

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Álvaro de Freitas Viana**

**Desenvolvimento de Equipamento para Aplicação da  
Dessorção Térmica *In Situ***

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: José Tavares Araruna Júnior  
Co-orientador: Denise Maria Mano Pessôa

Rio de Janeiro  
Setembro de 2006



**Álvaro de Freitas Viana**

**Desenvolvimento de Equipamento para Aplicação da  
Dessorção Térmica *In Situ***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**José Tavares Araruna Júnior**

Presidente/Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Denise Maria Mano Pessôa**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Tácio Mauro Pereira de Campos**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Anna Paula Lougon Duarte**

Consultora PETROBRAS

**José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Setembro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Álvaro de Freitas Viana**

Engenheiro Civil, com ênfases em Geotecnia e Meio Ambiente, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio – em Agosto de 2002. MBA em Gestão Ambiental pela Fundação Getúlio Vargas do Rio de Janeiro – FGV/RJ – em Agosto de 2004.

### Ficha Catalográfica

Viana, Álvaro de Freitas

Desenvolvimento de Equipamento para a Aplicação da Dessorção Térmica *In Situ* / Álvaro de Freitas Viana; orientador: José Tavares Araruna Júnior; co-orientador: Denise Maria Mano Pessôa – 2006.

256 f.; il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui Bibliografia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Dessorção Térmica. 3. Bastonete Térmico. 4. Remediação *In Situ*. 5. Microbiologia. I. José Tavares Araruna Júnior. II. Denise Maria Mano Pessôa. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título

CDD: 624

À minha família, sempre unida! Com os CINCO juntos, não tem pra ninguém!

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha mãe e ao meu pai ao amor, carinho e apoio em absolutamente todos os momentos, bons e ruins, desta dissertação (e olha que não foram poucos!). Muito obrigado por não me deixarem “chutar o balde”.

Agradeço à minha irmã querida pelo companheirismo e por me dar um sobrinho-afilhado fantástico nessa época do ano.

Agradeço à Aninha, sempre ao lado e sempre presente, pelo grande amor e pela confiança.

Agradeço ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> José Tavares Araruna Júnior, por me colocar a par de um tema tão atual no Brasil, que é o uso de técnicas alternativas para a remediação de solos contaminados. Quero acompanhar e participar da evolução deste negócio! Obrigado pela confiança.

Muito obrigado à Prof. Denise Mano, co-orientadora deste trabalho, pela importante contribuição na área de microbiologia ambiental. Sua ajuda, principalmente no final, foi fundamental para enriquecê-lo.

Muitíssimo obrigado ao Prof<sup>o</sup> Tácio M. P. de Campos. O senhor tem uma grande importância na minha vida profissional, além de ter se tornado um grande amigo.

Agradeço muito ao Prof<sup>o</sup> Franklin dos Santos Antunes, pelas aulas esclarecedoras sobre a influência das altas temperaturas em solos. O senhor tem e sempre terá o meu respeito e grande admiração.

Agradeço à Anna Paula Lougon Duarte, por ter gentilmente aceito o convite para fazer parte da minha banca examinadora. O seu trabalho serviu de inspiração para o meu. Espero poder retribuí-la fornecendo mais contribuições para a área.

Um agradecimento especial ao Prof<sup>o</sup> Eurípedes Vargas. Trabalhamos juntos durante a minha graduação e iríamos dar continuidade no mestrado. Porém, a desorção térmica acabou me levando para outro lado. De qualquer forma, fica aqui registrado o meu grande respeito e admiração por ele.

Eu também agradeço muito ao senhor José Raimundo Martins, pela grande amizade e apoio dado nos momentos mais difíceis. E muito obrigado por me conceder a sua excelente habilidade e destreza no projeto e fabricação das mais diversas peças mecânicas e instrumentos utilizados neste trabalho.

Muito obrigado ao técnico Amaury Fraga, pelo fundamental apoio dado em praticamente todos os ensaios de campo. Sua ajuda teve grande relevância neste trabalho e, sem ela, certamente eu não chegaria até aqui.

Muitíssimo obrigado à bolsista de microbiologia Anna Carolina Magdaleno, por ter me dado um grande apoio nos ensaios de microbiologia. A sua ajuda valorizou bastante este trabalho.

Agradeço muito ao doutorando Patrício Pires, por me passar um pouco da sua experiência com a dessorção térmica, pelas várias idéias dadas durante a segunda fase de experimentos de campo e pelo grande respeito.

Muito obrigado ao técnico Josué Martins, pela ajuda nos ensaios de laboratório.

Agradeço à aluna de doutorado Taise M. O. Carvalho, pela ajuda na interpretação dos ensaios de difração de raios-x.

Agradeço à EMBRAPA Solos, por meio do Dr. Aluizio, que possibilitou a realização da primeira fase dos ensaios de campo deste trabalho.

Um agradecimento especial aos grandes amigos Ygor, Christiano e Pecin, parceiros de farras no Pires, BG e churrascos. Vocês foram fundamentais durante este tempo pela imensa contribuição em ALEGRIA.

Muito obrigado também aos companheiros Mestre William, Rita, Lenilson e Fátima, às meninas do mestrado e ao resto da galera.

Agradeço também à CAPES, pelo apoio financeiro.

E por fim, agradeço a Deus por iluminar os inúmeros tortuosos caminhos deste trabalho.

## Resumo

Viana, Álvaro de Freitas; Araruna Jr., José Tavares; Mano Pessoa; Denise Maria. **Desenvolvimento de Equipamentos para Aplicação da Dessorção Térmica *In Situ***. Rio de Janeiro, 2006. 256p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso do calor como meio alternativo para a remediação de áreas contaminadas por compostos orgânicos – hidrocarbonetos derivados de petróleo e policíclicos aromáticos, organoclorados, pesticidas, dentre outros – tem se mostrado competitivo quando comparado a outras soluções, principalmente levando-se em consideração questões práticas como a eficiência dos seus resultados e o seu tempo de execução. Seguindo uma linha de pesquisa do Núcleo de Geotecnia Ambiental da PUC-Rio, esta dissertação se propõe a aperfeiçoar o sistema de dessorção térmica *in situ* a partir do desenvolvimento de um novo bastonete térmico e de um sistema de medição de temperaturas *in situ*. O seu escopo envolveu, principalmente, a avaliação do seu desempenho quando submetido às condições naturais de campo a partir de experimentos realizados em dois locais diferentes: nas dependências da EMBRAPA Solos, no Jardim Botânico, e na área externa do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. No primeiro caso, por ser um solo areno-argiloso, a temperatura se manteve mais concentrada em pontos mais próximos ao bastonete. Já no segundo, representado por um solo areno-siltoso, a temperatura chegou a pontos mais distantes com maior intensidade. Não houve modificação estrutural significativa em ambos os solos. Nos dois casos, a eficiência do sistema foi extremamente dificultada pelos baixos graus de saturação e teor de umidade, o que fez com que o calor aplicado se perdesse com maior facilidade. Após algumas modificações em seu projeto original, o bastonete térmico desenvolvido se comportou bem, principalmente no último ensaio, que durou 24 dias. Paralelamente, em laboratório, foram avaliados o comportamento da microbiota após a aplicação de calor no solo e a possibilidade de aptidão deste meio à existência de novos seres vivos após a injeção de água e nutrientes inorgânicos. Verificou-se uma recuperação e estabilização destes indivíduos em aproximadamente 03 semanas. Observou-se ainda a recuperação parcial da atividade metabólica; no entanto foi visto que a sua taxa decresce com o tempo, motivada provavelmente pela falta de matéria orgânica no solo.

## Palavras-chave

dessorção térmica; bastonete térmico; remediação *in situ*; microbiologia;

## Abstract

Viana, Álvaro de Freitas; Araruna Jr., José Tavares (Advisor); Mano Pessôa, Denise Maria (Advisor). **Development of thermal desorption in situ pieces of equipment.** Rio de Janeiro, 2006. 256p. M.Sc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of thermal processes in order to remediate contaminated sites has been shown a great deal of promise, especially when time and effectiveness are considered. The present work describes the development of a new *in situ* device that simultaneously applies heat and delivers compressed air into the porous media. Additionally, a new set of instruments were also designed and built in order to monitor temperature and to extract vapor from the vadose zone. Tests performed at EMBRAPA Solos site and PUC-Rio Campus showed a good performance of the pieces of equipment developed. In addition, microbiological tests performed at the Geotechnical and Environmental Lab showed that is possible to recover the natural microbiota after prolonged exposure to temperatures above 400<sup>0</sup>C. Results have shown a recovery and stabilization of the population in about 3 weeks. However, it was also observed that metabolic activity was not fully recovered, in part due the lack of nutrients and organic matter in the porous media.

## Keywords

Thermal dessorption; *in situ* remediation; microbiology;

# Sumário

1 INTRODUÇÃO	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. Introdução	25
2.1.1. Questões Ambientais	25
2.1.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas	28
2.2. Dessorção Térmica	34
2.2.1. Influência das Altas Temperaturas nas Propriedades do Solo	40
2.2.2. Relação entre o Aumento de Temperatura e o Ecossistema Presente no Solo	44
2.2.2.1. A importância dos microrganismos no solo	45
2.2.2.2. A influência das altas temperaturas no comportamento dos microrganismos	47
2.2.2.3. A interação entre os microrganismos e os contaminantes orgânicos	51
2.2.2.4. Considerações finais sobre as relações entre a aplicação da dessorção térmica e a microbiota	53
2.2.3. Influência das Altas Temperaturas nos Contaminantes Orgânicos	54
2.3. Sistemas de Dessorção Térmica	57
2.4. Bastonete Térmico	60
2.4.1. Fluxo de Calor em Meios Porosos	65
2.4.2. Projeto de Remediação utilizando o Bastonete Térmico	72
2.5. Estudo de Casos	78
2.5.1. Projeto e instalação de um sistema de dessorção térmica <i>in situ</i> para remediação de solos contaminados por resíduos de gás manufacturado em um tanque desativado	79
2.5.2. Remediação de uma antiga usina de tratamento de madeira	81
2.5.3. Outros casos	84
2.6. Comentários Finais	86
3 DESENVOLVIMENTO DO NOVO SDTIS	88
3.1. Introdução	88
3.2. Projeto e Concepção do Novo SDTIS	89

3.2.1. Bastonete Térmico	90
3.2.2. Sondas medidoras de temperatura	98
3.2.3. Elementos Auxiliares	104
3.2.3.1. Controlador de Temperatura	104
3.2.3.2. Aquisitor e Armazenador de Dados	105
3.2.3.3. Bomba/Compressor de Ar e Controlador de Tempo	107
3.2.3.4. Fontes de Energia	108
3.2.3.5. Armário	110
3.2.3.6. Sistema de tratamento de gases	111
3.3. Comentários Finais	112
4 ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO	113
4.1. Introdução	113
4.2. Ensaio de Campo no CE-01	117
4.2.1. Sondagens e medições do nível d'água no CE-01	118
4.2.2. Instalação e montagem do novo SDTIS no CE-01	122
4.2.3. Aplicação do novo SDTIS no CE-01	129
4.2.3.1. Primeiro Experimento	130
4.2.3.2. Segundo Experimento	132
4.2.3.3. Terceiro Experimento	132
4.2.3.4. Quarto Experimento	140
4.2.3.5. Quinto Experimento	145
4.2.3.6. Considerações finais sobre a aplicação da dessorção térmica e demais ensaios no CE-01	152
4.2.4. Amostragem de bloco no CE-01	153
4.3. Ensaio de Laboratório com o solo do CE-01	158
4.3.1. Caracterização	158
4.3.2. Análises de Difração de Raios-X	161
4.3.3. Determinação dos índices físicos 'peso específico total – $\gamma_t$ ', 'peso específico seco – $\gamma_d$ ', 'índice de vazios – e', e 'grau de saturação – S'	162
4.3.4. Propriedades Térmicas	164
4.3.4.1. Procedimentos adotados	166
4.4. Ensaio de Campo no CE-02	171
4.4.1. Sondagens e medições do nível d'água no CE-02	174
4.4.2. Instalação e montagem do novo SDTIS no CE-02	175
4.4.3. Aplicação do novo SDTIS no CE-02	182

4.4.3.1. Primeiro Experimento	183
4.4.3.2. Segundo Experimento	186
4.4.3.3. Terceiro experimento	187
4.4.3.4. Quarto Experimento	187
4.4.3.5. Considerações Finais sobre os experimentos do CE-02	187
4.4.4. Amostragem de bloco no CE-02	187
4.5. Ensaio de Laboratório com o solo do CE-02	187
4.5.1. Caracterizações	187
5 ESTUDOS EM LABORATÓRIO SOBRE A INFLUÊNCIA DO CALOR NA MICROBIOTA DO SOLO	187
5.1. Introdução	187
5.2. Procedimentos adotados	187
5.2.1. Determinação do Teor de Umidade	187
5.2.2. Determinação do Teor de Matéria Orgânica	187
5.2.3. Contagem de Microrganismos Viáveis e Cultiváveis	187
5.2.4. Atividade Microbiana Total	187
5.2.5. Simulações da Dessorção Térmica em Laboratório	187
5.2.6. Recuperação do Solo	187
5.2.6.1. Adição de água	187
5.2.6.2. Adição de nutrientes inorgânicos	187
5.2.6.3. Adição de nutrientes orgânicos	187
5.3. Resultados e Comentários	187
6 CONCLUSÕES	187
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	187
BIBLIOGRAFIA	187
ANEXO I	187
ANEXO II	187
ANEXO III	187

## Lista de figuras

Figura 2.1(a) e (b) – Casos de contaminação do solo ( <i>apud</i> Bicalho, 1997)	29
Figura 2.2 – Gráfico mostrando a regeneração da microbiota após o tratamento térmico (modif. de Heath, 2001)	50
Figura 2.3 – Efeito da temperatura na meia-vida de alguns compostos orgânicos voláteis (modif. de Baker & Kuhlman, 2002)	55
Figura 2.4 – Efeito da temperatura na meia-vida de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAH (modif. de Baker & Kuhlman, 2002)	55
Figura 2.5 – Sistema de Dessorção Térmica <i>In Situ</i> utilizando Cobertores Térmicos (modificado de Stegemeier, 2001)	58
Figura 2.6 – Sistema de dessorção térmica <i>in situ</i> utilizando os bastonetes térmicos (modificado de Stegemeier, 2001)	61
Figura 2.7 – Aceleração da biodegradação dos contaminantes orgânicos com um aumento de temperatura por um aquecedor de rádio-frequência ( <i>apud</i> Dettmer, 2002)	64
Figura 2.8 – Aceleração da biodegradação dos contaminantes orgânicos com um aumento de temperatura por um aquecedor de seis fases ( <i>apud</i> Dettmer, 2002)	64
Figura 2.9 – Esquema do projeto de remediação, Fase 01	73
Figura 2.10 – Esquema do projeto de remediação, Fase 02	76
Figura 2.11 – Esquema do projeto de remediação, Fase 03	77
Figura 2.12 – Esquema do projeto de remediação, Fase 04	78
Figura 3.1 – Bastonete térmico de Baptista (2004), instalado no forno térmico do <b>LGMA/PUC-Rio</b> (vista externa) (Baptista, 2004)	90
Figura 3.2 – Instalação e posicionamento do bastonete no forno, antes do preenchimento do mesmo com o solo contaminado (vista interna) (Baptista, 2004)	90
Figura 3.3 – Bastonete Térmico de Baptista (2004)	91
Figura 3.4 – Esquema da haste prolongadora (sem escala)	92
Figura 3.5 – Projeto estrutural do bastonete térmico e das hastes prolongadoras (dimensões em milímetros)	94
Figura 3.6 – Composição do aquecedor do novo bastonete térmico	95
Figura 3.7 – Aquecedor do novo bastonete térmico montado	96
Figura 3.8 – Peças mecânicas e elétricas do novo bastonete térmico	96

Figura 3.9 – Detalhe da conexão (anilhas) entre as tubulações de injeção de ar	96
Figura 3.10 – Detalhe da luva de conexão entre as tubulações-guia do termopar interno	97
Figura 3.11 – Esquema do projeto estrutural do conjunto sonda-termopares-haste (dimensões em milímetros)	100
Figura 3.12 – Casos genéricos de instalação das sondas medidoras de temperatura	101
Figura 3.13 – Conjunto sonda-termopares-haste	102
Figura 3.14 – Detalhe do acabamento da parte superior da haste	103
Figura 3.15 – Detalhe do acabamento da ponta da sonda	103
Figura 3.16 – Detalhe da conexão (fixada por parafusos) entre a sonda e a haste, com passagem interna livre para os cabos dos termopares ( $\varnothing 3\text{mm}$ )	103
Figura 3.17 – Detalhe do posicionamento da ponta isolada do termopar inferior, soldada a 15cm do final da sonda	103
Figura 3.18 – Controlador de Temperatura	105
Figura 3.19 – ‘Data-logger’ do SDTIS (Baptista, 2004)	106
Figura 3.20 – Compressor de ar (Baptista, 2004)	107
Figura 3.21 – Multi-timer digital (Baptista, 2004)	107
Figura 3.22 – Local da instalação elétrica, no <b>LGMA/PUC-Rio</b> , para os sistemas de dessorção térmica	110
Figura 3.23 – Instalação elétrica do <b>LGMA/PUC-Rio</b> , com medidor de consumo individualizado para os sistemas de dessorção térmica	110
Figura 3.24 – Armário do SDTIS	111
Figura 3.25 – Armário do SDTIS aberto	111
Figura 3.26 – Sistema de tratamento de vapor do <b>NGA/PUC-Rio</b>	112
Figura 4.1 – Possível área experimental, na <b>PUC-Rio</b> , às margens do Rio Rainha e próxima ao campo de futebol (1)	114
Figura 4.2 – Possível área experimental na <b>PUC-Rio</b> , acima de um talude localizado às margens do Rio Rainha e próximo ao campo de futebol (2)	114
Figura 4.3 – Tentativas de se perfurar o solo local com o trado mecânico (1)	114
Figura 4.4 – Tentativas de se perfurar o solo local com o trado mecânico (2)	114
Figura 4.5 – Vista da face do talude, mostrando pedaços de vigas surgindo do solo	115
Figura 4.6 – Mais entulhos (blocos de concreto) visíveis no talude do local	115

Figura 4.7 – Vista frontal da CE-01, situada entre duas árvores e vizinha ao Prédio Sudeste, da <b>EMBRAPA Solos</b>	117
Figura 4.8 – Vista lateral da CE-01, próxima à Rua Jardim Botânico (1)	117
Figura 4.9 – Vista lateral da CE-01, próxima à Rua Jardim Botânico (2)	117
Figura 4.10 – Vista lateral da CE-01 (3)	117
Figura 4.11 – Sondagem S-01, realizada no CE-01	119
Figura 4.12 – Detalhe do nível d'água encontrado pela sondagem S-01, realizada no CE-01	119
Figura 4.13 – Sondagem S-03, realizada no CE-01	119
Figura 4.14 – Vista geral dos serviços de sondagens realizados no CE-01	119
Figura 4.15 – Planta baixa do CE-01, com locação das sondagens S-01, S-02 e S-03 (distâncias em metros)	119
Figura 4.16 – Medidor de nível d'água elétrico portátil (1)	121
Figura 4.17 – Medidor de nível d'água elétrico portátil (2)	121
Figura 4.18 – Locação do bastonete térmico, termopares, armário, gerador, placa informadora sobre o experimento e cordão de segurança (cotas em metros)	124
Figura 4.19 – Execução dos furos a trado, para instalação do bastonete e das sondas (vista geral)	124
Figura 4.20 – Execução dos furos a trado, com locação pré-determinada, para instalação do bastonete e das sondas (vista aproximada)	124
Figura 4.21 – Furos de 2" já executados	125
Figura 4.22 – Instalação do bastonete térmico e das sondas	125
Figura 4.23 – Configuração do bastonete térmico e das sondas medidoras de temperatura no CE-01	126
Figura 4.24 – Sistema de dessorção térmica <i>in situ</i> instalado na <b>EMBRAPA Solos</b>	128
Figura 4.25 – SDTIS instalado na <b>EMBRAPA Solos</b> , vista geral	128
Figura 4.26 – Caixa de força do gerador independente da sua estrutura	133
Figura 4.27 – Coleta de amostras de solo para microbiologia	134
Figura 4.28 – Cravação de anel com ponta biselada para coleta de amostras de solo	134
Figura 4.29 – Cuidados para conservar as amostras de solo para microbiologia	134
Figura 4.30 – Medição da distância do local de extração de amostras até o bastonete	134

Figura 4.31 – Cravação de trado para coleta de amostras	135
Figura 4.32 – Recolhimento de amostras para determinação de umidade	135
Figura 4.33 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006	136
Figura 4.34 – Detalhe do rompimento de um dos terminais do cartucho de resistência do aquecedor, com sinais de ‘queimado’	141
Figura 4.35 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006	143
Figura 4.36 – Vista do CE-01, mostrando grande parte da área tomada por entulhos	146
Figura 4.37 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006	148
Figura 4.38 – Abertura de trincheira (1)	154
Figura 4.39 – Abertura de trincheira (2)	154
Figura 4.40 – Abertura de trincheira (3)	154
Figura 4.41 – Abertura de trincheira (4)	154
Figura 4.42 – Modelagem do bloco (1)	155
Figura 4.43 – Modelagem do bloco (2)	155
Figura 4.44 – Bloco de solo moldado	156
Figura 4.45 – Isolamento do bloco	156
Figura 4.46 – Isolamento do bloco	156
Figura 4.47 – Vista geral do serviço de extração do bloco de solo	156
Figura 4.48 – Curvas granulométricas das sondagens 01, 02 e 03, sob profundidade de 0 a 0,5m	160
Figura 4.49 – Curvas granulométricas das sondagens 01, 02 e 03, sob profundidade de 0,5 a 1,0m	160
Figura 4.50 – Instrumento ‘ <i>Thermal Properties Analysis</i> ’, do tipo KD2	165
Figura 4.51 – Bloco de solo indeformado aberto, apresentando rachaduras diagonais	167
Figura 4.52 – Posicionamento dos pontos no bloco de solo (dimensões em centímetros)	167
Figura 4.53 – Ensaio em andamento para determinação dos parâmetros térmicos na face 01 do bloco, ponto 1.1	168
Figura 4.54 – Ensaio em andamento na face 02 do bloco, ponto 2.1	168
Figura 4.55 – Ensaio em andamento na face 03 do bloco (rachaduras mais acentuadas), ponto 3.1	168

Figura 4.56 – Ensaio em andamento na face 03 do bloco (localização do ponto 3.1)	168
Figura 4.57 – Vista da CE-02, próxima à entrada principal da <b>PUC-Rio</b> (1)	171
Figura 4.58 – Vista da CE-02 (2)	171
Figura 4.59 – Local dos experimentos (1)	172
Figura 4.60 – Local dos experimentos, com laje de concreto (2)	172
Figura 4.61 – Perfuração da laje de concreto com a britadeira	172
Figura 4.62 – Laje de concreto perfurada	172
Figura 4.63 – Furos executados	173
Figura 4.64 – Sondagens no CE-02	175
Figura 4.65 – Fotografia do CE-02, já com toda a aparelhagem do novo SDTIS	176
Figura 4.66 – Instalação do sistema de dessorção térmica <i>in situ</i>	177
Figura 4.67 – Mistura caulim-água	179
Figura 4.68 – Medição dos parâmetros térmicos da mistura caulim-água	179
Figura 4.69 – Furos preenchidos com a mistura	181
Figura 4.70 – Aplicação do bastonete térmico no CE-02, de 20/04/2006 a 25/04/2006	185
Figura 4.71 – Configuração do segundo experimento no CE-02	187
Figura 4.72 - Novo cartucho de resistência (vista superior)	187
Figura 4.73 – Novo cartucho de resistência (vista lateral)	187
Figura 4.74 – Detalhe inferior da base do cartucho fabricada no <b>LGMA</b> , com 02 furos	187
Figura 4.75 – Detalhe superior da base do cartucho fabricada no <b>LGMA</b>	187
Figura 4.76 – Cartucho conectado ao elemento rosca	187
Figura 4.77 – Detalhe da conexão entre o cartucho e o tubo inferior do bastonete	187
Figura 4.78 – Novo aquecedor do bastonete térmico	187
Figura 4.79 – Detalhe do novo aquecedor do bastonete térmico	187
Figura 4.80 – Elementos estruturais do bastonete térmico	187
Figura 4.81 – Cartucho de resistência danificado (1)	187
Figura 4.82 – Cartucho de resistência danificado (2)	187
Figura 4.83 – Detalhe da resistência saindo do cartucho através de uma abertura	187
Figura 4.84 – Aparência esbranquiçada do cartucho	187
Figura 4.85 – Instalação dos componentes do novo SDTIS no CE-02	187

Figura 4.86 – Aplicação do bastonete térmico no CE-02, de 06/07/2006 a 31/07/2006	187
Figura 4.87 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 42 cm de distância	187
Figura 4.88 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 70 cm de distância	187
Figura 4.89 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 34 cm de distância	187
Figura 4.90 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 60 cm de distância	187
Figura 4.91 – Curvas granulométricas das sondagens 03 e 04, sob profundidade de 0,5 a 1,0m	187
Figura 4.92 – Curvas granulométricas das sondagens 03 e 04, sob profundidade de 1,0 a 1,5m	187
Figura 5.1 – Gráfico UFC <i>versus</i> tempo	187
Figura 5.2 – Gráfico FDA <i>versus</i> tempo	187
Figura A.I.1 – Sondagem 01, de 0 a 0,5m	187
Figura A.I.2 – Sondagem 01, de 0,5 a 1,0m	187
Figura A.I.3 – Sondagem 01, de 1,0 a 1,5m	187
Figura A.I.4 – Sondagem 01, de 1,5 a 2,0m	187
Figura A.I.5 – Sondagem 02, de 0 a 0,5m	187
Figura A.I.6 – Sondagem 02, de 0,5 a 1,0m	187
Figura A.I.7 – Sondagem 02, de 1,0 a 1,5m	187
Figura A.I.8 – Sondagem 02, de 1,5 a 2,0m	187
Figura A.I.9 – Sondagem 03, de 0 a 0,5m	187
Figura A.I.10 – Sondagem 03, de 0,5 a 1,0m	187
Figura A.I.11 – Sondagem 02, de 1,0 a 1,5m	187
Figura A.I.12 – Sondagem 03, de 1,5 a 2,0m	187
Figura A.I.13 – Sondagem 03, de 0 a 0,5m	187
Figura A.I.14 – Sondagem 03, de 0,5 a 1,0m	187
Figura A.I.15 – Sondagem 03, de 1,0 a 1,5m	187
Figura A.I.16 – Sondagem 04, de 0 a 0,5m	187
Figura A.I.17 – Sondagem 04, de 0,5 a 1,0m	187
Figura A.I.18 – Sondagem 03, de 1,0 a 1,5m	187
Figura A.II.1 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 00	187
Figura A.II.2 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 01	187

Figura A.II.3 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 02	187
Figura A.II.4 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 03	187
Figura A.II.5 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 00	187
Figura A.II.6 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 01	187
Figura A.II.7 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 02	187
Figura A.II.8 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 03	187
Figura A.II.9 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 00	187
Figura A.II.10 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 01	187
Figura A.II.11 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 02	187
Figura A.II.12 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 03	187
Figura A.III.1 – Difratoograma S-01, de 0,5 a 1,0m	187
Figura A.III.2 – Difratoograma S-02, de 0,5 a 1,0m	187
Figura A.III.3 – Difratoograma S-02, de 0,0 a 0,5m	187
Figura A.III.4 – Difratoograma S-03, de 0 a 0,5m	187
Figura A.III.5 – Difratoograma S-03, de 0 a 0,5m	187

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Atividades Potencialmente Poluidoras	26
Tabela 2.2 – Técnicas de remediação de solo e água existentes no mercado (fontes diversas)	33
Tabela 2.3 – Tipo e risco de contaminação provenientes das atividades industriais (fontes variadas, <i>adapt.</i> Viana, 2002)	36
Tabela 2.4 – Ponto de Ebulição dos BTEX (Davis, 1997, <i>apud</i> Baptista, 2004)	38
Tabela 2.5 – Classificação generalizada das técnicas de dessorção térmica	40
Tabela 2.6 – Distribuição de microrganismos no solo (Starc, 1942, <i>apud</i> Alexander, 1977)	47
Tabela 2.7 – Classificação das bactérias quanto à temperatura ambiente (Dettmer, 2002)	48
Tabela 2.8 – Mecanismos dos compostos orgânicos (Baker & Kuhlman, 2002)	54
Tabela 2.9 – Propriedades Térmicas do Solo (Mitchell, 1993)	68
Tabela 2.10 – Dimensionamento do Problema (Baker <i>et al</i> , 2004)	79
Tabela 2.11 – Quantificação do Problema (Baker <i>et al</i> , 2004)	79
Tabela 2.12 – Especificações do Sistema de Tratamento (modificada de Baker <i>et al</i> , 2004)	81
Tabela 2.13 – Níveis de contaminação antes e após o tratamento (Bierschenk <i>et al</i> , 2004)	82
Tabela 3.1 – Composição dos materiais utilizados (Romeiro, 1997)	95
Tabela 3.2 – Estimativa de custos relativos ao novo protótipo do bastonete térmico	98
Tabela 3.3 – Custo unitário do conjunto de materiais das sondas medidoras de temperatura	99
Tabela 3.4 – Especificações do controlados de temperatura	105
Tabela 4.1 – Dados pluviométricos médios mensais de algumas estações em 2005 e 2006 (precipitação em mm) (GEO-RIO, 2005/2006)	122
Tabela 4.2 – Configuração literal dos termopares no CE-01	127
Tabela 4.3 – Programação do abastecimento do gerador	129
Tabela 4.4 – Comparação dos registros de temperatura máxima nos terceiro, quarto e quinto experimentos	150
Tabela 4.5 – Resumo dos Resultados dos Ensaio de Caracterização	159

Tabela 4.6 – Ensaio de Difração de raios-x	161
Tabela 4.7 – Parâmetros Térmicos do Ponto 1.1	169
Tabela 4.8 – Parâmetros Térmicos do Ponto 1.2	169
Tabela 4.9 – Parâmetros Térmicos do Ponto 2.1	169
Tabela 4.10 – Parâmetros Térmicos do Ponto 2.2	169
Tabela 4.11 – Parâmetros Térmicos do Ponto 2.3	169
Tabela 4.12 – Parâmetros Térmicos do Ponto 3.1	169
Tabela 4.13 – Posicionamento dos furos em relação ao furo do bastonete térmico	173
Tabela 4.14 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim	180
Tabela 4.15 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim, 24 horas após a fabricação	180
Tabela 4.16 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo do bastonete térmico	181
Tabela 4.17 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 01	181
Tabela 4.18 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 02	181
Tabela 4.19 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 03	182
Tabela 4.20 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 04	182
Tabela 4.21 – Identificação e posicionamento das sondas medidoras de temperatura em relação ao bastonete térmico	187
Tabela 4.22 – Resultados do quarto experimento no CE-02	187
Tabela 4.23 – Resumo dos Resultados dos Ensaio de Caracterização	187
Tabela 5.1 – Resultados das amostras de solo superficiais	187
Tabela 5.2 – Resultados de sub-amostra do bloco de solo antes de ser levada à mufla	187
Tabela 5.3 – Resultados das tentativas de recuperação das sub-amostras do bloco de solo indeformado (entre 50 e 80 cm de profundidade) após serem postas na mufla	187

## Lista de quadros

Quadro 4.1– Determinação dos índices físicos	163
--	-----