quais serão mais detalhadas nos tópicos seguintes:

Tabela 2.5 – Classificação generalizada das técnicas de dessorção térmica

| Técnica                  | Aplicabilidade                   | Funcionalidade (Duarte, 2004) | Forma de Execução (Wood, 1997) | Custo (U\$/ton) (TerraTherm, 2001) |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| <b>Dessorção Térmica</b> | <i>In Situ</i> ou <i>On Site</i> | Tratamento                    | Processuais                    | De 50 a 250                        |

Porém, para melhor se conhecer a tecnologia a qual está sendo tratada, faz-se necessário um vasto conhecimento sobre o que ocorre nos meios físico, biótico e junto aos contaminantes orgânicos, quando são aplicadas altas temperaturas, ou seja, acima de 400°C, independentemente da remoção do composto. Para isso, o presente trabalho apresentará os tópicos a seguir.

### 2.2.1. Influência das Altas Temperaturas nas Propriedades do Solo

Uma outra fonte de discussão acerca da utilização da dessorção térmica como técnica de remediação de solos diz respeito à influência das altas temperaturas nas propriedades físico-químicas do solo. Questionamentos relacionados a possíveis danos à sua parte estrutural se mostram realmente pertinentes, conforme será mostrado a seguir.

Embora este problema seja real, ficam as perguntas: O que seria mais importante? Utilizar uma técnica limpa e extremamente eficiente, cujo custo é relativamente inferior às demais, tendo assim um solo isento da presença de contaminantes, mesmo que este venha a sofrer algumas conseqüências geradas pela aplicação de calor, ou utilizar outra tecnologia de tratamento mais onerosa, possivelmente com eficiência inferior e tempo maior de aplicação, contudo trazendo menores ou quaisquer conseqüências ao solo?

A resposta, a princípio, depende das conseqüências as quais o solo poderá vir a sofrer e, eventualmente, se estes danos poderão ser prejudiciais ao tipo de uso

ao qual ele está sendo destinado. Eventualmente, aquele pode ser um solo destinado às atividades agropecuárias, por exemplo.

Por outro lado, outra pergunta pode ser feita: será que haveria maneiras de se recuperá-lo, executando algum tipo de pós-tratamento?

Perguntas como essas possuem grande relevância, uma vez que há dois fatores importantes, os quais o empregador da tecnologia deverá saber. A primeira diz respeito à questão ética, já que ele estará sendo pago para prestar um serviço de remediação ao local já contaminado e não poderá, sob este ponto de vista, devolver a área ao cliente com outros problemas “desconhecidos”. E a outra diz respeito ao órgão ambiental, que fornecerá a licença, e que certamente fará estas mesmas perguntas.

Então, para se tentar respondê-las, ou ao menos fornecer condições e base para discuti-las melhor, é necessário um maior conhecimento sobre o assunto. Para isso, algumas fontes bibliográficas, além de especialistas no tema, foram consultados e o resultado está mostrado no texto que se segue.

De acordo com Antunes (2006), os solos arenosos, devido a sua estrutura e propriedades físico-químicas, não sofrem quaisquer danos relativos ao seu contato com temperaturas até 900°C. O que pode haver é uma redução no volume total do terreno devido à evaporação da água contida nos poros do solo, o que passa a ocorrer a partir de 100°C. Porém, em princípio, nada ocorre com o grão de areia em si.

No entanto, segundo Antunes (*op. cit.*), os solos que contêm argilominerais sofrem mudanças significativas quando submetidos a altas temperaturas. A partir de 100°C, os grãos começam a perder sua água adsorvida, ou seja, aquela que se encontra adjacente às suas camadas mais externas. Já sob temperaturas que variam entre 450 e 600°C, estes argilo-minerais passam a perder sua água estrutural (oxidrilas-OH), também chamada de água de constituição, processo este considerado irreversível. A partir daí, há um novo arranjo estrutural do solo.

No trabalho de Duarte (2004), foi observado que um aumento de temperatura pode acarretar em mudanças na granulometria, limites de consistência, troca catiônica, pH e coloração dos grãos, principalmente quando o solo é submetido a

níveis acima de 300°C. Neste patamar, por exemplo, foi mostrado que um solo argilo-arenoso se tornou areno-siltoso, enquanto uma areia-argilosa se tornou argilo-siltosa. Por outro lado, houve uma queda nos Limites de Atterberg, junto a um aumento no pH do solo, já que tanto a água adsorvida quanto a estrutural dos hidróxidos de ferro e alumínio foram liberadas. Por fim, notou-se que os grãos de solo ficaram mais escuros, devido a este aumento de temperatura, possivelmente representando um processo de coqueamento do solo.

de Campos (2005) explica que a compressibilidade, a poro-pressão e os parâmetros de resistência são afetados pela mudança de temperatura, bem como a permeabilidade que, por sua vez, é diretamente proporcional a esta. Stegemeier (1998) também chegou a uma conclusão semelhante em seus estudos relacionados a tratamentos térmicos para solos contaminados.

Ainda de acordo com de Campos (*op. cit.*), as curvas características de sucção sofrem variações devido às alterações de temperatura. Logo, conclui-se que a utilização da dessorção térmica torna-se relevante para solos residuais tropicais, uma vez que, dependendo do local, da profundidade e da temperatura de aplicação, além do volume tratado, o solo poderá ficar mais susceptível a processos erosivos.

Paralelamente, o aumento da temperatura em até 100°C constitui uma técnica de adensamento ou melhoria de solos.

Para Rabe *et al* (2003), para temperaturas acima de 90°C, posteriores acréscimos levam a uma diminuição do índice de vazios do solo, ou seja, é reduzida a proporção entre o seu volume de vazios e o de sólidos, o que comprova a explicação de Antunes (2006) de que o solo se re-arranja estruturalmente com o aumento de temperatura.

Como se pode observar, muitos estudos já foram realizados mostrando que, realmente, há algumas mudanças significativas no solo devido ao aumento de temperatura, principalmente aqueles que contêm altos teores de argilominerais. Com isso, o que é sugerido neste trabalho é que cada caso deva ser considerado isoladamente e, sobretudo, que se levem em conta aspectos importantes como o uso ao qual o solo tratado é destinado, tais como:

- Atividades agropecuárias;
- Fundações para contêineres, armazéns, tanques e etc;
- Fundação para tubulações;
- Outras

Dependendo da sua utilização, é possível criar medidas preventivas de engenharia de forma a evitar que haja algum outro prejuízo ao local, principalmente em casos de reforços de fundações, contrapondo-se ao fato da diminuição de volume do solo causar recalque.

Mas o que se mostra mais importante é que o gestor da área contaminada, ou o prestador do serviço envolvendo a tecnologia, esteja ciente de que, possivelmente, haverá danos estruturais ao solo. E, quanto maior for o seu nível de conhecimento relativo ao assunto, maior será a sua possibilidade em prever estas conseqüências, de acordo com os níveis de temperatura, período de tempo de aplicação e volume tratado pela dessorção térmica. Com isso, certamente, ele seria ético e, ainda, poderia passar uma maior credibilidade ao cliente e aos órgãos ambientais.

Com relação à recuperação total ou parcial do solo após os danos físico-químicos causados pela aplicação de altas temperaturas, não se obteve quaisquer referências na literatura. O que se sabe é que a mistura deste solo com solos mais orgânicos ou com altos teores de argilominerais poderia fazer com que este novo material passasse a possuir uma melhor característica físico-química do que o material submetido a altas temperaturas, conforme mencionou Antunes (2006). Porém, este é um processo que pode envolver altos custos, por se tratar de grandes volumes de solo. De qualquer forma, é uma alternativa a se considerar.

Um dos objetivos do presente trabalho será o de tentar mostrar a influência da aplicação de calor nos solos dos campos experimentais, embasando outras possíveis discussões sobre o assunto. Duas maneiras razoáveis de se identificar estes problemas, na prática, seriam a partir de análises de difração de Raios-X, com o material do solo em questão passando na peneira #200 (material de granulometria fina), ou por meio de análises termo-diferenciais, antes e após a utilização da técnica, para se verificar a ocorrência de danos à estrutura ou às

propriedades físico-químicas do solo em questão. Para o presente trabalho, apenas a primeira opção foi realizada, conforme se verá mais adiante.

### **2.2.2.**

#### **Relação entre o Aumento de Temperatura e o Ecossistema Presente no Solo**

Outro ponto de discussão relacionado à utilização da dessorção térmica como remediação de solos contaminados diz respeito à questão da vulnerabilidade dos organismos vivos presentes, quando submetidos a altos níveis de calor. As perguntas a serem respondidas são semelhantes às que foram realizadas no sub-item anterior, ou seja:

1. Uma vez contaminado por compostos orgânicos, quais seriam as conseqüências causadas ao ecossistema presente no solo, no caso de aplicação de uma técnica de dessorção térmica?
2. Haveria algum dano com maiores proporções em relação ao que já estaria sendo causado pelo contaminante?
3. E, no caso de um possível extermínio da biomassa, haveria alguma maneira de se tentar recuperar a aptidão daquele solo à existência de novos seres vivos, ou ele poderia se recuperar naturalmente?

Tal discussão é extremamente relevante, já que os órgãos ambientais fazem inúmeras exigências para liberarem a utilização de uma técnica de remediação de solos ou aquíferos intrusiva como a que está sendo proposta. Logo, o gestor da área contaminada que pretender utilizar qualquer tecnologia, como é o atual caso da dessorção térmica, deverá estar apto a responder estas possíveis e prováveis perguntas, além de estar pronto para propor soluções para o problema.

Outro ponto importante, também colocado no tópico anterior, é a questão ética entre o empreendedor, que pretende remediar a área contaminada, e o seu cliente, que está pagando pelo serviço, uma vez que este deverá estar ciente sobre a possibilidade da ocorrência de conseqüências provocadas pela utilização da técnica.

Dettmer (2002), por exemplo, afirma que os tratamentos térmicos de solo são mais prejudiciais do que benéficos, no que diz respeito aos seus efeitos aos microrganismos presentes no solo, o que será relativamente contestado ao longo deste trabalho.

Portanto, os tópicos seguintes buscarão fornecer dados encontrados na literatura úteis para embasar possíveis respostas para estas perguntas, as quais poderão ser confirmadas com os resultados obtidos junto aos ensaios realizados (Capítulo 5, deste trabalho).

### **2.2.2.1.**

#### **A importância dos microrganismos no solo**

A fração orgânica do solo é constituída por uma mistura complexa de tecidos (vivos ou mortos) e substâncias orgânicas ou inorgânicas (transformadas ou em seu estado original) que sofrem constantes transformações. Cerca de 98% do carbono orgânico do solo encontra-se como matéria orgânica morta, principalmente na forma de húmus, enquanto a fração viva não ultrapassa 5% do total de materiais orgânicos. Desta parte menor, entre 05 e 10% são representados pelas raízes, 15 a 30% são componentes da macrofauna (minhocas e animais de porte inferior), e de 60 a 80% são compostos pelos microrganismos; ou seja, a maioria da matéria orgânica viva do solo é formada pela microbiota composta por organismos como fungos, bactérias, actinomicetos, leveduras e protozoários (Moreira & Siqueira, 2002).

A matéria orgânica é a principal fonte de enzima do solo, sendo assim responsável por quase todas as suas atividades biológicas, catalisando as transformações bioquímicas, representando fonte e dreno de carbono, além de trocar de nutrientes entre a atmosfera e o ecossistema solo-planta (Moreira & Siqueira, 2002). De acordo com Mano (2006), ela é processada a partir de micronutrientes inorgânicos indispensáveis, tais como o nitrogênio, fósforo e potássio – NPK encontrados nas rochas, dentre outros. Com isso, há o crescimento da população metabolicamente ativa, já que o fósforo, por exemplo, se encontra presente em moléculas de ATP (Adenosina Tri-Fosfato) e ácidos nucleicos.

Logo, os microrganismos, representados em sua maioria pelas bactérias (Moreira & Siqueira, *op. cit.*), possuem grande importância para o solo, com destaque para dois fatores:

1. Participação no intemperismo das rochas e formação do solo;
2. Fornecimento de nutrientes aos demais organismos (micro e macro) presentes no solo por meio da reciclagem;

Ambos dizem respeito às atividades orgânicas das inúmeras bactérias presentes no meio poroso, cujas formas de nutrição de algumas dependem basicamente da solubilização de elementos presentes nas rochas, tais como fósforo (P), enxofre (S), magnésio (Mg) e ferro (Fe), dentre outros, que podem servir de nutrientes para estes microrganismos, cujas reações liberam prótons, nutrientes inorgânicos e ácidos orgânicos. Este processo de intemperismo, ou seja, a solubilização dos minerais rochosos – transformação de matéria inorgânica em orgânica por meio de reações de oxidação-redução – resulta na formação de partículas menores que, junto com materiais cimentantes (minerais precipitados) existentes no meio, podem se aglutinar umas às outras auxiliando na formação do solo do local, além de promover a reciclagem de matéria orgânica e inorgânica para a nutrição de outros organismos presentes, tais como outros microrganismos, pequenos animais e os vegetais, conforme explicado por Mano (*op. cit.*).

Em solos que contêm grandes quantidades de raízes, as bactérias heterotróficas se encontram em maior quantidade, já que estas aumentam a disponibilidade de substratos orgânicos e inorgânicos para os vegetais. Por outro lado, um solo não rizosférico é um meio extremamente pobre em alimentos para a microbiota, o que pode dificultar a sua sobrevivência no local (Moreira & Siqueira, *op. cit.*). Ainda de acordo com Mano (*op. cit.*), nestes locais a população microbiana é quantitativamente menor e metabolicamente reduzida.

A título de ilustração, o processo de metabolismo aeróbico executado pelos microrganismos pode ser representado pela seguinte expressão generalizada (Dettmer, 2002):

Compostos orgânicos + oxigênio → dióxido de carbono + água + energia **Equação 2.2**

A Tabela 2.6, a seguir, apresenta uma distribuição de microrganismos em algumas faixas horizontais de solo. O que se observa é que, a partir de 50cm de profundidade, a quantidade é, em geral, muito reduzida, o que pode ser explicado basicamente pela falta de energia proveniente das radiações solares, que é também importante para a sobrevivência destes seres vivos. E, conforme observado anteriormente, as bactérias constituem a maior parte dos microrganismos, tornando-se assim mais relevantes no que diz respeito a estudos relacionados à biota presente no solo.

Tabela 2.6 – Distribuição de microrganismos no solo  
(Starc, 1942, *apud* Alexander, 1977)

| Profundidade (cm) | Organismos/g de solo x 10 <sup>3</sup> |                      |               |        |       |
|-------------------|--|----------------------|---------------|--------|-------|
|                   | Bactérias Aeróbias                     | Bactérias Anaeróbias | Actinomicetos | Fungos | Algas |
| 3 – 8             | 7.800                                  | 1.950                | 2.080         | 119    | 25    |
| 20 – 25           | 1.800                                  | 379                  | 245           | 50     | 05    |
| 35 – 40           | 472                                    | 98                   | 49            | 14     | 0,5   |
| 65 – 75           | 10                                     | 01                   | 05            | 06     | 0,1   |
| 135 – 145         | 01                                     | 0,4                  | -             | 03     | -     |

Observando a Tabela 2.6, surge o primeiro ponto de contra-partida aos possíveis danos causados à microbiota a partir do uso de tratamentos térmicos. Sob profundidades entre 1,35 e 1,45 metro, praticamente não são mais encontrados microrganismos no solo. Porém, como se sabe, as contaminações podem ser subterrâneas, conforme mostrado na Figura 2.1.b deste capítulo, ou simplesmente haver a mobilização de contaminantes para o subsolo. A base de tanques de combustíveis, por exemplo, podem ser encontradas a mais de 2 metros da superfície de um posto de serviço, conforme se pode observar em obras de re-estruturação destes estabelecimentos. Com isso, eventuais vazamentos suplantariam este limite apresentado na Tabela 2.6 (1,45m), o que leva a concluir que os tratamentos térmicos mais profundos não devam impor grandes conseqüências em relação à presença da microbiota no solo, uma vez que ela inexistiria sob estes níveis.

#### 2.2.2.2.

#### **A influência das altas temperaturas no comportamento dos microrganismos**

Os processos microbianos são muito dependentes das características do meio ambiente nos quais os microrganismos são encontrados, onde a temperatura é uma das características que exerce grande influência sobre eles. A variação periódica de temperatura no subsolo local determinará quais tipos de

microrganismos estarão aptos a florescerem naquele ambiente, sendo que temperaturas específicas dentro desta variação afetam sensivelmente os processos microbiológicos (Dettmer, 2002).

Os microrganismos também são freqüentemente classificados por sua sobrevivência sob padrões de variações de temperatura, conforme mostra a Tabela 2.7 a seguir:

Tabela 2.7 – Classificação das bactérias quanto à temperatura ambiente (Dettmer, 2002)

| Classificação das bactérias | Variação de Temperatura (°C) |       |
|-----------------------------|------------------------------|-------|
|                             | Menor                        | Maior |
| Psicrofílicas               | 0                            | 20    |
| Mesofílicas                 | 20                           | 40    |
| Termofílicas                | 40                           | 80    |
| Hipertermofílicas           | 80                           | >100  |

Cummings (2000) afirma que alguns microrganismos podem sobreviver às altas temperaturas, no entanto o autor não aponta quais são estes níveis e sob quais condições ambientais.

Porém, de acordo com Mano (2006), ambientes com temperaturas acima de 200°C desfavorecem a sobrevivência de quaisquer níveis de vida (micro ou macro organismos).

Por um lado, o que pode ocorrer é o fato de que todas as bactérias do solo necessitam de água para absorção de nutrientes e integridade da superfície celular. Além disso, a água também é extremamente importante para o movimento de microrganismos unicelulares, já que este é dado através dos biofilmes – microhabitats do solo que se encontram nas interfaces sólido-líquido, líquido-gasoso e líquido-líquido (Moreira & Siqueira, 2002).

Como a temperatura de ebulição da água sob condições normais de pressão e temperatura é próxima a 100°C, a partir deste ponto ela começa a evaporar. A dessorção térmica, eventualmente, pode utilizar temperaturas bem maiores que estas, o que inviabilizaria a sua presença nos ambientes em questão e, conseqüentemente, a sobrevivência destes microrganismos.

Por outro lado, o que também poderia haver, sob níveis de temperatura muito altos (400°C, por exemplo), seria um extermínio geral, por meio de uma simples queima de todos estes organismos vivos presentes no local de aquecimento.

Com isso, haveria a possibilidade do comprometimento de toda a cadeia alimentar (trófica) deste ecossistema, pois, conforme mostrado anteriormente, há formas de vida mais complexas que dependem dos microrganismos para se alimentarem, como é o caso dos vegetais.

E, como se sabe, os vegetais necessitam de sol, água e nutrientes para sobreviver e realizar fotossíntese. No caso das radiações solares e da água proveniente das chuvas, obviamente, não haveria problemas com relação à aplicação de calor no solo. Contudo, tanto a água constituinte da umidade do solo, quanto os nutrientes (materiais inorgânicos processados pelos microrganismos) que, tipicamente, são captados pelas raízes das plantas, poderiam ser sensivelmente prejudicados pelas altas temperaturas resultantes da dessorção térmica.

Fomentando um pouco mais esta discussão, Heath (2001) publicou um trabalho no qual relata um estudo piloto realizado em 1998 pela **CES – Current Environmental Solutions**, representante da **SPH™ – Six Phase Heating™**, nos Estados Unidos, relacionado à recuperação de atividades microbianas no solo algum tempo após ele ter passado por uma remediação envolvendo técnicas como um tratamento térmico específico para água, bombeamento e extração de vapor para remediar um derramamento de combustível que havia contaminado o solo e o lençol freático.

Com relação ao tratamento térmico, as temperaturas foram aplicadas próximas ao lençol freático por cerca de seis semanas e são consideradas relativamente baixas (de 50 a 70°C), porém os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que, segundo o autor, 98% de benzeno foi removido. Provavelmente, este contaminante encontrava-se sob baixas concentrações.

O mais interessante disso foi uma possível regeneração das atividades microbianas dentro e abaixo da zona aquecida, antes do tratamento térmico e 30 e 90 dias após, conforme se observa na Figura 2.2 a seguir.

Obviamente, se trata de um caso de tratamento térmico específico, visto que a tecnologia que será apresentada ao longo deste trabalho é estrutural e funcionalmente diferente, além de pretender aquecer o solo, e não a água, a temperaturas acima de 300°C. Mas, por outro lado, os resultados publicados por Heath (2001) se mostraram relevantes para a discussão apresentada, já que mostram a possibilidade de regeneração da microbiota após um tratamento térmico.

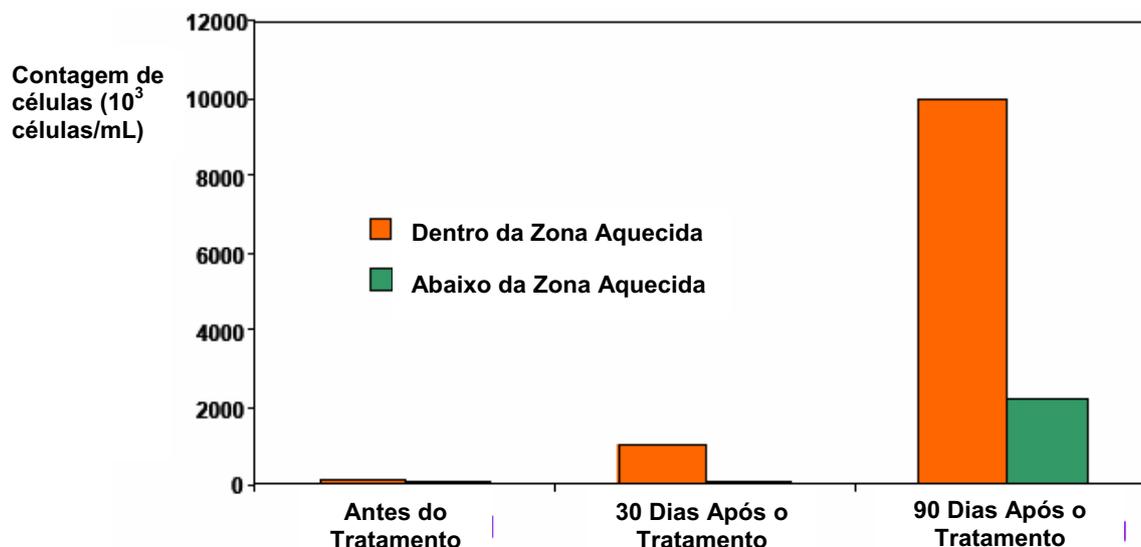


Figura 2.2 – Gráfico mostrando a regeneração da microbiota após o tratamento térmico (modif. de Heath, 2001)

Por outro lado, observa-se em experiências práticas de dessorção térmica (bastonetes ou cobertores térmicos, que serão detalhados nos próximos tópicos) que esta aplicação de calor se limita a apenas uma região do solo – aquela onde se encontra a pluma de contaminação – independente das suas dimensões. O que não se sabe é se as regiões vizinhas, onde não há a contaminação e nem a influência da aplicação do calor, poderiam propiciar, naturalmente, uma revitalização da área remediada por meio de fenômenos como a lixiviação de microrganismos e matéria orgânica. Paralelamente, poder-se-ia também pensar na possibilidade da água da chuva, por exemplo, carrear estes mesmos materiais para o local remediado, proporcionando uma relativa recuperação da área.

E, por fim, uma vez comprovados realmente os danos à microbiota, deve-se avaliar a possibilidade de recuperação a partir de tratamentos forçados, tais como a injeção de micro-nutrientes ou fertilizantes, a mistura do solo degradado

com um solo virgem do local, a injeção de microrganismos, o umedecimento do solo ou outros tratamentos do gênero.

### **2.2.2.3.**

#### **A interação entre os microrganismos e os contaminantes orgânicos**

Dentre as maneiras de se tentar remediar o solo, já apresentadas anteriormente, há a biodegradação, onde, em geral, são propiciadas condições ambientais ideais para que alguns microrganismos possam realizar todo o trabalho de degradação dos contaminantes presentes, seja por meio da digestão, da imobilização ou da transformação por meio de reações químicas. Para a dessorção térmica, onde se considera uma eficiência de quase 100% com relação ao tratamento, espera-se que o restante mínimo dos resíduos orgânicos não eliminados possa ser degradado biologicamente, desde que estas bactérias específicas se encontrem no local tratado.

Porém, o objetivo deste sub-tópico é apresentar, de forma geral, o que ocorre quando há o contato entre os microrganismos presentes no solo e um contaminante orgânico, antes mesmo de se proceder qualquer tipo de tratamento.

Apesar de existirem bactérias que se alimentam de contaminantes orgânicos comuns, como os hidrocarbonetos derivados do petróleo – isto é, utilizam estes compostos como fonte de carbono – uma grande quantidade destes produtos nos vazios do meio poroso pode prejudicar o ciclo de vida da microbiota, conforme explicado por Mano (2006).

Isto ocorre porque, em geral, os nutrientes utilizados pelas células estão solúveis em água ou são englobados (endocitados) sob forma de partículas de pequenas dimensões. No caso dos contaminantes – também denominados de xenobiontes lipofílicos – eles só são acessados pelos microrganismos quando há a formação de micelas (pequenos glóbulos) a partir da interação destes compostos com os surfactantes (detergentes) que, por sua vez, podem ser produzidos pelos próprios microrganismos (Brock *et al*, 1994). Com isso, eles visam aumentar a superfície de contato dos contaminantes para poderem degradá-lo. No entanto, uma grande quantidade de compostos orgânicos poderia dificultar este processo,

pois seria necessário um grande número de bactérias, em relação a esta quantidade, para realizar este trabalho.

Por outro lado, de acordo com Mano (*op. cit.*), um grande número de compostos orgânicos ricos em carbono e hidrogênio, e pobres em sais, também poderia resultar em uma alteração na relação C:N:P (proporção entre carbono, nitrogênio e fósforo), fundamental para o metabolismo destes elementos. O que ocorre é que, para que as bactérias se alimentem, esta relação deve ser ótima a fim de tornar este processo ideal. Porém, quando os contaminante orgânicos presentes no solo se encontram em grande quantidade, pode haver um desequilíbrio nesta relação (mais C e N, e menos P), também impossibilitando que os microrganismos se alimentem destes compostos.

Ou seja, apesar de possuir energia suficiente para sustentar inúmeras bactérias durante todo o seu ciclo de vida, elas se tornariam incapazes de processá-la sem as devidas condições favoráveis, o que poderia levá-las à morte.

Obviamente, casos como este podem não ocorrer necessariamente, conforme se observa com eventos de contaminações que percolam continuamente por toda a zona não-saturada, chegando até o lençol freático, por exemplo, o que deixaria apenas resíduos orgânicos no solo (exemplo mostrado pelas Figuras 2.1.a e 2.1.b), facilitando assim uma possível biodegradação nesta região. Porém, isto também dependerá do tempo de permanência e da quantidade de contaminante em contato com esta região do solo, o que, em geral, não favorece este processo.

Pesticidas como o HCH, por exemplo, podem persistir no solo por cerca de 11 anos, em média (Siqueira, 1991, *apud* Moreira & Siqueira, 2002).

Associado a isto, está o fato de que a maioria dos xenobióticos é potencialmente tóxica aos microrganismos (Moreira & Siqueira, *op. cit.*).

No entanto, mesmo se o microrganismo, ou qualquer outro ser vivo existente no solo, conseguir se alimentar do composto orgânico, este pode vir a entrar na cadeia trófica daquele ecossistema, podendo repercutir de forma maior do que no caso dele ficar restrito ao solo, no caso dos microrganismos não serem

removidos do local. Ou seja, as conseqüências poderiam ser maiores em termos de impacto ambiental e influência nas atividades e processos do ecossistema.

#### **2.2.2.4.**

#### **Considerações finais sobre as relações entre a aplicação da dessorção térmica e a microbiota**

A partir desta revisão, retorna-se mais claramente aos pontos de discussão citados anteriormente. Se a microbiota local já estaria, provavelmente, sendo prejudicada com a presença do contaminante, conforme se observou a partir de explicações anteriores, qual seria o problema em se exterminá-la completamente com a aplicação de calor? Ao menos assim, o solo estaria descontaminado e livre das inúmeras potenciais conseqüências a serem causadas pelos compostos orgânicos. Inclusive, como será mostrado no Capítulo 5 do presente trabalho, poderá haver a possibilidade deste solo receber algum tipo de pós-tratamento objetivando a sua recuperação, métodos estes relacionados à injeção de nutrientes, correção de pH, resfriamento e umedecimento do solo, ou até mesmo a introdução de microrganismos com as mesmas características dos que existiam antes da remediação, obviamente, desde que a legislação ambiental vigente permita.

Também há a real possibilidade da contaminação se encontrar a uma profundidade tal que haveria poucos ou nenhum microrganismo ou atividade orgânica no local, o que acabaria não se tornando impedimento para a realização de um tratamento térmico no solo.

Outro ponto que também deve ser levado em consideração é que os processos biológicos do solo são muito complexos, o que dificulta a representatividade de estudos relativos aos impactos ambientais neles causados. Isto ocorre por causa das diferenças relacionadas à natureza, heterogeneidade, dinâmica dos efeitos e respostas adaptativas das populações microbianas do solo em diversos locais do planeta (Moreira & Siqueira, 2002). Ou seja, não se podem generalizar estas influências para casos específicos.

Assim, retorna-se também ao ponto observado no item 2.2.1, que sugere que cada caso deve ser estudado individualmente, e que isto dependerá de alguns fatores, dentre os quais a quantidade e tipo de microrganismos no local

contaminado e outros, como o uso ao qual o solo tratado se destinava, com maior relevância para as atividades agropecuárias por envolverem solos férteis.

### 2.2.3.

#### **Influência das Altas Temperaturas nos Contaminantes Orgânicos**

Após uma abordagem rápida sobre as possíveis influências dos altos níveis de temperatura nos meios físico e biótico, o presente trabalho buscará apresentar a sua influência junto às propriedades físico-químicas dos contaminantes orgânicos, algumas das quais já citadas nos tópicos anteriores.

Os contaminantes orgânicos podem ser classificados como voláteis ou semi-voláteis, de acordo com o seu nível de volatilidade quando submetidos a determinadas temperaturas. Quando eles se encontram no solo e são aquecidos, diversos mecanismos ocorrem, fazendo com que eles se evaporem ou sejam destruídos, os quais estão citados na Tabela 2.8, a seguir (Baker & Kuhlman, 2002).

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram o efeito da temperatura na meia vida de alguns compostos orgânicos, mostrando inclusive os mecanismos que passam a ocorrer, conforme se aumenta o nível de calor no solo. Ou seja, compostos químicos orgânicos que durariam semanas, quando submetidos a certas temperaturas e à pressão atmosférica, passam a durar muito menos, quando estes níveis são elevados.

Tabela 2.8 – Mecanismos dos compostos orgânicos (Baker & Kuhlman, 2002)

| <b>Mecanismo</b>  | <b>Temperatura</b> |
|---|--------------------|
| Evaporação  | ≤ 100°C            |
| Ebulição (H <sub>2</sub> O – hidrólise, e contaminantes orgânicos voláteis) | ≤ 100°C            |
| Destilação de vapor   | ≤ 100°C            |
| Ebulição (compostos orgânicos semi-voláteis)                                | > 100°C            |
| Oxidação  | > 100°C            |
| Pirólise  | > 100°C            |

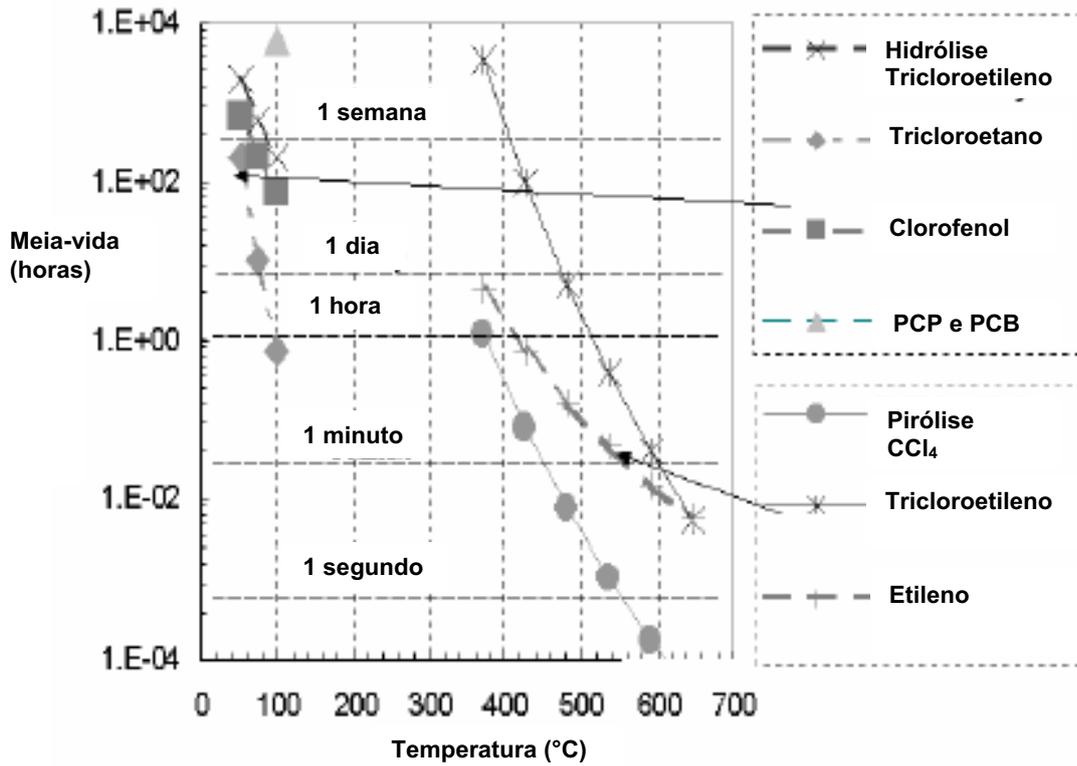


Figura 2.3 – Efeito da temperatura na meia-vida de alguns compostos orgânicos voláteis (modif. de Baker & Kuhlman, 2002)

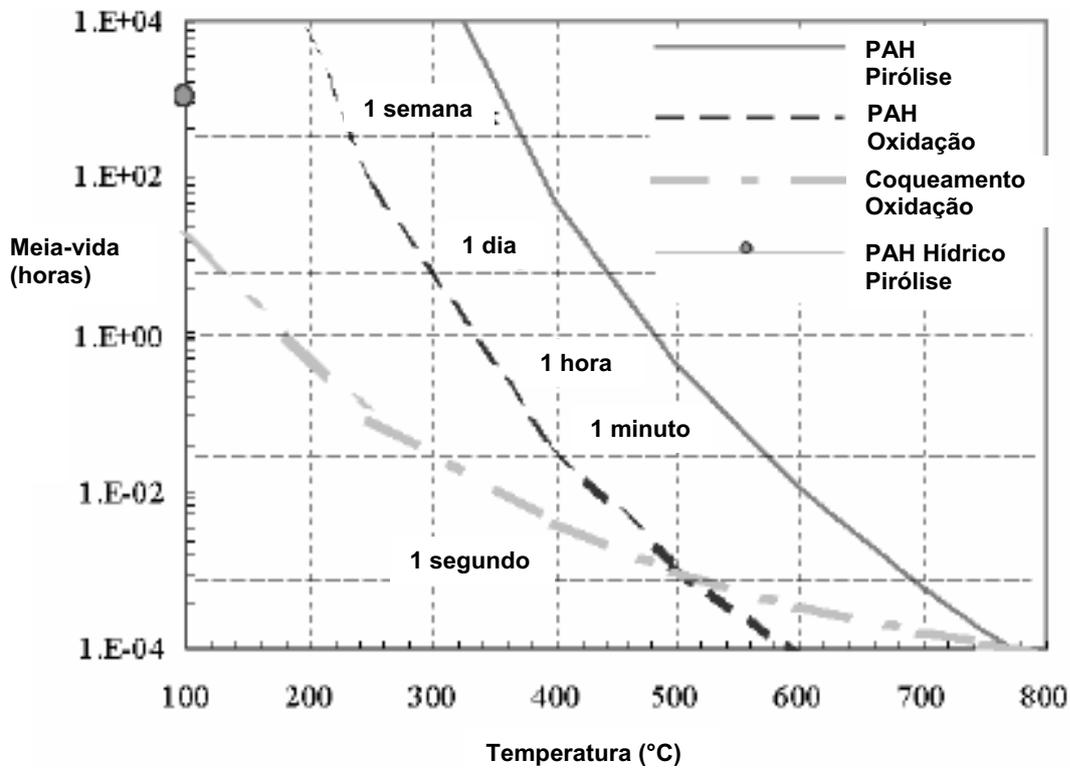


Figura 2.4 – Efeito da temperatura na meia-vida de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAH (modif. de Baker & Kuhlman, 2002)

A partir dos gráficos mostrados (Figuras 2.3 e 2.4), pode-se fazer um rápido exercício hipotético de aplicação da dessorção térmica a uma temperatura de 400°C, para os contaminantes mostrados. Para o tricloroetileno da Figura 2.3, por exemplo, esta temperatura seria suficiente para eliminá-lo em menos de 12 horas. Outros elementos, como o clorofenol, são destruídos instantaneamente. Para a Figura 2.4, sob os mesmos 400°C, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAH seriam oxidados em um minuto e sofreriam a pirólise em menos de uma semana.

Em apenas um dia de aplicação de calor, Hansen *et al* (1998) conseguiram reduzir 39.000µg/kg de benzeno em apenas 22µg/kg, após aplicarem temperaturas de 200°C em um solo tipicamente siltoso.

Conforme mencionado em tópicos anteriores, cada contaminante possui uma certa temperatura de ebulição, a partir da qual a sua fase líquida passará a se transformar em fase gasosa. Esta mudança é influenciada, de forma direta, pelas seguintes propriedades dos compostos orgânicos (Duarte, 2004):

- Densidade;
- Viscosidade;
- Pressão de Vapor;
- Solubilidade;
- Razão de difusão do fluxo, somada ao fenômeno de adsorção/dessorção e às interações capilares.

Para os compostos orgânicos voláteis, o crescimento da temperatura implica em um aumento exponencial da pressão de vapor do contaminante, juntamente com as razões de solubilidade, dissolução e de difusão. Por outro lado, há um decréscimo da força de adsorção na matriz do solo ou matéria orgânica conforme cita Duarte (2004).

A densidade, a viscosidade e a solubilidade dos contaminante orgânicos também aumentam conforme acréscimo de temperatura no solo. O mesmo ocorre à razão de difusão do fluxo.

Já para os compostos orgânicos semi-voláteis e não-voláteis, o acréscimo de temperatura faz com que aumentem tanto a pressão de vapor do contaminante (exponencialmente), quanto a sua permeabilidade relativa. No entanto, as tensões interfaciais e a viscosidade do contaminante diminuem, sendo esta última de forma exponencial (Duarte, *op. cit.*).

Duarte (*op. cit.*) também afirma em seu trabalho que o processo de difusão em líquidos é muito menor do que em gases. Logo, a aplicação direta de calor ao composto orgânico impõe que, como a viscosidade dos líquidos é aproximadamente duas ordens de magnitude maior do que a viscosidade dos gases, a conversão da fase líquida em vapor irá aumentar em muito a sua mobilidade, o que, conseqüentemente, facilitará a sua remoção do meio poroso, desde que haja um sistema de captação de gases eficiente.

### 2.3. Sistemas de Dessorção Térmica

Atualmente, são conhecidas diversas aparelhagens que podem ser utilizadas para executar a dessorção térmica, porém existem apenas três modelos básicos que, em princípio, serviram de parâmetro para o surgimento dos demais. Dois destes modelos trabalham *in situ* – realizam a remediação diretamente no local onde há a área contaminada, sem precisar remover ou transportar este solo – enquanto o terceiro pode executar suas funções tanto *on site* – necessita da remoção e transporte do solo contaminado, porém pode realizar o tratamento na superfície ou bem próximo ao próprio local, reduzindo custos como o transporte – quanto *ex situ* – necessita da remoção e transporte do solo contaminado para local adequado.

A Figura 2.5 a seguir apresenta um modelo típico de aplicação de dessorção térmica *in situ* inserido em um sistema composto por um sistema de tratamento de vapor, uma sala de controle e uma fonte de energia elétrica. Este esquema apresentado se refere ao cobertor térmico que, como o próprio nome já diz, possui estrutura semelhante à de uma manta, a qual deverá cobrir superficialmente toda a área contaminada. Sua estrutura é constituída basicamente por um material termo-isolante e um sistema interno de resistências elétricas capaz de emitir altos níveis de temperaturas a partir da região que fica

em contato com o solo. A sua parte superior também deverá se mostrar isolante, de forma a reduzir, ao máximo, a transmissão de calor para o ambiente externo.

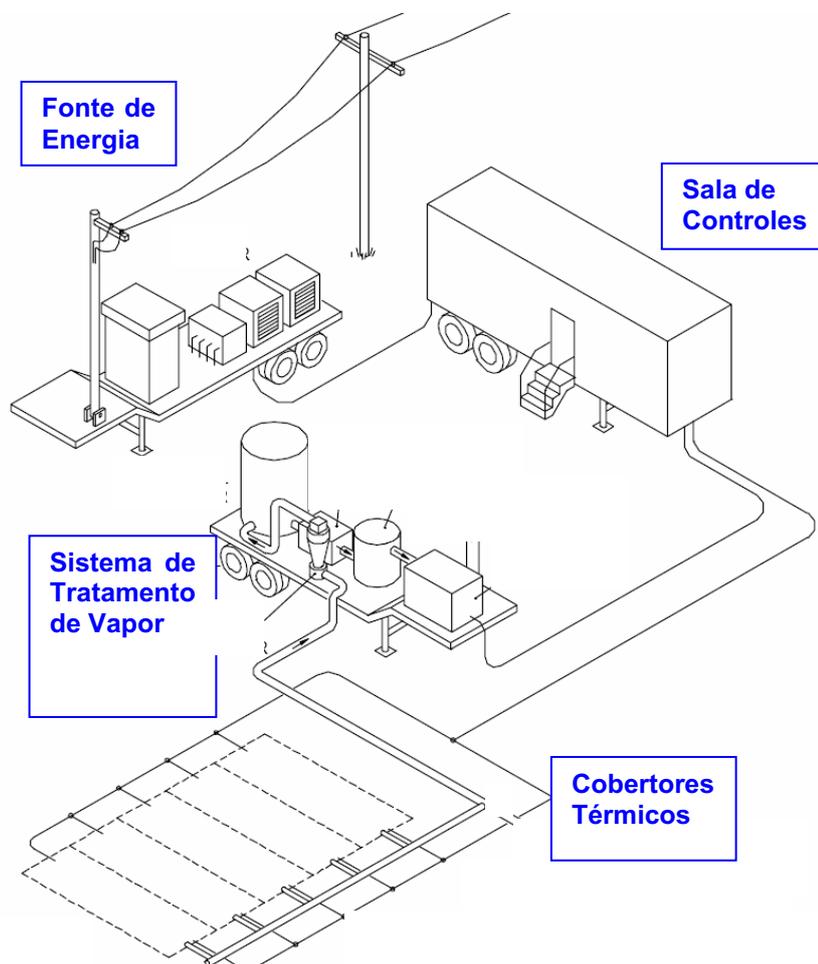


Figura 2.5 – Sistema de Dessorção Térmica *In Situ* utilizando Cobertores Térmicos (modificado de Stegemeier, 2001)

Stegemeier (2001) construiu, nos Estados Unidos, um protótipo cujo alcance é de até 03 metros de profundidade e, dependendo de fatores como a profundidade desejada, a umidade do solo e de outros fatores que afetam o fluxo de calor em meios porosos, pode depender entre 02 e 10 dias para realizar um tratamento.

Tipicamente, e conforme já mencionado neste trabalho, o vapor succionado, resultante da aplicação do calor, é direcionado para uma tubulação que, por sua vez, o direciona para um sistema de tratamento.

No **NGA/PUC-Rio** este sistema de cobertores térmicos foi amplamente estudado por Portes (2002) e Pires (2004), onde um protótipo capaz de realizar esta função foi implementado e, *a posteriori*, aperfeiçoado.

Os custos relacionados ao cobertor térmico estão associados basicamente à mobilização de equipamentos, energia elétrica utilizada e custos relativos ao tratamento dos contaminantes volatilizados, supondo-se que se encontrem na faixa inferior da variação mostrada na Tabela 2.5 (entre U\$ 50 e 250 por tonelada), ou seja, por volta de **U\$ 100** cada tonelada de material.

Há também modelos semelhantes aos incineradores comuns, porém de tamanho inferior, que possuem a vantagem de serem móveis, ou seja, podem ser levados até o local desejado – remediação *on site* – desde que haja uma infra-estrutura básica para o seu funcionamento. São as chamadas unidades *ex situ*, cujas estruturas e componentes variam muito, embora, assim como os outros modelos, a maioria deles utilize a eletricidade para aquecer um determinado volume de material contaminado. Uma desvantagem é que o solo deve ser removido do seu local de origem para que possa ser tratado por estas unidades, o que pode custear mais a operação, além da possibilidade de acarretar em problemas de engenharia no local, dependendo da profundidade e de onde o material será extraído, e problemas com a legislação ambiental vigente, já que o material contaminado poderá ser transportado do local. Outra desvantagem é o sério problema associado à volatilização dos compostos, durante a sua queima. Ao final do processo de tratamento, e conforme os resultados alcançados, o material pode ser repostado ao seu local de origem, o que também despenderia de um certo custo adicional. Para a faixa mostrada na Tabela 2.5, possivelmente estes sistemas são os mais caros, ficando entre **U\$ 200 e U\$250** por tonelada.

Em ambos os casos, dependendo do tipo de projeto e de suas metas, podem ser montados sistemas com diversas unidades destes modelos. No caso do cobertor térmico, eles podem, inclusive, ser configurados em arranjos espaciais capazes de otimizar o uso da técnica em questão. Para as unidades *ex situ*, deverá haver uma certa logística necessária para que a operação seja realizada com sucesso e sem riscos associados.

De acordo com **USEPA** (2001), o tempo de execução de ambos os modelos pode levar de poucos meses a vários anos, dependendo da extensão da pluma,

tipo de solo, gastos disponibilizados e eficácia do sistema. No entanto, estudos bibliográficos publicados pela **TerraTherm Inc.** mostram que alguns sítios com volumes consideráveis de solo já foram remediados em poucas semanas. Com relação a isto, deve-se atentar para o fato de que, em processos de queima envolvendo componentes orgânicos, pode haver a geração de dioxinas. Logo, este período deve ser controlado minuciosamente.

## **2.4. Bastonete Térmico**

Objeto de estudo desta dissertação, o bastonete térmico é um dos sistemas que utiliza o princípio da dessorção térmica. A sua grande vantagem é que ele pode ser introduzido no solo a qualquer profundidade (remediação *in situ*), atingindo assim as plumas de contaminação subterrâneas de difícil acesso, sem necessitar da remoção do solo contaminado. Uma de suas desvantagens é que, como ele trabalha com resistências elétricas, deve-se haver um eficiente sistema de vedação de forma a evitar o contato direto dos seus terminais com a água para que não haja o risco de um curto-circuito, cortando assim a corrente elétrica do sistema. Em relação a isso, também deve-se estabelecer um isolamento do material. Obviamente, se a sua temperatura conseguir ultrapassar 100°C, tal problema é minimizado, já que a água passa a ser evaporada.

A Figura 2.6 a seguir apresenta um esquema de como os bastonetes podem ser utilizados em uma área contaminada, cuja pluma se encontra a alguns metros de profundidade, ressaltando que, da mesma forma que eles podem possuir em seu sistema mecânico um processo de injeção de ar, também pode haver um sistema de extração de vapor, o que facilitaria o fluxo de calor no solo e a remoção dos gases contaminados: Este extrator pode estar instalado no próprio bastonete ou em um elemento auxiliar, dependendo da sua estrutura mecânica e, claro, dos objetivos e metas da remediação.

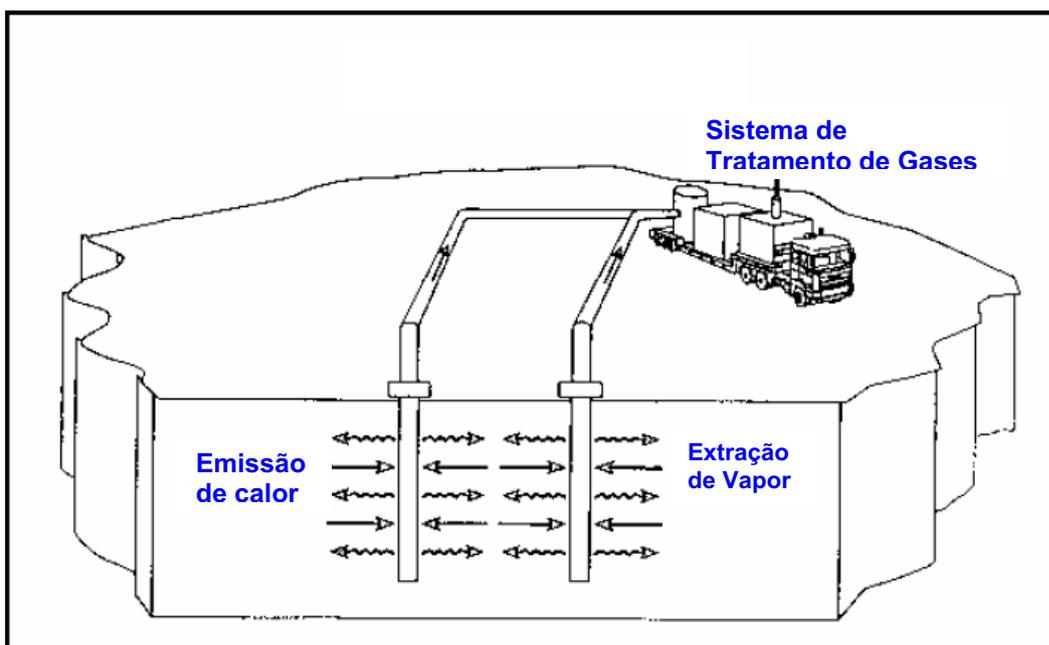


Figura 2.6 – Sistema de desorção térmica *in situ* utilizando os bastonetes térmicos (modificado de Stegemeier, 2001)

Duarte (2004) apresentou em seu trabalho outras vantagens e desvantagens do uso do bastonete térmico, as quais são apresentadas a seguir:

**- Vantagens:**

- Técnica efetiva para quaisquer níveis de contaminação orgânica;
- Apresenta um baixo nível de risco, no que diz respeito ao aumento da mobilidade dos contaminantes;
- Destroi completamente os contaminantes;
- Não necessita da adição de produtos químicos (técnica limpa);

**- Desvantagens:**

- Uma significativa adsorção de contaminantes pelo solo implica na necessidade de se utilizar altas temperaturas, bem como um maior tempo de aplicação;
- Para solos de baixa permeabilidade, é necessário um maior tempo de aplicação da técnica para que os voláteis possam ser extraídos;
- É necessário um fluxo de ar, partindo do bastonete, para facilitar a condução de calor no meio poroso e impedir o coqueamento do solo;

Com relação às desvantagens apresentadas por Duarte (2004), as primeiras duas mostram, basicamente, que, em casos específicos, o custo energético da técnica poderá onerar em um pouco mais o processo. Com relação ao último item, pode-se dizer que os modelos que foram concebidos pelo **NGA/PUC-Rio**, já se encontram devidamente condicionados a possuir uma tubulação interna ligado diretamente a um compressor de ar.

Outro ponto a se ressaltar é que não há como se executar um projeto de remediação de solos utilizando apenas um bastonete. Em geral, projeta-se uma configuração geométrica ótima, onde se instalam diversos bastonetes com um determinado espaçamento entre eles. Tipicamente, a quantidade utilizada depende da extensão da pluma de contaminação, da capacidade térmica do bastonete e das propriedades físico-químicas do solo e dos contaminantes.

O fato é que, para um projeto de remediação de solos envolvendo esta tecnologia, devem ser avaliados importantes fatores como o alcance calorífico do bastonete no solo em função do tempo, ou seja, a partir de uma temperatura emitida por ele, quanto chegaria a um raio de distância qualquer com o mínimo possível de perdas. Conforme será observado ao longo deste trabalho, isto dependerá principalmente do tipo de solo e de suas propriedades físico-químicas, no entanto sabe-se que é possível se fazer algumas previsões de eventos a partir de simulações numéricas utilizando os dados obtidos em ensaios de laboratório, ou com base em experiências adquiridas (*'know-how'*) com o seu uso ao longo do tempo.

Um dos “mitos” acerca do uso da dessorção térmica e, conseqüentemente, do bastonete térmico, diz respeito a possíveis riscos de explosões no subsolo, já que os contaminantes orgânicos, em especial os combustíveis, são aquecido a altas temperaturas que, inclusive, ultrapassam os seus pontos de ignição – aquele necessário para que o composto entre em combustão, provocando fogo e explosões. Porém, a contra-explicação para isso é que a quantidade de oxigênio (elemento fundamental para provocar esta reação) nos poros do solo é muito baixa a ponto de provocar esta combustão, ou seja, pode-se afirmar que não há riscos de explosão devido ao uso da dessorção térmica no subsolo (**TerraTherm Inc.**).

Com relação aos custos operacionais, eles são semelhantes aos despendidos com o cobertor térmico – talvez um pouco maiores devido a sua introdução no solo, o que é potencializado pela quantidade de bastonetes utilizada. Isto sem contar com a possibilidade de se haver despesas relacionadas a um pré-tratamento (contenção/rebaixamento do nível d'água, umedecimento do solo e/ou métodos preventivos de engenharia citados anteriormente) e a um pós-tratamento (mistura com um solo mais orgânico, reposição de nutrientes, pH, umedecimento, reposição do ecossistema) do solo que deverá ser remediado. No entanto, em geral, os valores relativos apenas ao uso do sistema são extremamente reduzidos, quando são comparados a outras técnicas. Para efeitos práticos, o custo do bastonete térmico deve se situar na faixa média da variação apresentada na Tabela 2.5 – entre U\$ 50 e 250 por tonelada, ou seja, mais ou menos **U\$ 150** por tonelada.

Por outro lado, como vantagem, é importante ressaltar que o uso do bastonete térmico não se restringe somente a este tipo de remediação. O fato de algumas propriedades do contaminante – viscosidade, difusão, pressão de vapor, solubilidade e densidade – aumentarem a partir de um aumento de temperatura no solo pode resultar em uma série de benefícios relacionados ao uso deste instrumento. Outras técnicas de remediação tais como o bombeamento e tratamento (*'pump-and-treat'*) e a extração de vapor do solo (*'soil vapor extraction'*), por exemplo, podem ser mais eficientes se o contaminante apresentar, respectivamente, uma viscosidade e uma pressão de vapor maior. E isso poderia ser obtido aumentando-se a temperatura do solo, por meio do uso dos bastonetes.

Outra aplicação, ainda relacionada à remediação de solos, diz respeito à aceleração do metabolismo dos microrganismos presentes, conforme se aumenta a temperatura. Isto, por exemplo, poderia ser utilizado para auxiliar, e acelerar, processos de bioremediação. De acordo com Dettmer (2002), temperaturas entre 30°C e 40°C favorecem este processo para certos tipos de bactérias e em certos ambientes, sendo que aumentos de cada 10°C podem duplicar a sua eficácia. Novamente, uma vez comprovada a sua viabilidade para o solo e os microrganismos em questão, isto poderia ser obtido a partir da instalação dos bastonetes térmicos.

Porém, deve-se atentar para o fato que há certos níveis de temperatura que, se ultrapassados, fazem com que esta eficiência decresça, conforme mostram as Figuras 2.7 e 2.8, a seguir, resultados de um trabalho realizado no Alaska, Estados Unidos, pela **WQFS – West Quartermaster's Fueling System** e apresentado por Dettmer (2002), que se refere ao tratamento, por 11 meses, de uma área contaminada por gasolina e diesel utilizando dois tipos de remediação: extração de vapor do solo e 'air sparging'. Ambas auxiliadas por um aquecimento do solo por rádio-frequência ('radio-frequency heating' – RFH) e aquecimento em seis fases ('six-phase heating' – SPH). Durante a aplicação das técnicas avaliou-se, dentre outros fatores, um aumento da biodegradação associado a incrementos de temperatura que variaram de 0 a 30°C.

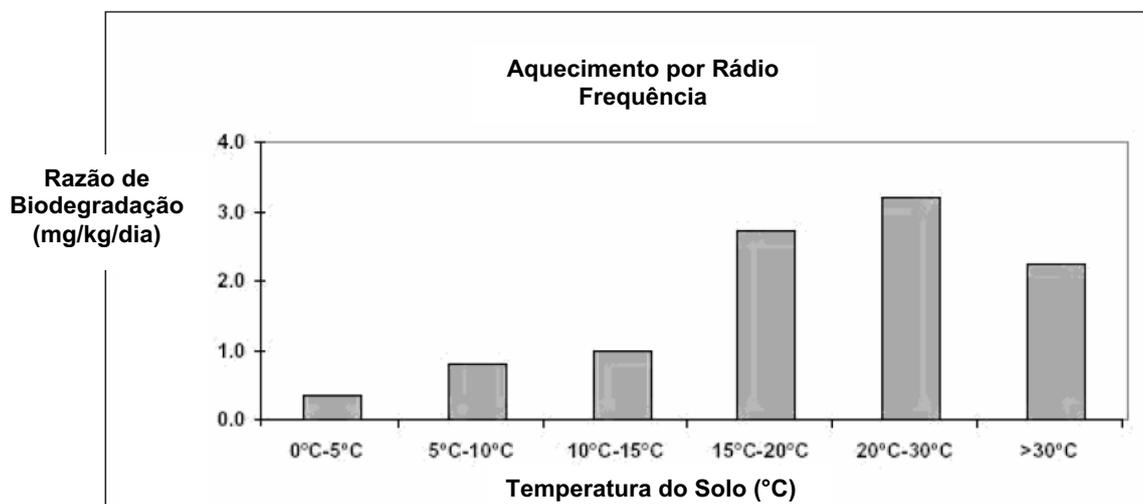


Figura 2.7 – Aceleração da biodegradação dos contaminantes orgânicos com um aumento de temperatura por um aquecedor de rádio-frequência (*apud* Dettmer, 2002)

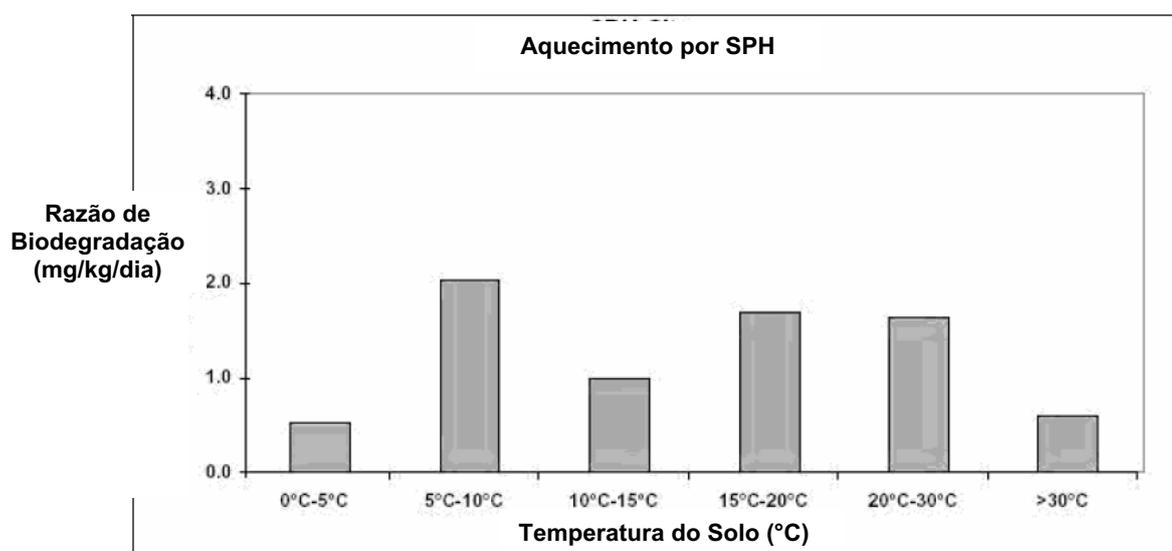


Figura 2.8 – Aceleração da biodegradação dos contaminantes orgânicos com um aumento de temperatura por um aquecedor de seis fases (*apud* Dettmer, 2002)

Analogamente, o bastonete térmico poderia ser utilizado da mesma forma apresentada nestes dois casos mostrados nas figuras anteriores.

Este instrumento pode ainda ser utilizado para outros fins que, por ventura, necessitem do aquecimento do solo sob quaisquer temperaturas, principalmente as mais altas, independentemente de serem destinados à remediação ou a outros objetivos.

Enfim, o instrumento que foi desenvolvido durante este trabalho – maiores detalhes serão fornecidos ao longo do texto – possui uma variedade de utilidades, apesar da sua utilização atual se destinar ao tratamento de solos contaminados.

#### **2.4.1. Fluxo de Calor em Meios Porosos**

Um bom projeto de remediação de solos que utilize a dessorção térmica é aquele que otimiza a quantidade total de bastonetes – a menor possível – mantendo a eficiência do sistema e reduzindo os custos de operação. Para isso, faz-se necessário um bom nível de conhecimento relativo ao fluxo de calor no solo em questão.

Os mecanismos responsáveis pela transferência de calor entre dois pontos quaisquer são:

- **Radiação:** transmissão de calor, basicamente, através do ar (ex: emissão de raios ultravioletas provenientes do sol);
- **Convecção:** transmissão de calor através de fluidos devido a um gradiente de temperatura (ex: transporte de calor pela água);
- **Condução:** transmissão de calor que pode ocorrer através de um meio sólido (aumento da vibração atômica de partículas de solo, metais, madeira, etc), líquido (colisão entre as moléculas de fluido, aumentando a sua energia cinética, somados à quebra e formação de pontes de hidrogênio) ou gasoso (colisão entre as moléculas de ar e/ou vapor d'água, aumentando a sua energia cinética).

De acordo com Duarte (2004), quando este fluxo ocorre no solo, a radiação e a convecção podem ser desprezadas, pois as suas influências são mínimas quando se comparadas à condução. Isto ocorre porque, estando abaixo da superfície do terreno, esta transferência de calor se dará predominantemente através do esqueleto sólido do solo e, quando houver, pela água existente nos seus poros.

O fato do ar ser um mal condutor de calor em relação à água – conforme será mostrado a seguir – faz com que um sistema de dessorção térmica seja mais eficiente quando atua em um solo mais úmido. Porém, conforme mostrado anteriormente, este solo não pode estar saturado, o que tornaria o processo mais complexo.

Ou seja, quando o solo possui uma umidade elevada, os bastonetes necessitam de uma menor energia para aquecer um determinado material, ao contra-ponto que, no caso da umidade ser baixa, este mesmo material precisaria de uma maior energia térmica, proveniente dos bastonetes, para ser aquecido sob a mesma temperatura.

A modelagem matemática de qualquer sistema de entrada e saída de massa no meio poroso parte, analogamente, do mesmo princípio. A Lei de Darcy rege o fluxo dos fluidos, a Lei de Ohm lida com o fluxo de corrente elétrica, enquanto a Lei de Fick se responsabiliza pelo fluxo molecular. Todas estas teorias partem do pressuposto que, a partir do momento que este processo não muda o estado inicial do solo, pode-se considerar que a razão de fluxo  $J_i$  está linearmente relacionada com a força vetorial  $X_i$ , e seguirá sempre de um meio “hiper” para um meio “hipo”, conforme mostrado na expressão seguinte (Mitchell, 1993):

$$J_i = L_{ij} \cdot X_j$$

**Equação 2.3**

Seguindo este mesmo princípio, a transferência de calor no meio poroso, direcionada linearmente de um meio hipertérmico para um meio hipotérmico, é regida pela Lei de Fourier, de acordo com a seguinte equação:

$$q_{tL} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot A$$

**Equação 2.4**

onde, em unidades do **Sistema Internacional – SI**, tem-se que:

- $q_{tL}$  é a razão de fluxo linear ou a densidade de fluxo de calor [J/s = W];
- $\lambda$  é a condutividade térmica [W/m.°C.];
- $T$  é a temperatura [°C];
- $L$  é a distância entre o ponto inicial e o ponto final onde há o fluxo [m];
- $A$  é a área da seção transversal perpendicular à direção do fluxo [m<sup>2</sup>].

Em termos práticos, a equação acima pode ser utilizada para se determinar a vazão calorífica de um cobertor térmico, uma vez que o fluxo é dado verticalmente, de cima para baixo.

Já no caso do bastonete térmico, a emissão de calor se dá radialmente. Quando este fluxo está sob regime permanente, a seguinte expressão é utilizada (Stegemeier, 2001):

$$q_{tR} = \frac{2\pi \cdot k_t \cdot h \cdot \Delta T}{\ln\left(\frac{r_e}{r_b}\right)}$$

**Equação 2.5**

onde:

- $q_{tR}$  é a razão de fluxo radial ou a densidade de fluxo radial de calor [W];
- $h$  é o comprimento útil do bastonete [m];
- $r_e$  é o raio de alcance calorífico do bastonete [m];
- $r_b$  é o raio do bastonete [m].

Como este fluxo pode-se dar em várias direções, a modelagem matemática deste fenômeno é comandada pelo chamado fluxo acoplado de calor no solo, por meio da seguinte formulação (Mitchell, 1993):

$$J_{ij} = L_{ij} \cdot X_{ij}$$

**Equação 2.6**

A condutividade térmica constitui a capacidade de um certo material em transmitir calor por condução. Quanto maior for este coeficiente, maior será a eficiência deste mecanismo. Na Tabela 2.9, encontram-se alguns valores de  $\lambda$ .

Tabela 2.9 – Propriedades Térmicas do Solo (Mitchell, 1993)

| Material | Condutividade Térmica ( $\lambda$ ) – [W/m.°K] |
|----------|--|
| Ar       | 0,024  |
| Água     | 0,60   |
| Gelo     | 2,25   |
| Folhelho | 1,56   |
| Granito  | 2,76   |
| Cobre    | 389  |
| Solo     | 1,7  |

Para solos de granulometria fina como os siltes, siltes argilosos, argilas siltosas e argilas, o  $\lambda$  costuma variar entre 0,25 e 2,5 W/m.°K (Duarte, 2004). E, tipicamente, solos argilosos apresentam condutividades térmicas menores do que os solos arenosos (Duarte, 2006).

Segundo Jonhansen (1975), pode-se utilizar a seguinte correlação, para se determinar o coeficiente de condutividade térmica em solos não-saturados:

$$\lambda = (\lambda^{\text{sat}} - \lambda^{\text{seco}}) \cdot \lambda_e + \lambda^{\text{seco}} \quad \text{Equação 2.7}$$

onde:

- $\lambda_{\text{seco}} = \frac{0,135\gamma_d + 64,7}{2.700 - 0,947 \cdot \gamma_d} \pm 20\%$
- $\lambda_e$  = Número de Kersten (1949), com  $\lambda_e \approx \log S + 1$  (solos finos) e  $\lambda_e \approx 0,7 \log S + 10$  (solos grossos), sendo S o grau de saturação do solo
- $\lambda_{\text{sat}} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n$ , com  $\lambda_s$  (condutividade térmica do solo) =  $\lambda_q^q \cdot \lambda_0^{(1-q)}$ , sendo  $\lambda_q$  do quartzo = 7,0W.°/m.°K,  $\lambda_0$  de outros minerais = 2 ou 3 W/m.°K para

$$\text{menos de 20\% de quartzo, e } q = \frac{q^{\text{de quartzo}}}{\text{fração total dos sólidos}}$$

No entanto, esta expressão possui um erro de até 25%, o que é bastante significativo.

Observando-se as expressões utilizadas para determinação do coeficiente  $\lambda$ , e os conceitos apresentados, conclui-se que a facilidade com que o solo transmitirá calor por condução dependerá de cinco fatores básicos:

1. Mineralogia;
2. Peso específico;
3. Distribuição granulométrica;
4. Temperatura
5. Grau de saturação

Paralelamente, o trabalho realizado por Duarte (2004) mostrou que o teor de umidade também influencia diretamente na condutividade térmica, o que leva a concluir que não há valores específicos para cada tipo de solo, uma vez que estes fatores podem variar de um local para o outro.

Por outro lado, a resistividade térmica –  $R_t$  é outro parâmetro térmico muito utilizado e representa, matematicamente, o inverso da condutividade térmica. A idéia é que, quanto maior a resistividade, maior a resistência do material em transmitir calor por condução.

Outra grandeza utilizada em modelagens matemáticas do fluxo de calor no solo é a capacidade de aquecimento volumétrico –  $C$ , que representa a energia de calor necessária para se mudar a temperatura do volume unitário de uma massa qualquer em  $1^\circ\text{C}$ , cuja expressão está mostrada abaixo:

$$C = \rho \cdot c$$

**Equação 2.8**

Onde:

- $\rho$  é a massa específica [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $c$  é o calor específico [ $\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$ ]

Para solos, pode-se utilizar a expressão de Sangre (1968), a seguir (*apud* Duarte, 2004):

$$C = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left( 0,18 + \frac{w}{100} \right) C_w \quad \text{Equação 2.9}$$

onde:

- $\gamma_d$  e  $\gamma_w$  são, respectivamente, o peso específico seco do solo e da água [kN/m<sup>3</sup>]
- $w$  é o teor de umidade do solo
- $C_w$  é a capacidade de aquecimento volumétrico da água

A difusividade térmica –  $D_t$  do solo é também uma grandeza muito utilizada em expressões de fluxo de calor, podendo inclusive ser relacionada com propriedades físicas do solo como a umidade e a sucção.

Quanto maior a variação de temperatura entre dois pontos, maior a difusividade, a qual é representada pela seguinte equação:

$$D_t = \frac{\lambda_t}{c \cdot \rho} \quad \text{Equação 2.10}$$

Por outro lado, partindo-se das equações diferenciais de Fourier (Equação 2.11), da variação da quantidade de calor no solo em função do tempo (Equação 2.12), e da energia térmica armazenada ou perdida, por unidade de volume (Equação 2.13), chega-se à Equação 2.14, que relaciona, diferencialmente, a difusividade térmica, a temperatura e uma certa área do solo com o tempo (Reichardt & Timm, 2004):

$$q = -k_t \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Equação 2.11}$$

$$dQ = c \cdot dT \quad \text{Equação 2.12}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad \text{Equação 2.13}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_i \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

**Equação 2.14**

onde:

- $\delta t$  é a variação do tempo [s];
- $x$  é o espaço entre dois pontos [m].

Para a Equação 2.14, tem-se as seguintes condições de equilíbrio (Reichardt & Timm, 2004):

a) Fluxo em equilíbrio dinâmico ('*steady-state*');

- $q = \text{constante}$
- $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$
- logo,  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$  ou  $\nabla^2 T = 0$

b) Fluxo variável (caso mais geral):

- $\frac{\partial T}{\partial t} = D_i \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$

c) Equilíbrio térmico:

- não há fluxo;
- $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ , ou a condutividade térmica é nula.

Todas estas grandezas apresentadas acima são úteis, principalmente, em casos de modelagens numéricas do fluxo de calor no solo. Logo, o seu conhecimento se faz extremamente necessário para se aumentar o nível de confiabilidade destas simulações.

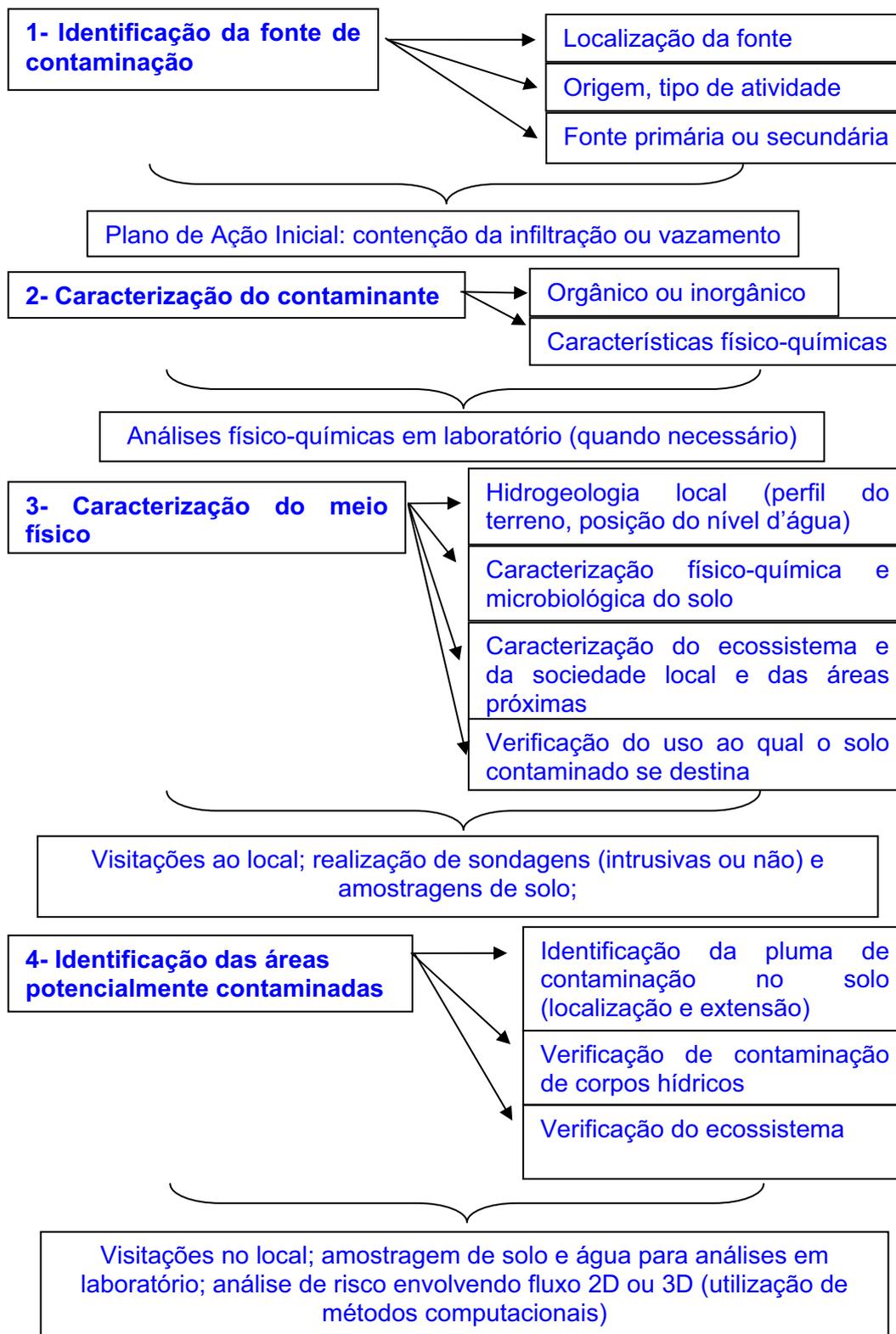
### 2.4.2. Projeto de Remediação utilizando o Bastonete Térmico

Em um projeto de remediação de áreas contaminadas utilizando o sistema de dessorção térmica *in situ*, cujos elementos principais são os bastonetes térmicos, o presente trabalho sugere a execução dos procedimentos apresentados nos esquemas a seguir, divididos em quatro fases e ilustrados com as Figuras 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12.

Dentre as fases esquematizadas a seguir, destaca-se a grande importância das investigações geo-ambientais – **Fase 01**, Figura 2.9 – que, a partir das análises de risco, fornecerão toda a base necessária para se estabelecer um projeto de remediação, principalmente no que diz respeito aos seus objetivos e metas. Também se faz importante a execução de ensaios de bancada em laboratório, a fim de se conhecer o tipo de solo e o tipo de contaminante envolvido, bem como experimentos pilotos, para melhor avaliar a interação da aplicação de calor com o contaminante, para aquele tipo de solo.

Durante esta etapa, uma vez identificada(s) a(s) fonte(s) de contaminação, também já é possível se procederem aos primeiros planos emergenciais que, em geral, constituem na contenção imediata dos vazamentos e, dependendo da magnitude, na evacuação do local. Devido a estes fatores, se considera fundamental que o gestor da área contaminada – responsável pelo projeto de remediação, e demais partes envolvidas no projeto, façam-se presentes no local para avaliar e analisar todas as condições que possam ser relevantes ao problema.

• **FASE 01: Investigações Ambientais**



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410751/CA

Figura 2.9 – Esquema do projeto de remediação, Fase 01

Para a **Fase 02**, Figura 2.10, de posse de todos os dados obtidos durante a fase inicial, o objetivo principal do gestor é o de projetar um uso ótimo da técnica de remediação, de forma a obter os melhores resultados em termos de eficiência e eficácia, e despendendo de menores custos. No caso deste sistema de dessorção térmica *in situ*, além de se determinar a quantidade de bastonetes a ser utilizada na área contaminada, é preciso que se saiba onde posicioná-los, e sob quais profundidades, a fim de que o solo contaminado atinja a temperatura desejada – aquela que destruirá o máximo de compostos orgânicos – sob o menor intervalo de tempo e com o menor número de bastonetes possíveis, o que, conseqüentemente, reduziria os custos e manteria a eficiência do sistema. Inclusive, o projetista da remediação deve atentar para o fato que muitas vezes é melhor aplicar uma temperatura menor, e por um período de tempo maior, do que aplicar uma temperatura maior em um tempo menor.

Casos como o reportado por Hansen *et al* (1998), em um sítio contaminado por bifenilas policloradas – PCBs e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAHs, onde estudos preliminares mostraram que três dias de aplicação de calor a 300°C obteriam melhores resultados do que a aplicação intensa de 400°C em um dia.

Com relação a este assunto, cabe uma observação: na presente dissertação, pretende-se avaliar exatamente o desempenho do bastonete térmico fabricado no **NGA/PUC-Rio** com o objetivo de conhecer as suas capacidades a partir de experiências de campo, o que é essencial para prepará-lo para aplicações em projetos reais de descontaminação de solos.

Um outro fator que deve ser analisado é que os objetivos da remediação dependerão, principalmente, dos padrões exigidos pelos órgãos ambientais, ou seja, muitas vezes não é interessante, sob o aspecto financeiro, reduzir os níveis de contaminação além destes níveis apresentados. Obviamente, isto também dependerá da utilização a qual aquele solo era destinado e, de certa forma, conforme mencionado antes, se ele poderá ser utilizado para outros fins.

Com relação à utilização de vários bastonetes, os protótipos desenvolvidos por Stegemeier & Vinegar (2001), por exemplo, são normalmente instalados em arranjos triangulares equiláteros – para formarem bases hexagonais – com

espaçamentos variando entre 1,5 e 2,1 metros. Este espaçamento é influenciado por algumas considerações, dentre elas:

1. O espaçamento entre bastonetes não deve ser muito pequeno, para evitar que haja excesso de energia gasta para aquecer o solo;
2. O espaçamento entre bastonetes determinará o tempo requerido para aquecer o solo sob uma determinada temperatura;
3. A potência do bastonete a ser utilizada para aplicar calor ao solo contaminado é determinada pelo tipo de solo e sua granulometria;
4. O tipo de contaminante a ser removido determina a temperatura a qual o solo deve ser aquecido.

Observando o item 3, ressalta-se que as demais propriedades físicas também influem na potência do bastonete a ser utilizada.

Ainda segundo os protótipos de Stegemeier e Vinegar (2001), espaçamentos de cerca de 1,5m podem ser ideais para se aquecer um solo sob temperaturas acima de 500°C, entre 30 e 40 dias. Por outro lado, este espaçamento pode ser maior caso sejam necessários níveis menores de temperatura, ou no caso de haver maior disponibilidade de tempo.

A questão da utilização de programas computacionais de fluxo para auxiliar um projeto de remediação também se mostra importante nesta fase porque, dependendo das características do código (*'software'*), este poderá apresentar simulações sobre a percolação do contaminante no solo, mostrando seus possíveis destinos, localização da pluma com diferentes níveis de concentração, além de hipóteses sobre a eficiência do uso da técnica de remediação desejada. O programa **UNSATCHEM-2D**, desenvolvido na **PUC-Rio**, por exemplo, realiza uma análise do fluxo de calor no meio poroso uma vez conhecidas as propriedades térmicas, hidráulicas e físico-químicas do solo, conforme citado no trabalho de Duarte (2004).

Com relação aos gases gerados durante o processo de aquecimento do solo, observa-se que a decisão sobre o tipo de tratamento correspondente dependerá de um consentimento conjunto entre os responsáveis pela área contaminada e o órgão ambiental. Isto porque, caso o contaminante não seja totalmente destruído, será necessário dar um destino final ao produto resultante do

tratamento utilizado, seja o de lançá-lo à atmosfera (quando o tratamento consiste na queima dos gases), ou transformando-o em efluente líquido que, dependendo do tipo de contaminante (em geral os resíduos orgânicos derivados do petróleo), pode até ser reaproveitado em indústrias.

- **FASE 02: Projeto do Sistema de Dessorção Térmica *In Situ***

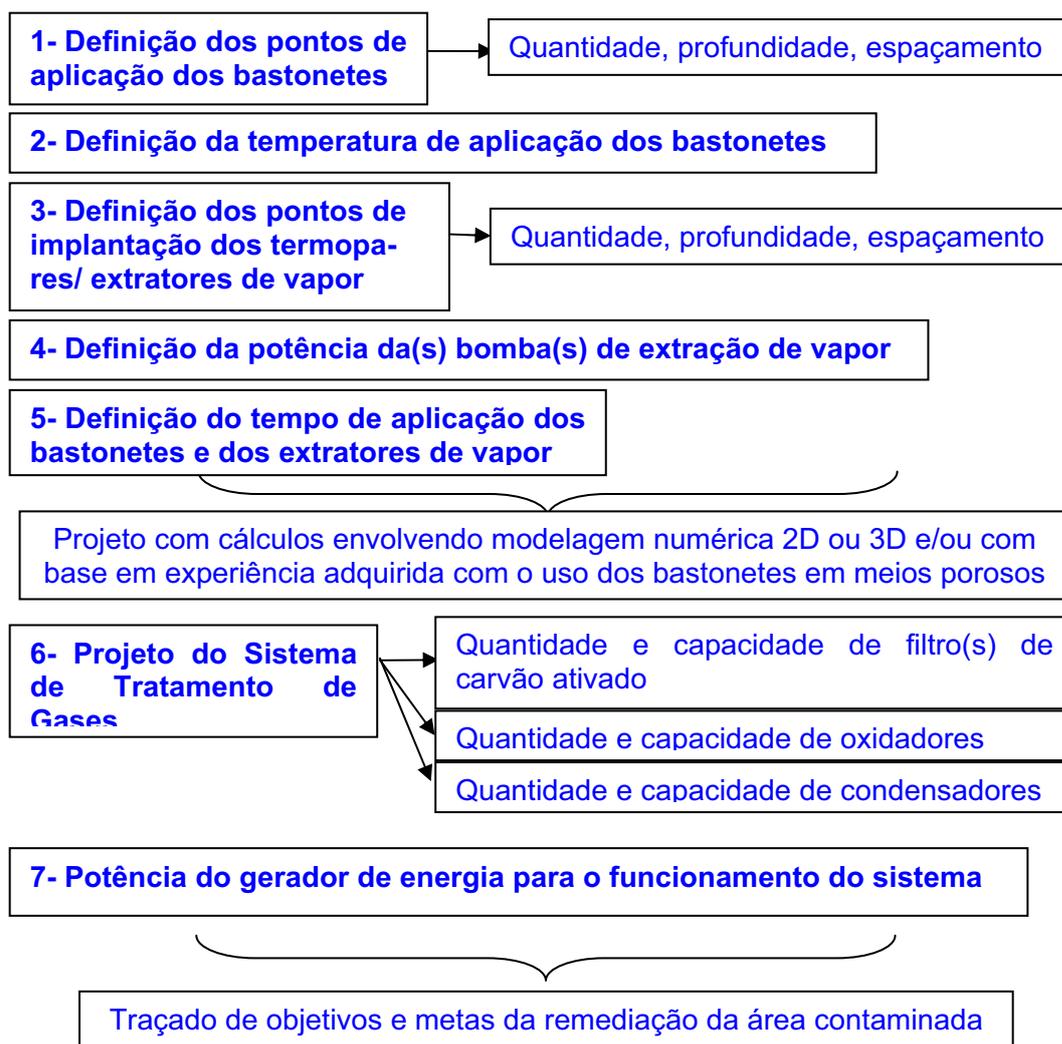


Figura 2.10 – Esquema do projeto de remediação, Fase 02

Após a definição do projeto de descontaminação, e uma vez liberada a licença ambiental para a sua execução, parte-se para a **Fase 03**, onde se procederão às etapas de instalação e execução da técnica. Nesta fase ressalta-se a

possibilidade de haver um nível freático elevado no local, o que poderia dificultar o funcionamento das resistências elétricas contidas nos bastonetes, havendo um grande risco de elas entrarem em curto-circuito, no caso de não ter sido feito um bom sistema de vedação no bastonete. Sendo esta a condição hidrogeológica existente, podem-se tanto utilizar barreiras hidráulicas, quanto se proceder ao rebaixamento deste nível d'água. Porém, no segundo caso haveria a possibilidade de se bombear os contaminantes juntamente com a água, o que deve ser levado em consideração no momento de se projetar este sistema.

- **FASE 03: Instalação e Execução do Sistema de Dessorção Térmica *In Situ***

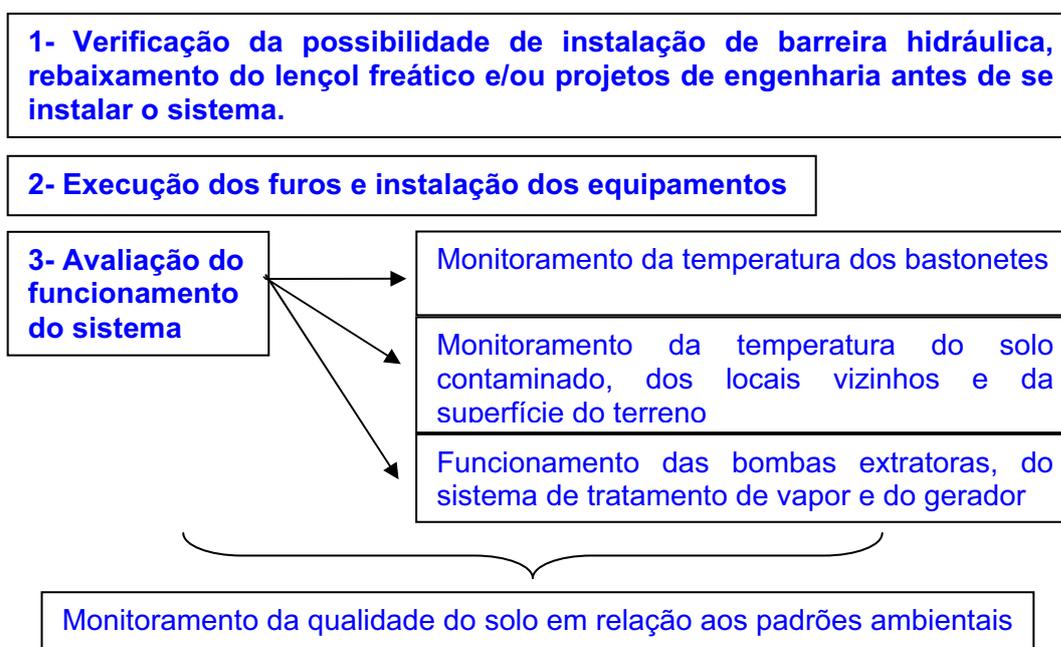


Figura 2.11 – Esquema do projeto de remediação, Fase 03

A partir do funcionamento dos equipamentos resta aos operadores um monitoramento contínuo e eficaz do sistema a fim de que não haja quaisquer problemas ao longo do seu tempo de utilização. A Figura 2.12 ilustra a **Fase 04** do empreendimento.

Uma vez atingidos os objetivos da remediação, desmonta-se o sistema e finaliza-se o processo. Porém, dependendo das conseqüências sofridas pelo solo e pela microbiota local, devido aos altos níveis de calor atingidos, podem-se ainda executar procedimentos de recuperação da área, dentre os quais o umedecimento (processo de molhagem acarretando em um aumento da umidade do solo), uma reposição de nutrientes (orgânicos ou inorgânicos, dependendo das características da microbiota nativa), uma possível reposição de microorganismos no solo, ou uma mistura do solo descontaminado com um solo mais orgânico, obviamente, tudo dentro das normas ambientais vigentes.

- **FASE 04: Final**

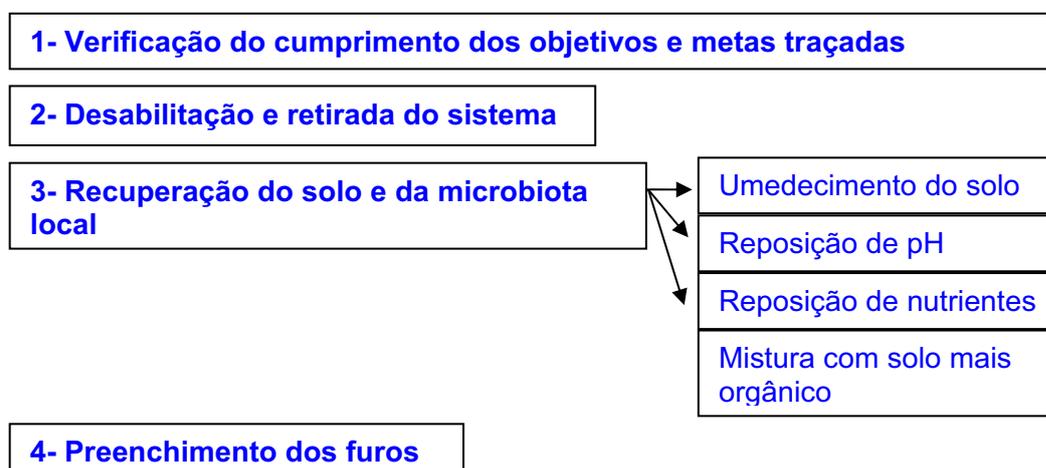


Figura 2.12 – Esquema do projeto de remediação, Fase 04

## 2.5. Estudo de Casos

De acordo com a literatura encontrada, os bastonetes térmicos vêm sendo utilizados há mais de dez anos, principalmente em países como os Estados Unidos, onde a companhia **TerraTherm Inc.** representa a principal detentora da tecnologia. Isto criou um bom nível de confiabilidade sobre a técnica, devido principalmente aos sucessos obtidos nos tratamentos de alguns sítios contaminados. A seguir, serão apresentados e comentados alguns estudos de casos, onde os bastonetes térmicos foram utilizados.

### 2.5.1.

#### Projeto e instalação de um sistema de dessorção térmica *in situ* para remediação de solos contaminados por resíduos de gás manufacturado em um tanque desativado

Nos Estados Unidos, Baker *et al* (2004) publicaram um artigo no qual apresentava-se um caso de contaminação de solo por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PCH, BTEX e outros derivados do petróleo, provenientes de um tanque desativado de resíduos gerados a partir do refino de um gás derivado do petróleo, onde foi utilizado um sistema de bastonetes térmicos.

As Tabelas 2.10 e 2.11 mostram algumas especificidades do problema, tais como o dimensionamento do local contaminado e os seus níveis de contaminação. Com relação aos objetivos da remediação – Tabela 2.11, os padrões adotados se referem às normas da **EPA – Environmental Protection Agency**, que representa o órgão ambiental americano.

Tabela 2.10 – Dimensionamento do Problema (Baker *et al*, 2004)

| Sítio Contaminado | Dimensões da Zona de Tratamento |   |                                  |   |  |
|-------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|--|
|                   | Diâmetro (m)                    | Profundidade, a partir da superfície do terreno (m) | Volume de solo (m <sup>3</sup> ) | Posição do nível d'água, em relação à superfície do terreno (m) | Posição da pluma, em relação à superfície do terreno (m) |
|                   | 18,9                            | 0 – 5,5   | 1,539                            | 0,9   | 3,7 – 5,5  |

Tabela 2.11 – Quantificação do Problema (Baker *et al*, 2004)

| Componentes                              | Ponto de Ebulição (°C) | Concentração no solo, dentro da Zona de Tratamento |                |                | Objetivos da Remediação (mg/kg) |
|--|------------------------|--|----------------|----------------|---------------------------------|
|  |                        | Média (mg/kg)                                      | Máxima (mg/kg) | Minima (kg/mg) |                                 |
| Benzo(a)pireno                           | 495                    | 06   | 14             | <0,7           | <0,7                            |
| Benzeno                                  | 80                     | 2.643  | 6.200          | 01             | <10                             |
| Hidrocarbonetos de Petróleo Totais (TPH) | -                      | 45.481   | 230.000        | 265            | <200                            |

Observa-se ainda, de acordo com a Tabela 2.10, que o nível d'água se encontrava a quase 01 metro da superfície do terreno e que a cota superior da pluma estava a 3,7 metros da mesma. Logo, os bastonetes foram instalados abaixo do nível freático. No entanto, os autores não comentam se já havia ou se foi realizado algum tipo de rebaixamento ou contenção do nível d'água, ou se a estrutura de seus bastonetes é indiferente a este tipo de situação.

A distribuição e configuração dos instrumentos do sistema de dessorção térmica *in situ* foi decidida a partir de uma modelagem numérica, simulando-se basicamente a temperatura entre os bastonetes, bem como a energia e o tempo despendidos para remediação, chegando-se ao resultado apresentado na Figura 2.13.

Porém, antes de se iniciar o processo de dessorção térmica propriamente dito, Baker *et al* (2004) decidiram utilizar um processo inicial de bombeamento da fase líquida, para a retirada dos compostos mais densos que a água (DNAPL – *Dense Non-Aqueous Phase Liquid*), a partir do qual também pode ter sido feito um rebaixamento do nível d'água. E, de forma a facilitar o processo, aumentando a viscosidade dos compostos, foi realizado um pré-aquecimento sob temperaturas de até 50°C por cerca de 120 dias.

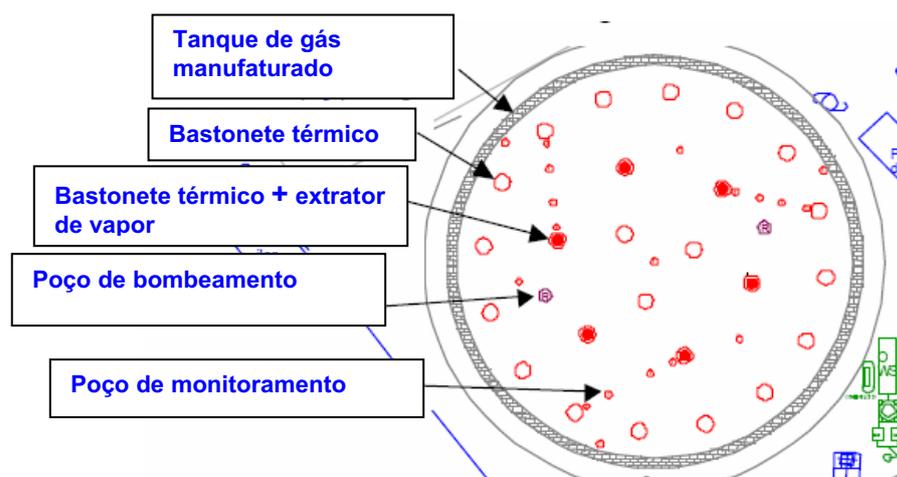


Figura 2.13 – Vista em planta da configuração da distribuição dos bastonetes, extratores de vapor, pontos de monitoramento, e poços de bombeamento (Baker *et al*, 2004)

Estudos e modelagens numéricas também propuseram que os bastonetes poderiam aplicar temperaturas de 450°C em 180 dias para eliminar a fase líquida dos contaminantes e, com isso, obterem temperaturas médias entre os bastonetes de cerca de 325°C. Assim, procedeu-se à execução do aquecimento do solo. A Tabela 2.12 a seguir apresenta as especificações do sistema de dessorção térmica *in situ* utilizado:

Tabela 2.12 – Especificações do Sistema de Tratamento (modificada de Baker *et al*, 2004)

| Temperatura de Tratamento (°C) | Duração do Tratamento (dias) | Razão da Potência dos bastonetes (W/m) | Potência Total do Sistema (kW.h e kVA) |
|--------------------------------|------------------------------|--|--|
| 450                            | 180                          | 984 a 1.184                            | 6.000.000 e 240                        |

Ao final, os objetivos do serviço foram atingidos. Entretanto, é necessário ressaltar que a publicação não faz qualquer referência à influência da aplicação do calor no solo daquela região, em termos de danos estruturais ao solo e à microbiota local, o que está sendo verificado no presente trabalho.

Com relação aos custos, pode-se tomar como base os valores apresentados na Tabela 2.5, já que o seu autor é um dos que publicou este trabalho.

A seguir, a Figura 2.14 mostra uma fotografia da aplicação do sistema de dessorção térmica *in situ* na área contaminada, cujos instrumentos utilizados estão referenciados pela Figura 2.13, apresentada anteriormente.



Figura 2.14 – Fotografia da área de aplicação do sistema de dessorção térmica *in situ* (Baker *et al*, 2004)

### 2.5.2.

#### Remediação de uma antiga usina de tratamento de madeira

Sob uma antiga usina de tratamento de madeira, operada até o final dos anos 50, o subsolo se encontrava contaminado por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAH, dioxinas e furanos. O volume de solo a ser remediado correspondia a pouco mais de 12 mil metros cúbicos e se encontrava em uma

camada de solo, predominantemente siltoso, que variava entre 06 e 30 metros em relação à superfície do terreno.

785 bastonetes térmicos (sendo 131 deles com capacidade de extração de vapor) foram instalados em configurações hexagonais com espaçamentos médios de 2,1 metros, aplicando calor sob temperaturas que variavam entre 500 e 700°C – de forma que, entre os bastonetes, a temperatura média se mantivesse em 325°C – a qual era capaz de destruir a maioria dos contaminantes. Aqueles que persistiam, já em fase de vapor, eram succionados para um sistema de tratamento de gases. Para fornecer energia ao sistema, foram utilizados dois transformadores de 2.500kVA.

Como a área era muito extensa, o serviço foi dividido em duas fases, sendo que a publicação de Bierschenk *et al* (2004) encontrada apresentava somente a primeira delas, relativa a uma das áreas.

A Tabela 2.13 e a Figura 2.15 a seguir mostram os níveis de contaminação apresentados antes e após a primeira fase de tratamento.

Tabela 2.13 – Níveis de contaminação antes e após o tratamento (Bierschenk *et al*, 2004)

| Compostos  | Concentração Máxima (mg/kg) | Concentração Média (mg/kg) | Objetivos da Remediação* (mg/kg) |
|--|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Hidrocarbonetos de Petróleo Totais (TPH)   | 50.000                      | 2.730                      | NC                               |
| Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos Totais (TPAH) – benzo(a)pireno ('B(a)P Equivalente') | 35.000                      | 2.306                      | 0,065                            |
| Creosoto   | 61.000                      | 4.505                      | NC                               |
| Pentaclorofenol (PCP)  | 58                          | 2.94                       | 2,5                              |
| Dioxinas   | 0.194                       | 0.018                      | 0,001                            |

\* de acordo com o Departamento de Substâncias Tóxicas da Califórnia

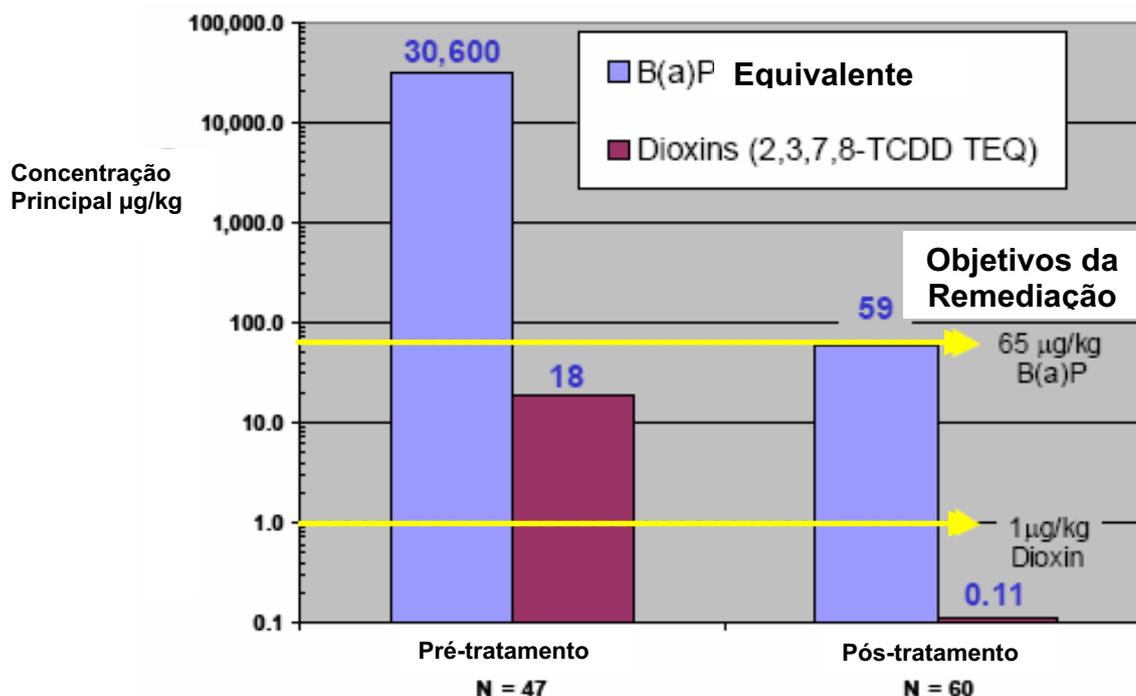


Figura 2.15 – Concentrações antes e após o tratamento (Bierschenk *et al*, 2004)

A Figura 2.15 é bastante ilustrativa, no que se refere ao sucesso do tratamento, que durou cerca de 09 meses.

Já s Figuras 2.16 a 2.21 mostram, em seqüência, a instalação do sistema de dessorção térmica *in situ* na área mencionada:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410751/CA



Figura 2.16 – Instalação dos bastonetes (1) (Bierschenk *et al*, 2004)



Figura 2.17 – Instalação dos bastonetes (2) (Bierschenk *et al*, 2004)



Figura 2.18 – Instalação de um material isolante na superfície do terreno (Bierschenk *et al*, 2004)



Figura 2.19 – Instalação da instrumentação e das tubulações (1) (Bierschenk *et al*, 2004)



Figura 2.20 – Instalação das tubulações (1) (Bierschenk *et al*, 2004)



Figura 2.21 – Vista aérea do sistema de dessorção térmica *in situ* (Bierschenk *et al*, 2004)

Porém, assim como no caso anterior, os autores não reportaram nenhuma consequência causada ao solo e ao ecossistema local após a aplicação da técnica.

### 2.5.3. Outros casos

Diversos outros casos de tratamento de sítios contaminados por compostos orgânicos, tais como os hidrocarbonetos derivados de petróleo, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e pesticidas, por exemplo, foram encontrados na literatura e, principalmente, em meios eletrônicos de divulgação – *internet*. Conforme mencionado anteriormente, os serviços ambientais realizados pela **TerraTherm Inc.**, em geral, são os que possuem maior disponibilidade de dados e fotos

publicados, os quais podem ser encontrados em sua página virtual (<http://www.terratherm.com>).

Como a maioria segue, basicamente, o mesmo padrão de desenvolvimento – projeto, instalação e execução da técnica – dos casos já mencionados, os próximos serão apresentados de maneira meramente ilustrativa, sem grandes detalhes ou comentários, apenas para mostrar mais um pouco como a técnica pode ser aplicada.

Na Figura 2.22 é possível observar como é feito o isolamento superficial da área a ser remediada pela **TerraTherm Inc.**. De acordo com a fotografia, coloca-se uma manta – aparentemente, um geotêxtil – em contato com a superfície e, acima dela, joga-se uma camada de uma emulsão (aparentemente cimentante). Como ele não fica em contato direto com o solo, é possível retirá-lo após a aplicação da técnica.

Na Figura 2.23, é mostrada a complexidade das instalações dos dutos que, instaladas junto aos bastonetes extratores de vapor, succionam os gases a partir de uma potente bomba a vácuo e os encaminham para um sistema de tratamento.

Já a Figura 2.24 mostra evidências de uma área contaminada – formação de poças de óleo na superfície do asfalto – e que, segundo a Figura 2.25, está sendo tratada pelo sistema de dessorção térmica *in situ*.

Por fim, as Figuras 2.26 e 2.27 são seqüenciais e mostram o durante e o após o tratamento de uma área contaminada. O interessante é que se verifica que, após o tratamento, há uma vegetação rasteira florescendo na área, o que mostra que, ao menos a parte mais próxima à superfície não sofreu conseqüências em seu ecossistema, ou foi tratada adequadamente logo após a remediação.



Figura 2.22 – Instalação de uma emulsão, utilizado como isolamento da superfície (TerraTherm Inc.)



Figura 2.23 – Tubulação de gases do sistema (TerraTherm Inc.)



Figura 2.24 – Área antes do tratamento / evidências de contaminação (TerraTherm Inc.)



Figura 2.25 – Área da figura anterior, durante o tratamento (TerraTherm Inc.)



Figura 2.26 – Remediação de uma área contaminada (TerraTherm Inc.)



Figura 2.27 – Área remediada e re-vegetada posteriormente (TerraTherm Inc.)

## 2.6. Comentários Finais

Com esta última sessão, está finalizado o capítulo de revisão bibliográfica do presente trabalho, onde se procurou, a partir de estudos bibliográficos e comentários pessoais, abordar de forma geral os diversos problemas ambientais existentes no mundo e as soluções tecnológicas e de gestão buscadas pelo homem para se tentar corrigir estes problemas.

Um deles, e objeto de estudo desta dissertação, é representado pela contaminação de solos por contaminantes orgânicos. A proposta adotada é o uso da dessorção térmica e, em particular, dos bastonetes térmicos, uma técnica alternativa emergente no mundo inteiro e que agora vem sendo desenvolvida no Brasil, pioneiramente, pela **PUC-Rio**.

Em países desenvolvidos e com grande exigência em termos de qualidade, meio ambiente e legislação como os Estados Unidos, o seu sucesso em remediação de solos contaminados é devidamente comprovado, o que a posiciona como um grande potencial a ser desenvolvido e consolidado, em relação a outras técnicas no Brasil, principalmente levando-se em conta os seus reduzidos custos de operação/execução. Este país possui diversos problemas ambientais a serem solucionados e, possivelmente, esta técnica pode vir a se tornar uma grande opção no mercado.

Porém, para isso, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas como esta, que, sobretudo por partir de uma instituição universitária, procuram esclarecer tudo o que está relacionado à tecnologia, de forma a não restarem dúvidas acerca da sua viabilidade técnica e financeira. Por outro lado, uma técnica de sucesso que possa ser desenvolvida no próprio país pode evitar com que sejam gastas grandes quantias com a importação de serviços ou produtos provenientes do exterior.

Obviamente, resta um longo caminho a ser percorrido, com estudos, experimentos e testes a serem realizados, bem como respostas às discussões que persistem no âmbito geotécnico ambiental sobre as conseqüências que o uso desta técnica possa trazer ao solo e ao ecossistema. E este é um dos objetivos desta dissertação de mestrado, cujos desenvolvimentos de instrumentos e experimentos realizados, e que serão mostradas ao longo dos próximos capítulos, servirão como tentativas de respostas às discussões pertinentes ao caso. Com isso, busca-se chegar a um produto final confiável e de credibilidade que possa ser oferecido ao mercado.

E que isto possa servir de exemplo para tentar alavancar outras pesquisas do gênero, que envolvem produtos tecnológicos principalmente, de preferência com uma parceria entre instituições de pesquisa, órgãos do governo e empresas o que, de certa forma, ocorreu neste trabalho.