

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 Pessoa

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 desSORÇÃO 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 desorption; *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 |
| <br>   |     |
| 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 |
| <br>  |     |
| 5 ESTUDOS EM LABORATÓRIO SOBRE A INFLUÊNCIA DO CALOR NA<br>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 |
| <br>  |     |
| 6 CONCLUSÕES  | 187 |
| <br>  |     |
| SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS  | 187 |
| <br>  |     |
| BIBLIOGRAFIA  | 187 |
| <br>  |     |
| ANEXO I   | 187 |
| <br>  |     |
| ANEXO II  | 187 |
| <br>  |     |
| 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<br>(fontes diversas)                                     | 33  |
| Tabela 2.3 – Tipo e risco de contaminação provenientes<br>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<br>(Starc, 1942, <i>apud</i> Alexander, 1977)                                 | 47  |
| Tabela 2.7 – Classificação das bactérias quanto<br>à temperatura ambiente (Dettmer, 2002)   | 48  |
| Tabela 2.8 – Mecanismos dos compostos<br>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<br>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<br>térmico   | 98  |
| Tabela 3.3 – Custo unitário do conjunto de materiais das sondas medidoras de<br>temperatura                                       | 99  |
| Tabela 3.4 – Especificações do controlados de temperatura   | 105 |
| Tabela 4.1 – Dados pluviométricos médios mensais de algumas estações em<br>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,<br>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 |
|--|-----|

# 1 INTRODUÇÃO

O uso do calor como meio alternativo para a remediação de áreas contaminadas por compostos orgânicos – organoclorados, hidrocarbonetos derivados de petróleo, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, 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, o seu tempo de execução e o custo de operação (fontes diversas). Isto vem sendo comprovado no exterior há mais de dez anos, quando algumas instituições, como a **TerraTherm Inc.**, começaram a desenvolver protótipos que utilizassem este tipo de energia para tentar solucionar o problema dos sítios contaminados. Desde então, a partir de estudos e pesquisas relacionadas ao tema, eles vêm sendo avaliados e aperfeiçoados.

Atualmente, existem três modelos básicos de aparelhos que utilizam o princípio da dessorção térmica:

1. Bastonete térmico;
2. Cobertor térmico;
3. Unidade *ex situ*.

Apesar de se basearem no mesmo princípio, cada um deles possui diferentes características e elementos estruturais, o que modifica a sua forma de atuação, conforme será mostrado ao longo desta dissertação. Outro fator importante é a aplicabilidade de cada um, onde se observa que os dois primeiros modelos podem ser utilizados diretamente no local contaminado (remediação *in situ*), enquanto o terceiro necessita da remoção do solo do seu local de origem para tratá-lo na superfície do terreno ou em local apropriado (remediação *on site* ou *ex situ / off site*).

Embora bastante conhecidos no exterior, sobretudo nos Estados Unidos – país pioneiro na implementação deste tipo de tecnologia conforme se tem notícia – no Brasil ainda não se têm muitos registros sobre a sua utilização, com exceção de

raras empresas prestadoras de serviços ambientais, como a **Essencis – Soluções Ambientais**, que utilizam aparelhagens importadas do exterior, em geral as unidades *ex situ*. No entanto, há cerca de sete anos, a **Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio**, através do seu **Núcleo de Geotecnia Ambiental – NGA**, vem desenvolvendo pesquisas relacionadas ao tema “dessorção térmica”, com autores como Duarte (2004), Pires (2004) e Baptista (2004), proporcionando a criação de novos protótipos, com base nos modelos já existentes, com o objetivo de se tentar disseminar e consolidar o uso desta tecnologia no país.

Seguindo esta linha de pesquisa, a presente dissertação se propõe a aperfeiçoar e avaliar o desempenho do bastonete térmico, instrumento desenvolvido inicialmente por Baptista, em 2004, e que obteve bons resultados quando testado para remediar solos contaminados por resíduos orgânicos oleosos utilizando a aplicação direta de calor no material.

Vale ressaltar que este instrumento também pode ser utilizado para outras aplicações que exijam que o meio poroso atinja determinadas temperaturas, conforme será mostrado ao longo deste trabalho.

Portanto, foi construído um novo protótipo e, com relação a ele, foram feitas algumas modificações estruturais com o objetivo de aumentar o seu poder de aquecimento, lhe fornecer maiores resistência e durabilidade, e facilitar a sua introdução no solo sob quaisquer profundidades. Além disso, outros componentes auxiliares foram acoplados ao sistema, com o intuito de torná-lo apto a suportar e avaliar os problemas tipicamente apresentados em experiências de campo. Um deles com o intuito de fornecer a energia elétrica ao sistema em campo, enquanto outros foram criados de forma a melhor avaliar o seu desempenho em termos de propagação de calor no solo.

Depois de concebido, o novo sistema de dessorção térmica *in situ* foi testado em duas áreas que não apresentavam qualquer presença de contaminantes: a primeira localizada no bairro Jardim Botânico, e a outra no bairro Gávea, ambas na cidade do Rio de Janeiro - RJ. Para cada ensaio procurou-se avaliar, além do seu comportamento quando submetido a condições naturais de campo, a quantificação da propagação do calor ao longo do tempo para pontos distribuídos em diferentes direções e distâncias em relação ao bastonete. Ou

seja, a partir de uma temperatura emitida pelo aquecedor, qual seria o tempo de resposta em diversos pontos ao seu entorno, em termos de variação de temperatura e para aquele determinado tipo de solo sob condições naturais.

Foram feitas análises de difração de Raios-X com o material coletado, a fim de se tentar esclarecer alguns dos efeitos das altas temperaturas no comportamento físico-químico do mineral presente nos solos locais.

Por outro lado, o trabalho também incluiu a realização de análises microbiológicas para se tentar avaliar o comportamento da microbiota nativa em períodos antes, durante e após a aplicação de calor no solo. E, como se espera que a sobrevivência destes microrganismos seja mínima, ou nenhuma, serão feitos alguns pós-tratamentos com o objetivo de se tentar possibilitar a sua regeneração em termos de aptidão à existência de novos seres vivos. Há algum tempo tais questões vêm sendo discutidas no âmbito geotécnico ambiental e, em um patamar mais alto, pela legislação ambiental e, de certa forma, contrapõem-se ao uso do princípio da dessorção térmica na remediação de áreas contaminadas.

Aliado a este ponto, está a possibilidade de compostos orgânicos liberarem dioxinas quando submetidos a elevadas temperaturas, o que também serve como restrição ao uso da técnica. Porém, este segundo fator não será analisado no presente momento.

Os ensaios de laboratório, dentre os quais se incluem os de caracterização física do material, de determinação dos seus parâmetros térmicos e de microbiologia, foram realizados no **Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio – LGMA/PUC-Rio**.

Ressaltando os seus benefícios em termos de projeto, o presente trabalho pretende fornecer um maior embasamento prático sobre o uso do bastonete térmico em campo. Como a sua eficiência na remediação de solos contaminados por resíduos oleosos, sob condições controladas, já está comprovada pelo trabalho de Baptista (2004), busca-se com este trabalho mais um passo em se tentar inseri-lo no mercado brasileiro, abrindo assim novas portas para a sua utilização, além da demonstração de que é possível fazer uma boa tecnologia no Brasil, sem a necessidade de se buscá-la no exterior.

O presente trabalho encontra-se dividido em mais sete capítulos, além desta introdução.

O segundo capítulo trará uma revisão bibliográfica sobre o assunto abordando, inicialmente, algumas questões ambientais gerais para, em seguida, chegar ao tema dessorção térmica. A partir daí, será dado um enfoque principal ao bastonete térmico, onde serão apresentados, além de uma parte teórica, alguns casos de projetos realizados no exterior e trabalhos publicados na literatura. Para complementar, serão relatadas algumas explicações de profissionais da área sobre a influência das altas temperaturas no solo e ao ecossistema. Com isso, pretende-se fornecer os embasamentos teóricos e técnicos necessários para a compreensão do assunto.

No terceiro, serão apresentados o projeto e a concepção do novo protótipo desenvolvido para este trabalho, bem como de todo o sistema de apoio à utilização e avaliação do seu desempenho.

No quarto capítulo, serão mostradas as aplicações do bastonete térmico nos campos experimentais, ensaios de campo preliminares e complementares, além dos ensaios realizados em laboratório. Para cada um deles são apresentados os resultados obtidos, os quais serão analisados e comentados.

No quinto capítulo, serão mostrados os ensaios de microbiologia, com destaque para a avaliação e análise da sobrevivência da microbiota sob as temperaturas utilizadas para aplicação da dessorção térmica nos ensaios de campo, juntamente com tentativas de recuperação deste solo e da sua suscetibilidade a abrigar novos organismos após o tratamento térmico.

Por fim, o sexto capítulo trará as conclusões obtidas neste trabalho, juntamente com algumas sugestões para novos aperfeiçoamentos.

Ao final do trabalho, encontram-se os Anexos I, II e III, nos quais são apresentadas algumas planilhas e gráficos obtidos a partir dos ensaios realizados.



## 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).

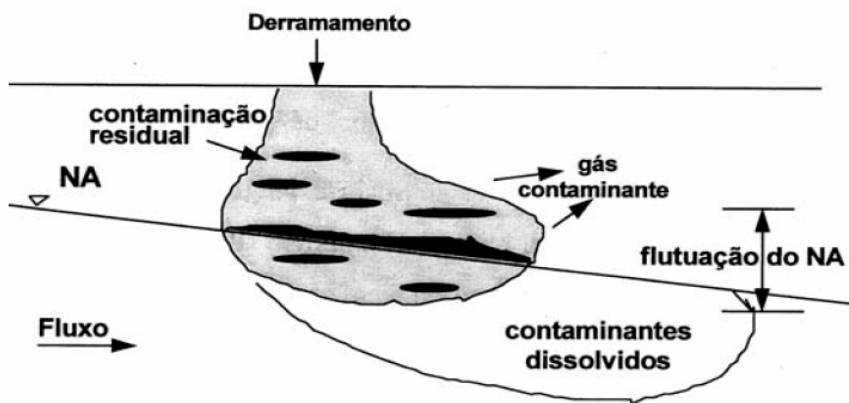
Com a dificuldade em se controlar possíveis “acidentes”, a questão da remediação de áreas contaminadas por produtos potencialmente causadores de algum dano ao ecossistema ou à saúde humana vem sendo tratada com grande relevância por parte das empresas – o maior exemplo é a **PETROBRAS – Petróleo Brasileiro 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.

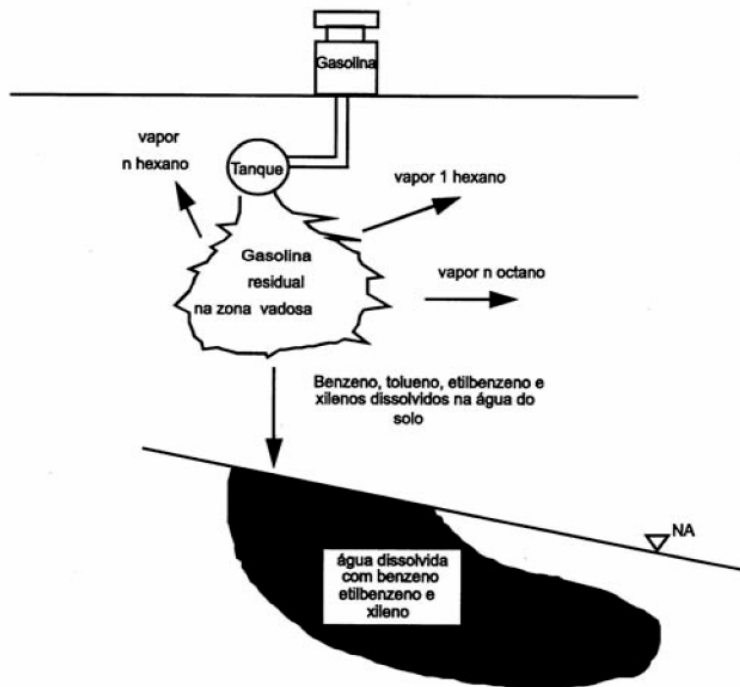
### **2.1.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas**

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).

cossolvência, 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 [kg.m/s<sup>2</sup>];
- A, B e C: constantes;
- T: temperatura do contaminante [°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.

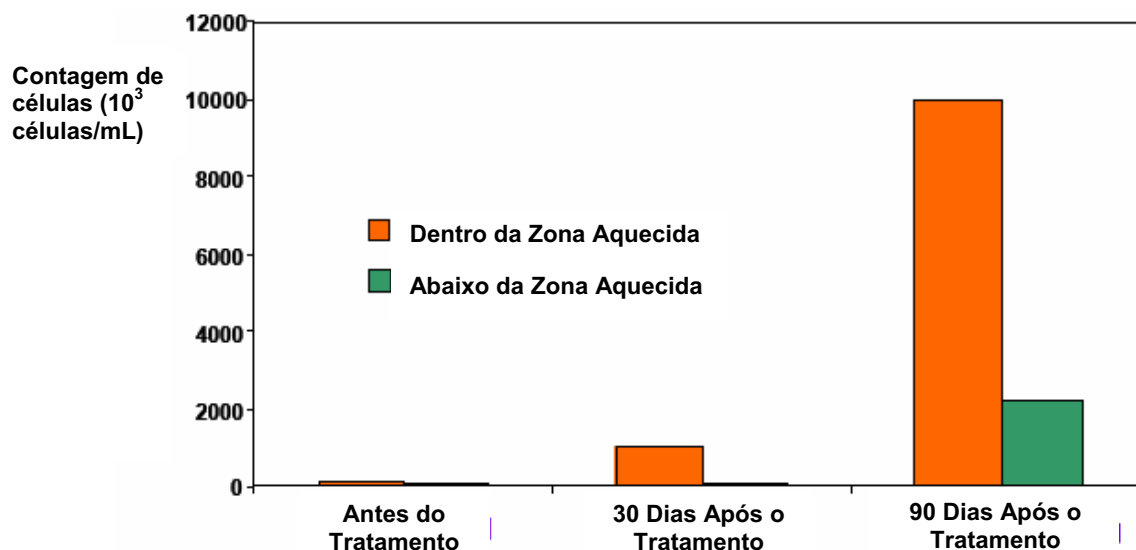


Figura 2.2 – Gráfico mostrando a regeneração da microbiota após o tratamento térmico (modif. de Heath, 2001)

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            |

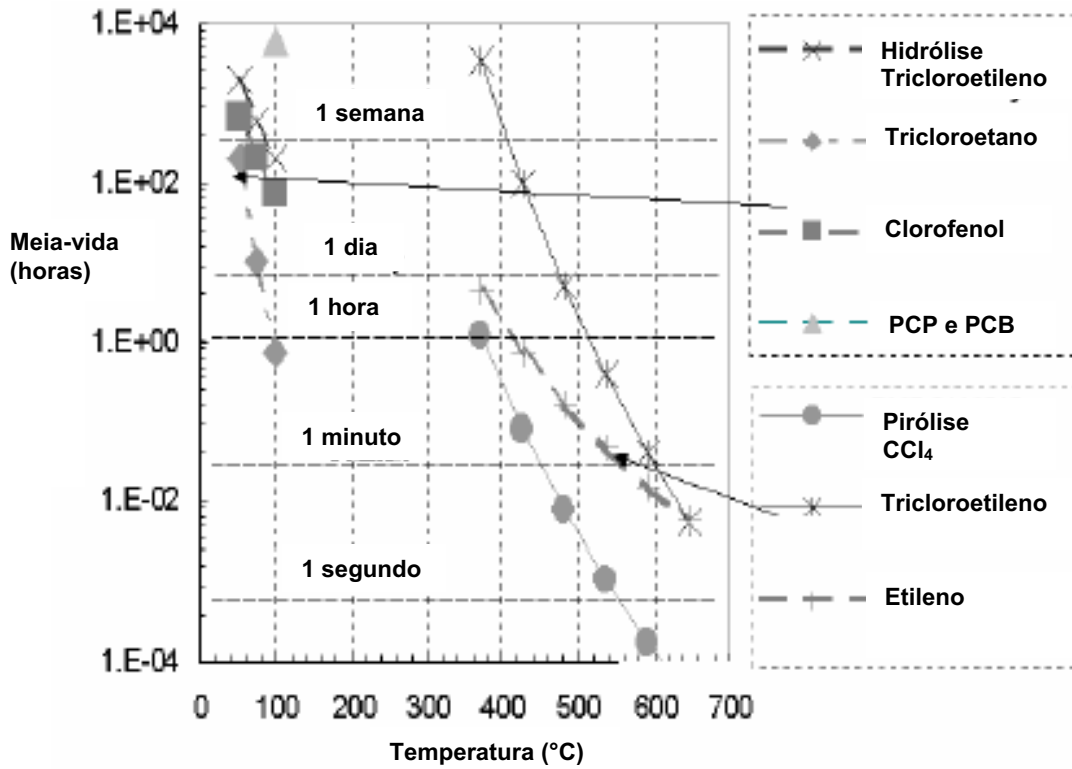


Figura 2.3 – Efeito da temperatura na meia-vida de alguns compostos orgânicos voláteis (modif. de Baker & Kuhlman, 2002)

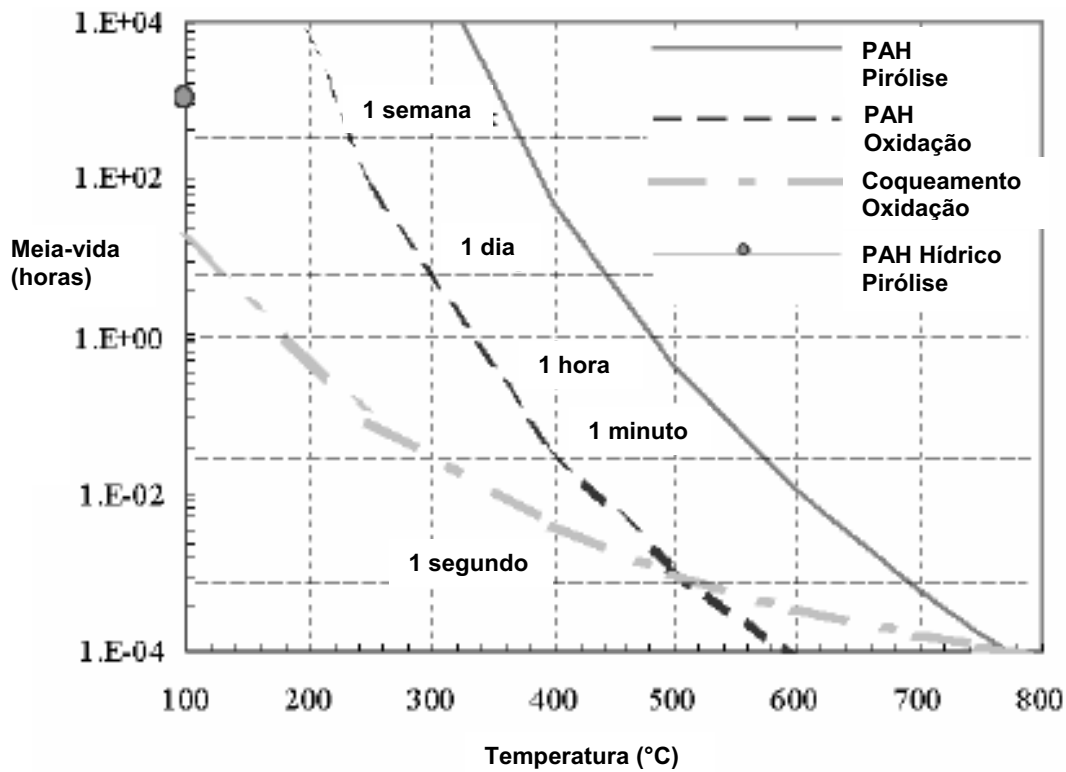


Figura 2.4 – Efeito da temperatura na meia-vida de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAH (modif. de Baker & Kuhlman, 2002)

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.

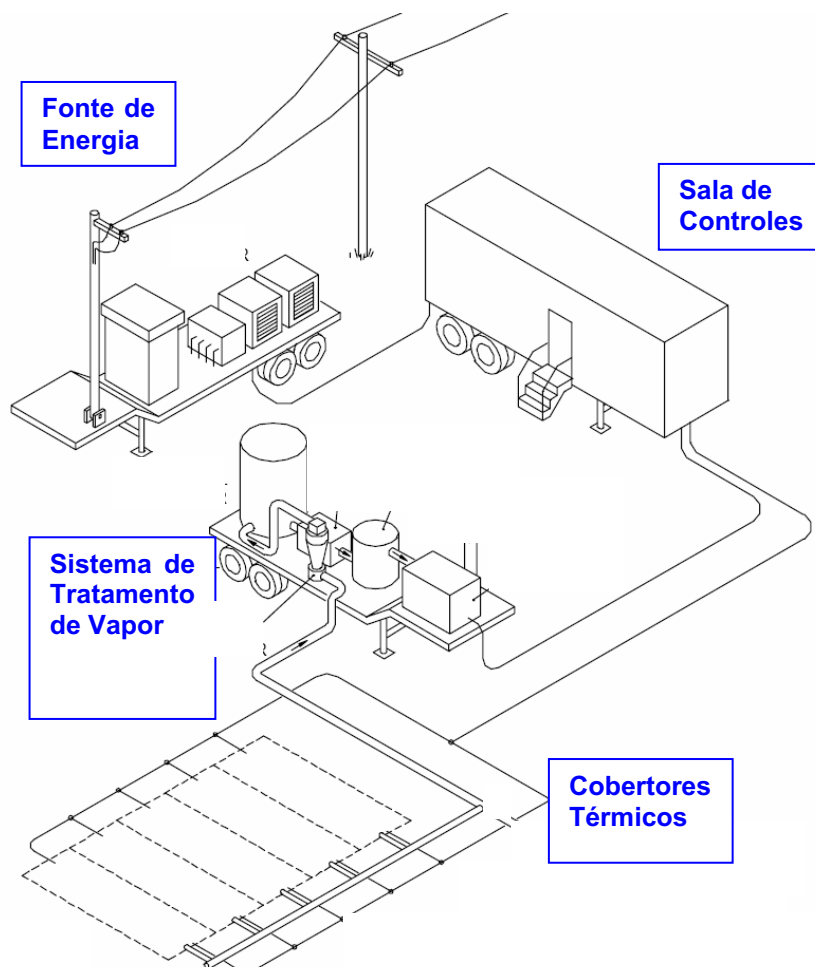


Figura 2.5 – Sistema de Dessorção Térmica *In Situ* utilizando Cobertores Térmicos (modificado de Stegemeier, 2001)

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.

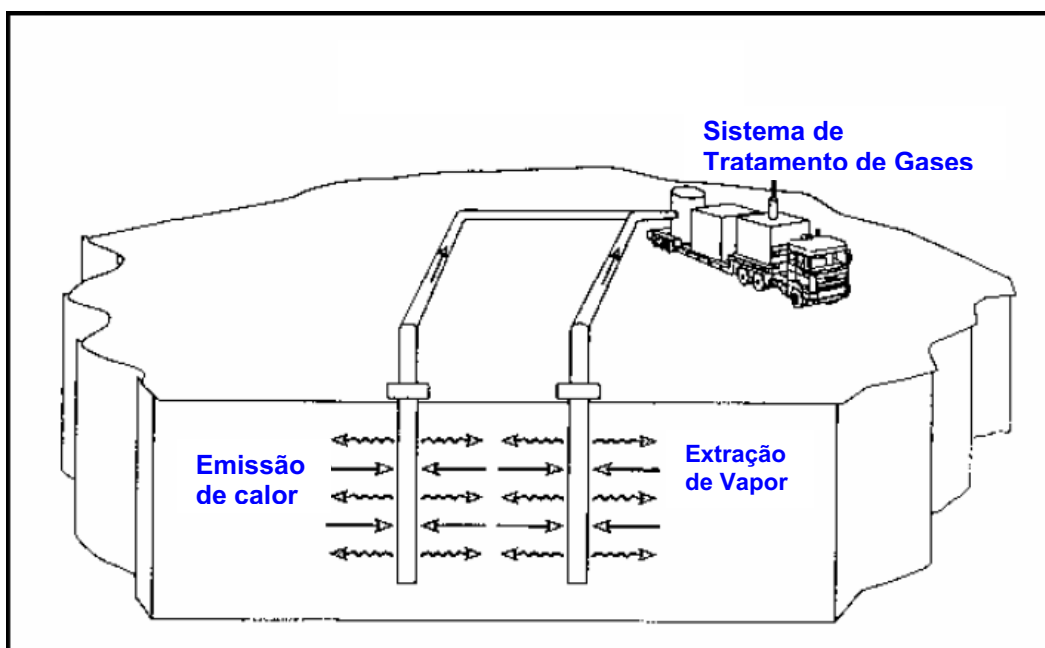


Figura 2.6 – Sistema de desorção térmica *in situ* utilizando os bastonetes térmicos (modificado de Stegemeier, 2001)

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.

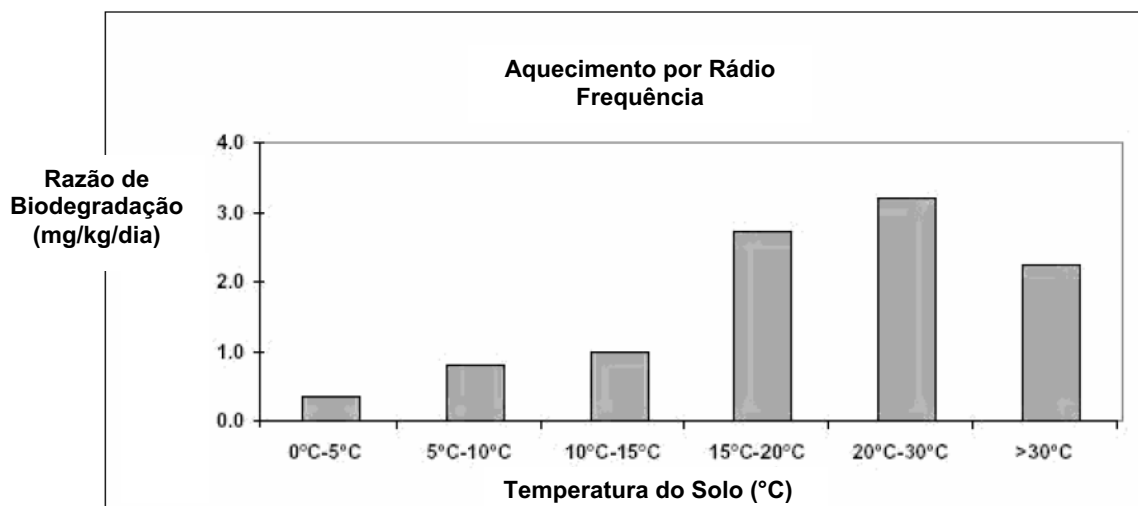


Figura 2.7 – Aceleração da biodegradação dos contaminantes orgânicos com um aumento de temperatura por um aquecedor de rádio-frequência (*apud* Dettmer, 2002)

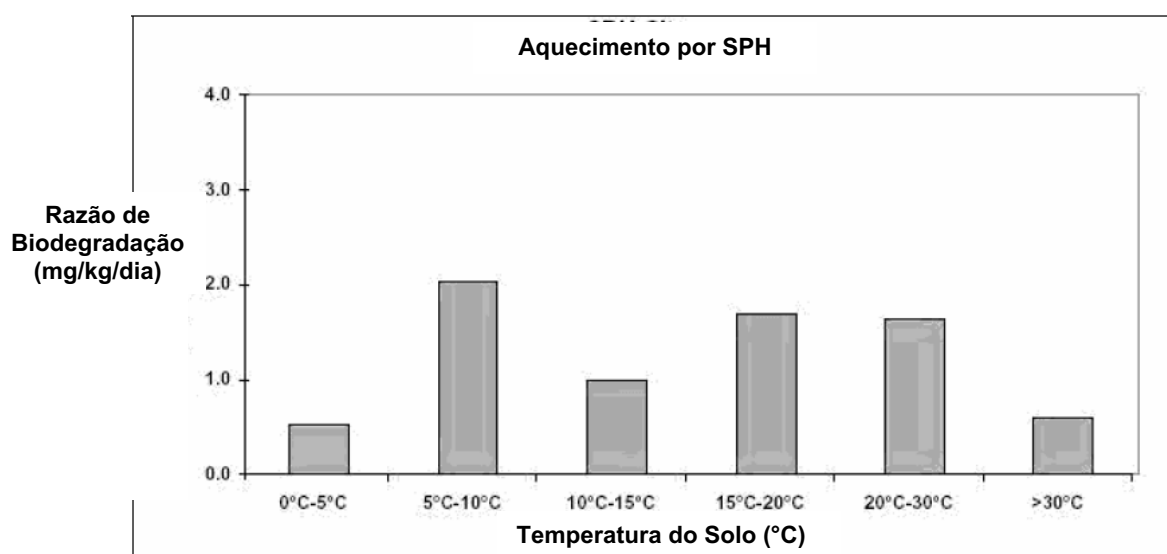


Figura 2.8 – Aceleração da biodegradação dos contaminantes orgânicos com um aumento de temperatura por um aquecedor de seis fases (*apud* Dettmer, 2002)



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

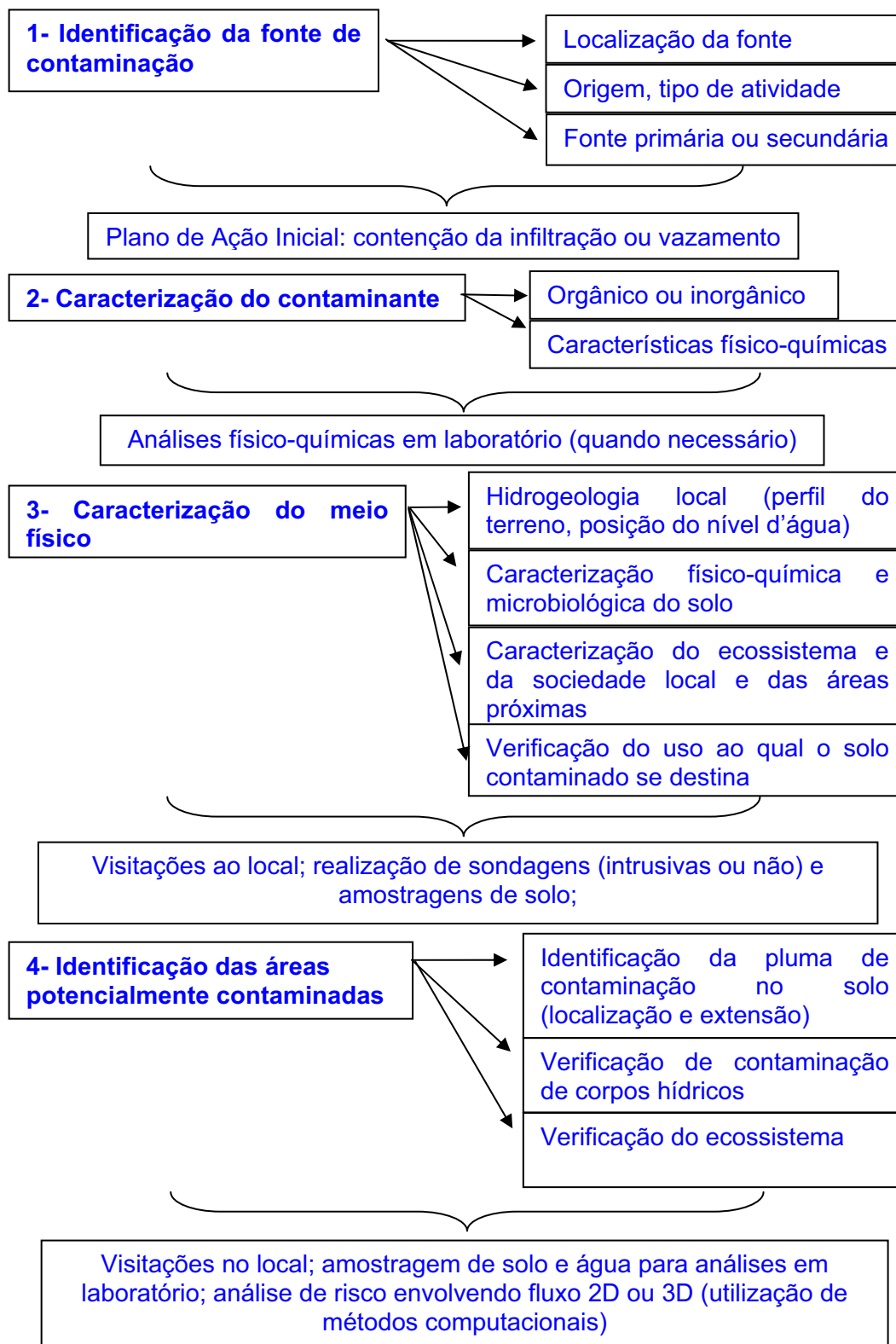
Em um projeto de remediação de áreas contaminadas utilizando o sistema de dessorção térmica *in situ*, cujos elementos principais são os bastonetes térmicos, o presente trabalho sugere a execução dos procedimentos apresentados nos esquemas a seguir, divididos em quatro fases e ilustrados com as Figuras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

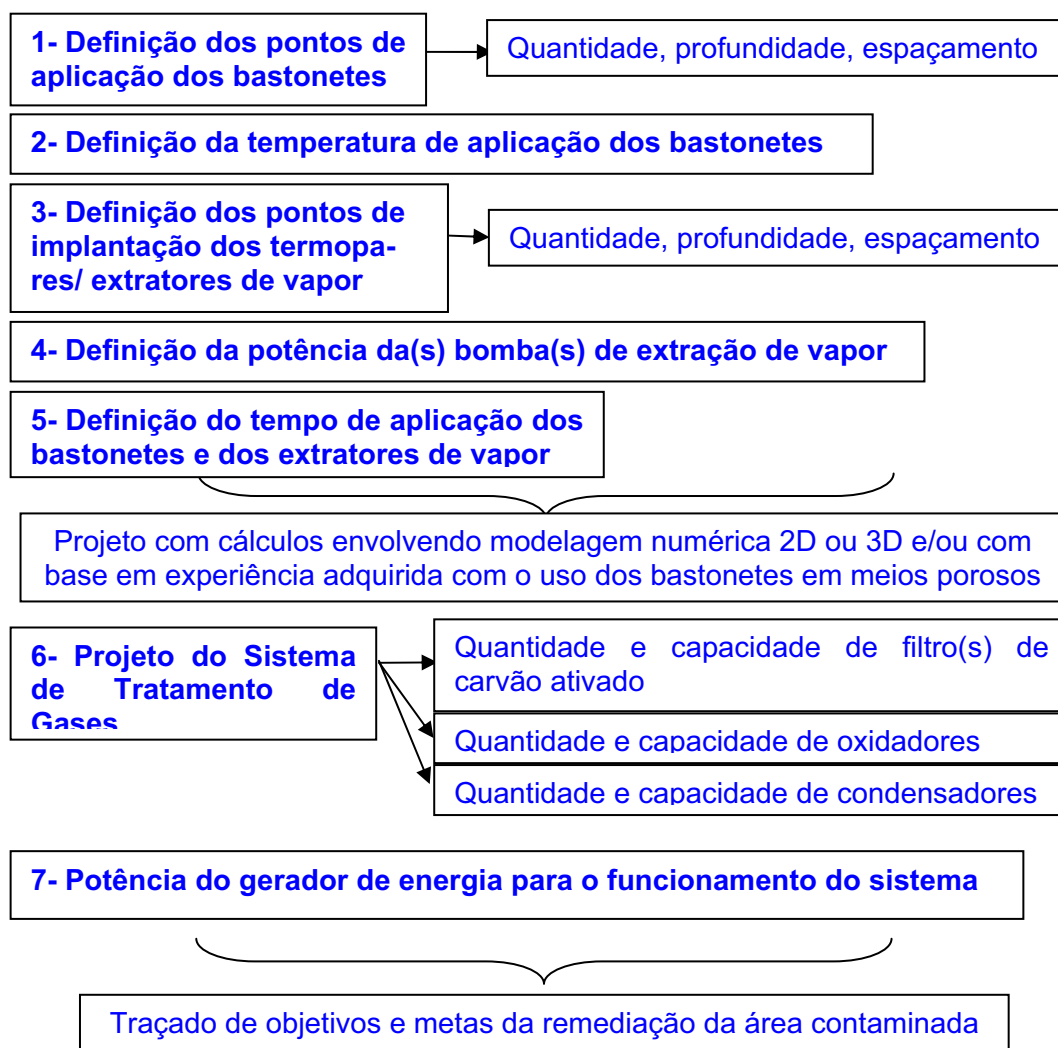


Figura 2.10 – Esquema do projeto de remediação, Fase 02

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***

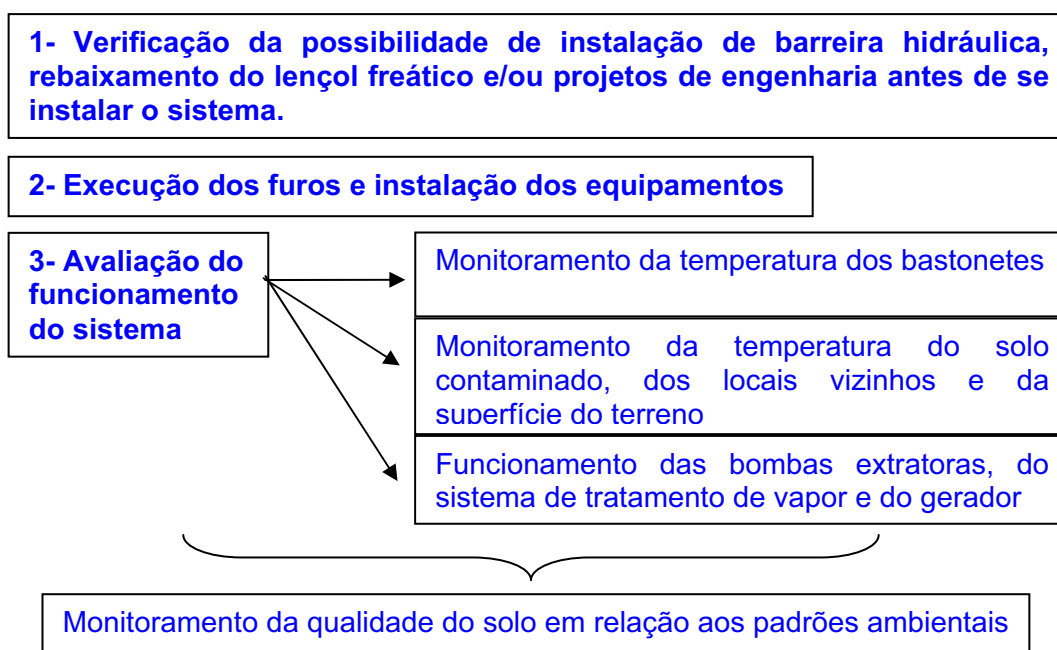


Figura 2.11 – Esquema do projeto de remediação, Fase 03

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**

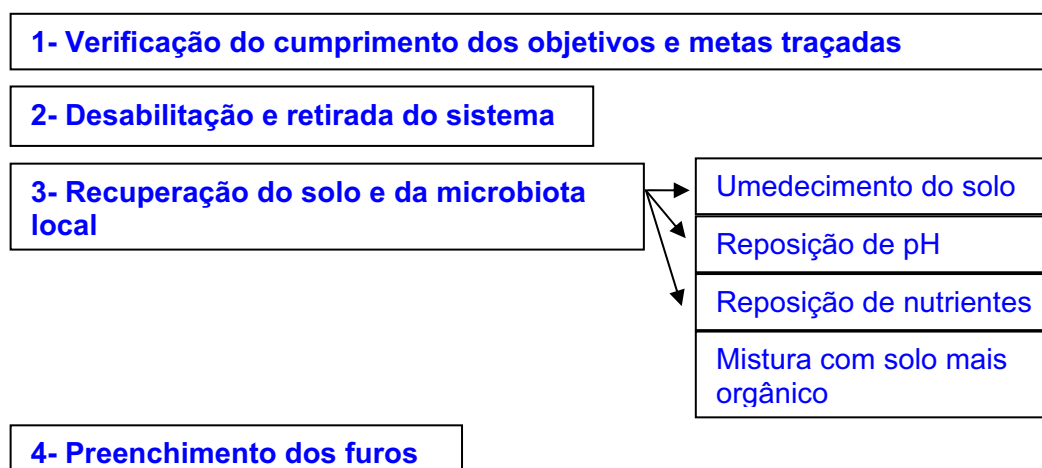


Figura 2.12 – Esquema do projeto de remediação, Fase 04

## 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.

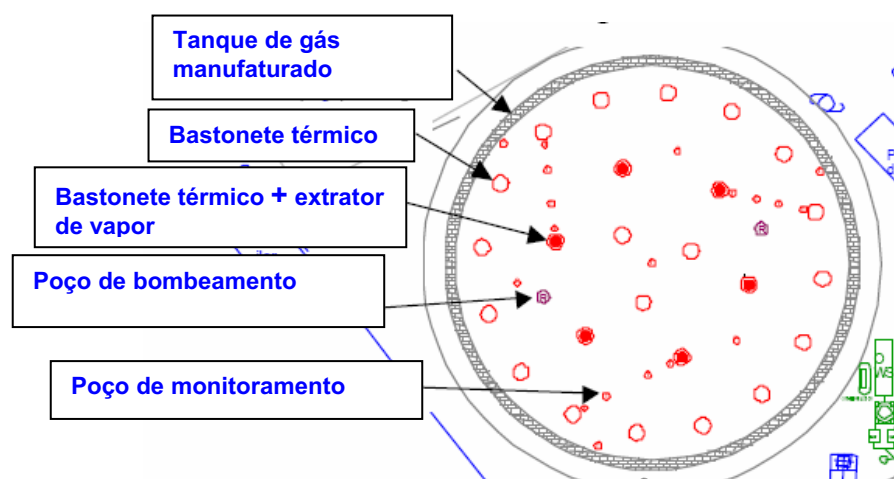


Figura 2.13 – Vista em planta da configuração da distribuição dos bastonetes, extratores de vapor, pontos de monitoramento, e poços de bombeamento (Baker *et al*, 2004)

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

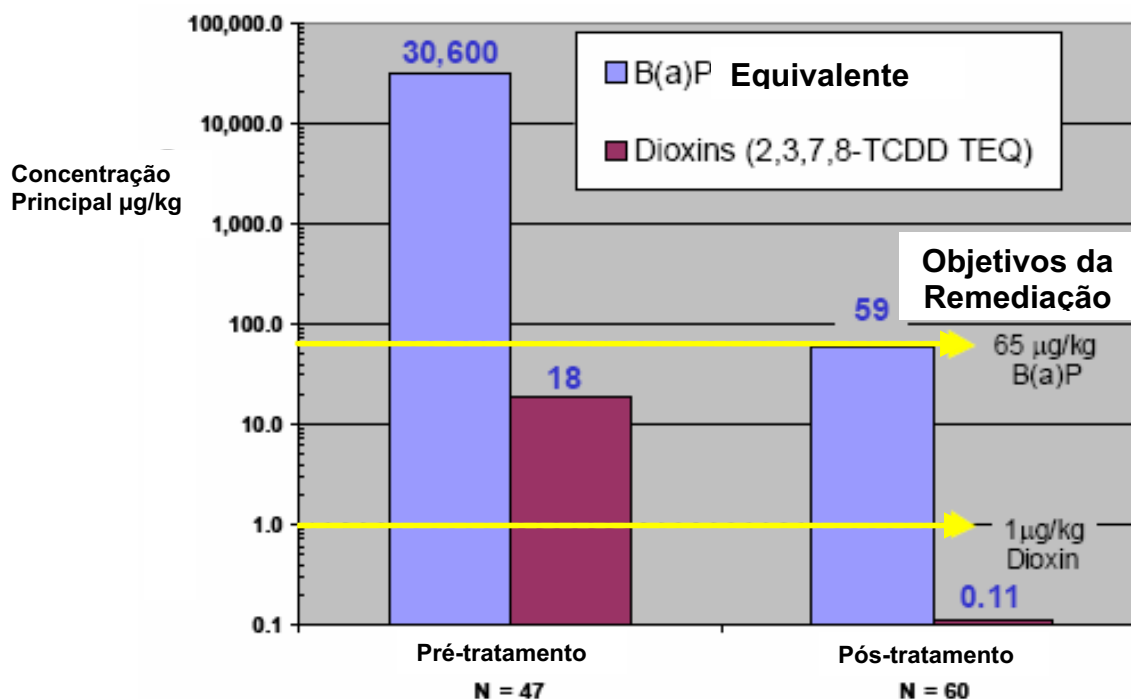


Figura 2.15 – Concentrações antes e após o tratamento (Bierschenk *et al*, 2004)

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.)

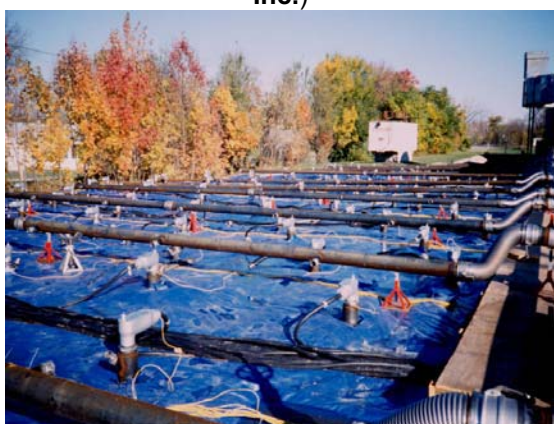


Figura 2.26 – Remediação de uma área contaminada (TerraTherm Inc.)



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.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO NOVO SDTIS

#### 3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados o desenvolvimento do novo bastonete térmico, bem como de todos os seus componentes de apoio que, juntos, constituem o sistema de dessorção térmica *in situ* – SDTIS. A grande maioria foi projetada e concebida no **Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente – LGMA**.

O novo bastonete térmico se baseou no instrumento construído por Baptista (2004), porém com algumas modificações no sentido de aumentar o seu poder calorífico, direcionar a sua aplicabilidade para campo, bem como lhe fornecer maior resistência às altas temperaturas e às condições desfavoráveis ambientais que, por ventura, podem vir a ocorrer.

Os componentes de apoio ao bastonete térmico e que compõem o SDTIS são:

- 04 sondas contendo 02 termopares de ponta isolada em cada um;
- 01 controlador de temperatura;
- 01 unidade aquisitora e armazenadora de dados;
- 01 bomba/compressor de ar;
- 01 gerador de energia elétrica, a diesel;
- 01 fonte de energia elétrica da rede pública convencional, com medidor de consumo próprio e com medidor comum ao estabelecimento;
- 01 armário, para armazenagem de equipamentos em geral, instrumentos e ferramentas;
- 01 sistema de tratamento de gases, contendo oxidador, condensador, filtro de carvão ativado e separador de água e óleo.

É importante ressaltar que alguns destes componentes já existiam antes ou foram adquiridos pelo Núcleo de Geotecnia Ambiental para trabalhos anteriores,



porém grande parte da instrumentação concebida no **LGMA/PUC-Rio** contou com o fundamental apoio do **Sr. José Raimundo Martins**, mestre da oficina do laboratório, que auxiliou no projeto técnico e mecânico da maioria dos instrumentos, fabricou peças e contribuiu sempre que solicitado para o desenvolvimento deste novo sistema de dessorção térmica *in situ*.

### **3.2. Projeto e Concepção do Novo SDTIS**

Como os resultados obtidos por Baptista (2004) em relação ao seu bastonete térmico foram extremamente satisfatórios para o tipo de experimento realizado – projeto piloto de remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo com condições controladas – idealizou-se que a composição do novo protótipo deveria manter as mesmas características básicas do anterior, ou seja:

- Aquecedor constituído por um cartucho de resistência trabalhando a 220 Volts, instalado em uma estrutura de aço usinada com furos eqüidistantes ao longo de toda a sua extensão;
- Tubulação interna para injeção e emulsão de ar no aquecedor e, conseqüentemente, no solo;
- Tubulação-guia interna para introdução de um termopar no aquecedor para aferição da sua temperatura de trabalho;

Com relação ao sistema de apoio, o objetivo dos componentes deveria ser o de atender aos mesmos requisitos a seguir:

- Medidores de temperatura em diversos pontos próximos ao bastonete;
- Aquisição e armazenamento simultâneo, e em tempo real, de dados;
- Sistema de injeção de ar;
- Fonte de energia elétrica;
- Sistema de tratamento de gases.

Porém, como a aplicação do sistema seria em campo, e não em laboratório, alguns deles teriam que ser modificados para atender a esta nova classe de experimentos.

### 3.2.1. Bastonete Térmico

Conforme observado junto ao trabalho de Baptista (2004), o projeto piloto para aplicação do bastonete anterior havia sido realizado em um mini-forno de tijolos refratários com dimensões reduzidas (40x40x49cm), instalado no **LGMA** (Figura 3.1), o que implicou em algumas condições especiais.

A sua metodologia de preparação de ensaio indicava que, em primeiro lugar, colocava-se o bastonete alinhado em posição vertical (com a sua base encostando-se ao fundo do forno) para que, em seguida, o solo contaminado fosse distribuído e compactado ao longo dos espaços restantes do forno, até o seu topo. As Figuras 3.1 e 3.2, a seguir, mostram como era realizado o procedimento.

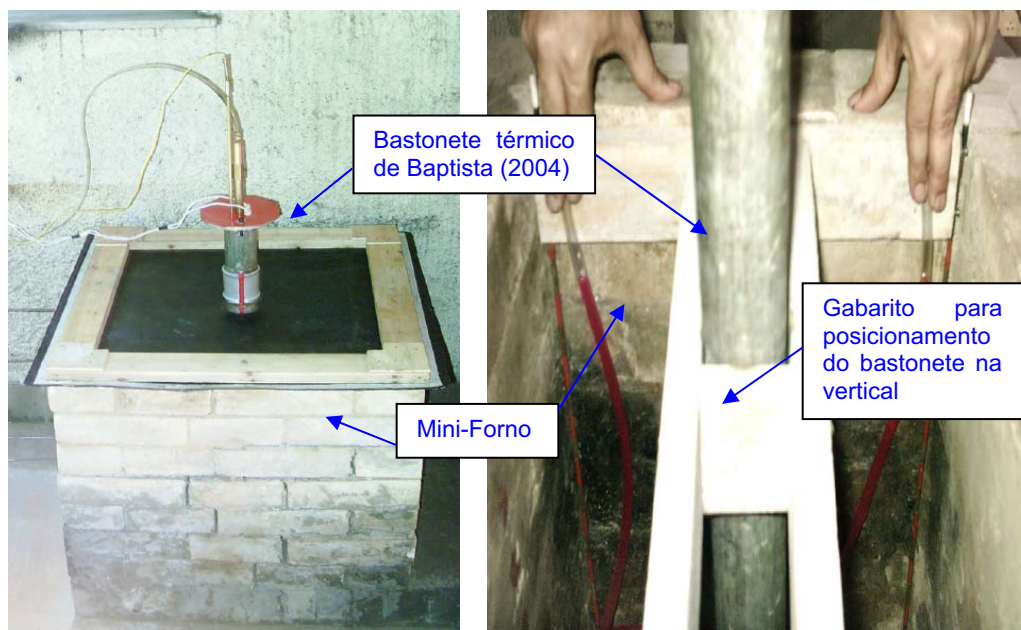


Figura 3.1 – Bastonete térmico de Baptista (2004), instalado no forno térmico do **LGMA/PUC-Rio** (vista externa) (Baptista, 2004)

Figura 3.2 – Instalação e posicionamento do bastonete no forno, antes do preenchimento do mesmo com o solo contaminado (vista interna) (Baptista, 2004)

Para este tipo de aproveitamento, e sob condições controladas, não haveria maiores problemas em se utilizar este tipo de bastonete, porém observou-se que o mesmo não poderia ocorrer para o caso de se tentar aplicá-lo em campo. Um dos fatores a se destacar é que, o ato de introduzi-lo no solo a partir de um pré-furo, por exemplo, apresentaria problemas relacionados à não garantia de contato entre o bastonete e a parede do furo (no caso, o solo). Isto porque, em seu projeto estrutural, a conexão entre o tubo onde se localiza o cartucho de

resistência e a flange localizada no topo do instrumento era realizada por meio de uma luva de ferro galvanizado com diâmetro externo superior ao do tubo, conforme se pode observar na Figura 3.3, mostrada a seguir.

É possível que constasse em seu projeto inicial que, no caso de futuras utilizações em campo, hastes prolongadoras poderiam ser acopladas ao tubo do bastonete apenas utilizando luvas iguais a esta para conexão. Contudo, devido ao fato do seu diâmetro externo ser maior do que o diâmetro do tubo do bastonete, o pré-furo a ser feito no solo para inserção do conjunto deveria ter as dimensões da luva, o que deixaria uma folga de, pelo menos, meia polegada entre a parede do furo e o tubo do bastonete. Esta folga seria difícil de ser preenchida e, possivelmente, prejudicaria o desempenho do protótipo visto que, neste espaço, poderia se formar um “bolsão” isolante de ar que atrapalharia a propagação do calor. Neste caso, ao invés da transmissão se dar preponderantemente por condução, ela se daria por radiação e, como mostrado no capítulo anterior, o ar é um mal condutor.

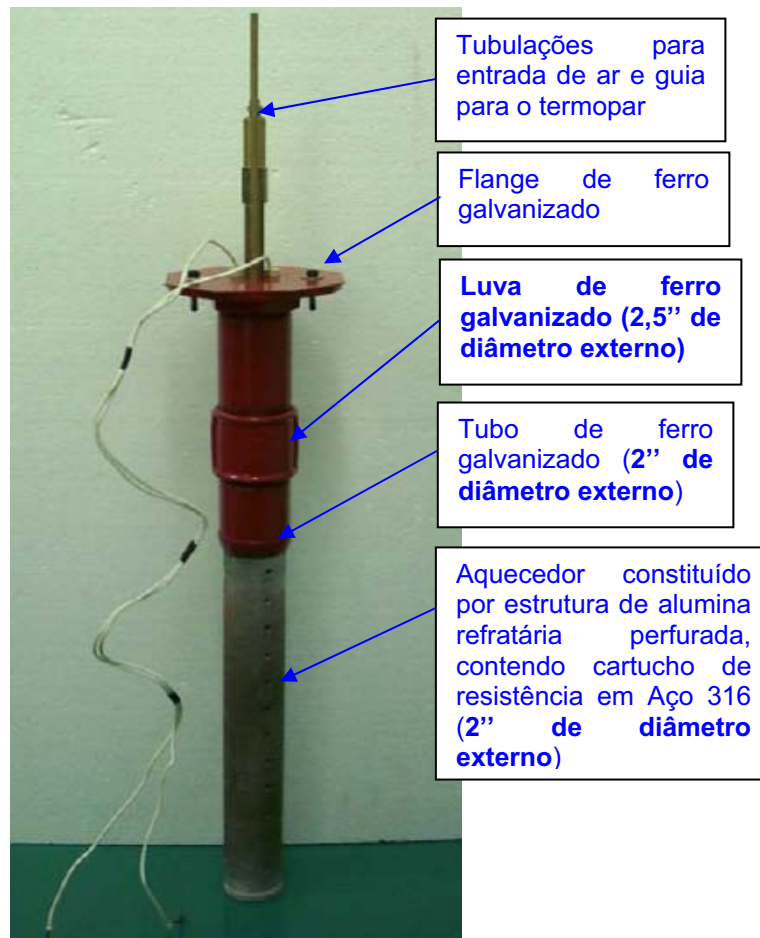


Figura 3.3 – Bastonete Térmico de Baptista (2004)

Sabendo-se disso, foi projetado para este novo protótipo um tubo de 400 mm de comprimento e 50 mm (cerca de 2 polegadas) de diâmetro externo que possuísse um sistema de rosca “macho-fêmea” (niple) em sua parte superior interna, para que hastes com o mesmo sistema e com o mesmo diâmetro externo do bastonete pudessem ser encaixadas sem a utilização de um elemento adicional de conexão, como foi o caso da luva utilizada anteriormente. Dessa forma, o conjunto teria um diâmetro externo único, o que facilitaria a sua instalação em campo.

Já as conexões das tubulações internas (injeção de ar e guia para o termopar), de forma a aumentar os seus respectivos comprimentos, seriam compostas por luvas e anilhas, o que implicaria às hastes prolongadoras a necessidade de terem um diâmetro interno livre de, no mínimo, 30 mm, para acomodá-las sem problemas. Dessa forma, restariam cerca de 20 mm de parede interna para serem utilizados para a usinagem e fabricação do sistema de rosqueamento. A Figura 3.4 ilustra o esquema idealizado.

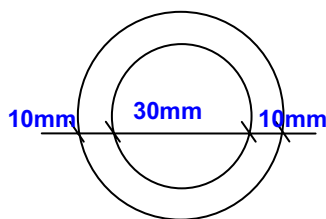


Figura 3.4 – Esquema da haste prolongadora (sem escala)

Tanto a tubulação guia do termopar, quanto a tubulação para entrada de ar, bem como seus respectivos conectores, seriam usinados em latão, seguindo o mesmo padrão utilizado no bastonete de Baptista (2004).

Com relação à estrutura onde estaria inserido o cartucho de resistência elétrica, foram projetados furos ortogonais entre si, ao longo de todo o seu comprimento, com espaçamento longitudinal de 35 mm, em média.

A Figura 3.5, apresentada a seguir, mostra como foi desenhado o projeto estrutural do novo bastonete térmico, junto com seus conectores mecânicos.

Já adiantando alguns pontos em relação ao que será descrito ao longo do próximo capítulo, um fator que não foi levado em consideração neste projeto

mecânico inicial foi a vedação dos terminais elétricos do cartucho de resistência, de forma a evitar a entrada de água nos mesmos, o que acabou acarretando em alguns problemas durante os ensaios de campo.

Com relação ao comprimento do seu aquecedor, Stegemeier e Vinegar (2001) sugerem que ultrapasse em cerca de 60 cm o topo e a base da pluma de contaminação, ou seja, para uma pluma de 100 cm de espessura, por exemplo, deve-se utilizar um bastonete de 2,20m de comprimento. Além disso, para compensar possíveis perdas de calor nos limites inferior e superior, estes 60 cm devem ser projetados para emitir 25% de potência a mais do que o restante da parte aquecedora. Para o presente trabalho, como se tratava de um protótipo, isto acabou não ocorrendo, até porque qualquer modificação neste sentido deveria ser fácil de ser executada.

Logo, para este novo bastonete, idealizou-se que o comprimento estrutural da parte aquecedora teria 40 cm – semelhante ao protótipo utilizado por Baptista (2004) – no qual seria posicionado um cartucho de resistência com comprimento de 35 cm, 1” de diâmetro, e com capacidade para chegar a temperaturas de até 1200°C.

Com relação ao material do tubo do bastonete, levando em consideração os efeitos de flambagem e os desgastes físico-químicos sofridos pelo protótipo anterior devido às altas temperaturas e aos danos provocados pelo seu contato com os contaminantes (no caso, hidrocarbonetos derivados de petróleo), idealizou-se a utilização do mesmo material usado para fabricação do cartucho de resistência, ou seja, o Aço Inox 316L, que é resistente a temperaturas de até 1200°C, à corrosão e aos ataques físico-químicos dos contaminantes. Para o protótipo anterior, havia sido utilizada uma alumina refratária.

Para as hastas prolongadoras, prevendo que suas solicitações seriam quase todas voltadas para suportar o peso do bastonete e as tensões do solo (que dependem da profundidade), decidiu-se pela utilização do Aço 1020, por possuir um melhor custo-benefício em relação a outros materiais. Para elas, projetou-se um comprimento padronizado de 1500 mm, com sistema de rosqueamento macho-fêmea.

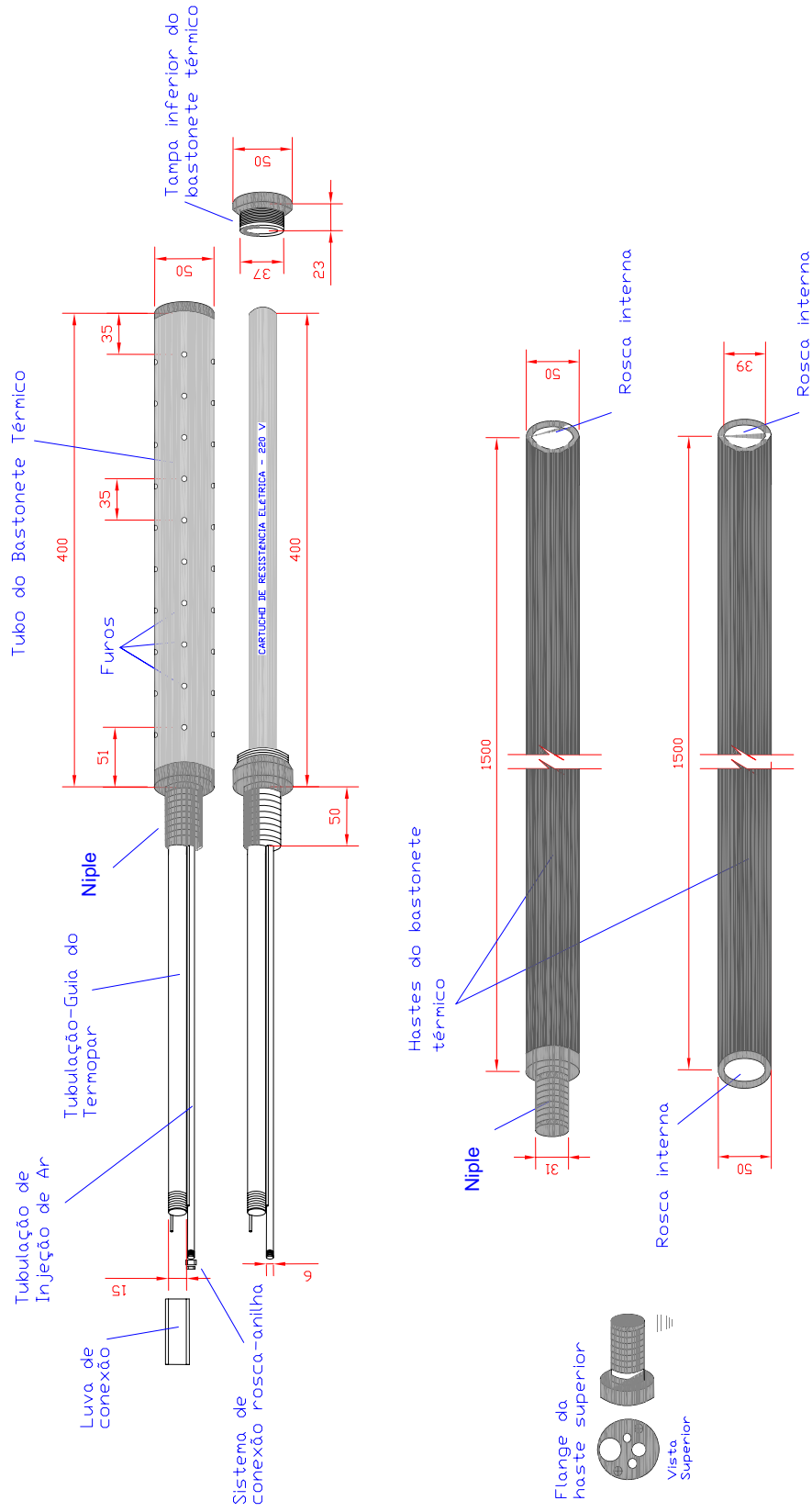


Figura 3.5 – Projeto estrutural do bastonete térmico e das hastes prolongadoras (dimensões em milímetros)

A seguir, é apresentada a Tabela 3.1 contendo algumas características químicas dos materiais utilizados:

Tabela 3.1 – Composição dos materiais utilizados (Romeiro, 1997)

| Material (Aço) | C%          | Mn%       | Si%       | Cr% | Ni% | Mo% |
|----------------|-------------|-----------|-----------|-----|-----|-----|
| 1020           | 0,18 a 0,25 | 0,3 a 0,6 | 0,1 a 0,3 | -   | -   | -   |
| 316L           | 0,5         | 0,4       | 1,2       | 18  | 12  | 2,7 |

O aço 1020 é uma liga comum, enquanto o 316L é classificado como um aço especial, devido às suas qualidades em relação aos outros materiais (inoxidável, dureza, resistência à temperatura, corrosão, etc). Na Tabela 3.1, mostrada anteriormente, a porcentagem de carbono (C%) é um indicador sobre a dureza e a resistência mecânica do aço, o que já mostra uma grande disparidade entre os dois materiais. No caso das porcentagens de manganês (Mn%) e silício (Si%), Romeiro (1997) mostra que as proporções que variam entre 0,3 e 0,6 e 0,15 e 0,30, respectivamente, passam a atuar na liga como um desoxidante (neutralizando a ação do CO ou do CO<sub>2</sub>) e como um dessulfurante (eliminando a fragilidade a solicitações sob altas temperaturas). Já os elementos cromo (Cr), níquel (Ni) e molibdênio (Mo) são utilizados na liga para se aumentar a resistência mecânica, a resistência ao desgaste físico (corrosão) e melhorar suas propriedades quando ela é submetida a temperaturas elevadas, sendo inoxidável e pouco reativa com a maioria dos reagentes.

Com relação à condutividade térmica, o Aço 1020 possui 50 W/m.K (Godoy *et al*, 2006), enquanto a do 316L é por volta de 40 W/m.K (Núcleo Inox, 2006).

Após o projeto e escolha dos materiais a serem utilizados, partiu-se para a fabricação, compra, construção e montagem das peças. As Figuras 3.6 a 3.10, a seguir, mostram o resultado final deste trabalho.

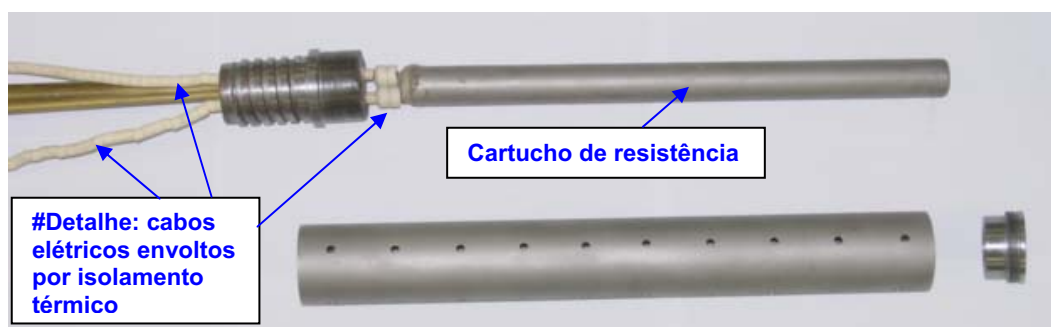


Figura 3.6 – Composição do aquecedor do novo bastonete térmico



Figura 3.7 – Aquecedor do novo bastonete térmico montado

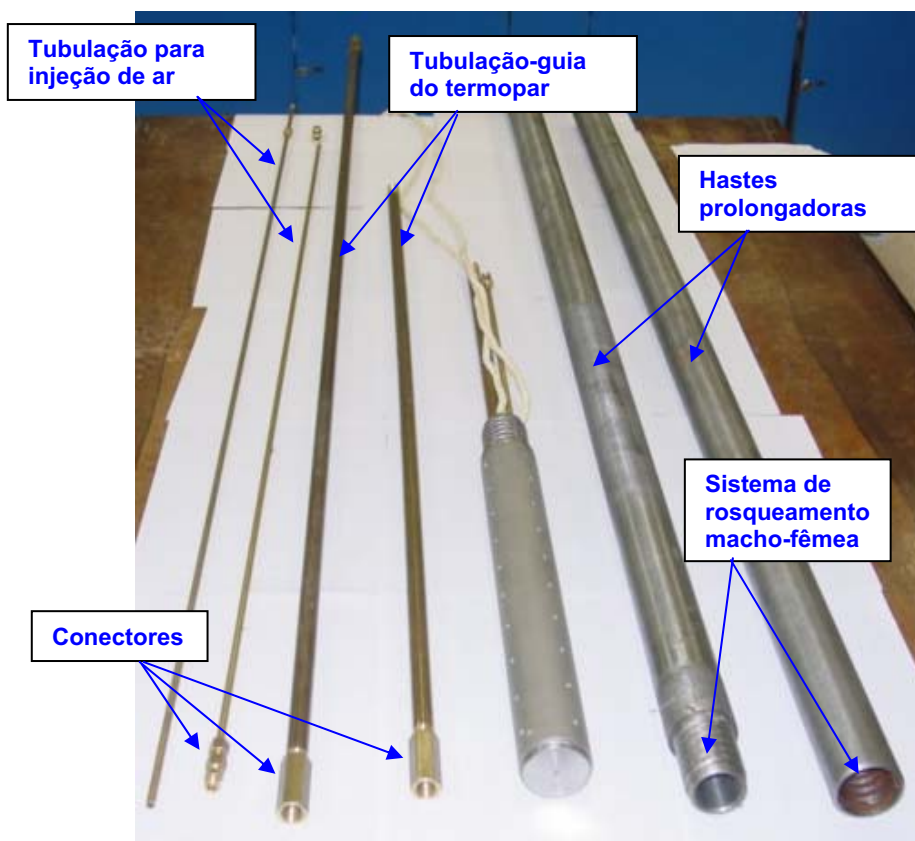


Figura 3.8 – Peças mecânicas e elétricas do novo bastonete térmico



Figura 3.9 – Detalhe da conexão (anilhas) entre as tubulações de injeção de ar





Figura 3.10 – Detalhe da luva de conexão entre as tubulações-guia do termopar interno

Na Figura 3.6, é mostrado em detalhe que os cabos elétricos de níquel-cromo que partem dos terminais do cartucho de resistência estão envoltos por anilhas de cerâmica, cuja função é a de tentar proteger estes elementos contra os possíveis efeitos decorrentes das altas temperaturas.

Durante os experimentos, como será mostrado mais adiante, ficou claro que estes cabos necessitavam de um isolamento térmico mais resistente, o que resultou em algumas tentativas de utilização de revestimentos com maior qualidade e resistência. Um deles foi uma “capa protetora” formada por fibra de vidro com amianto, a qual passou a envolvê-los por toda a sua extensão.

Quando todos os componentes mostrados na Figura 3.8 são montados e conectados, o conjunto fica com um comprimento total de 3,40m e um diâmetro de 50 mm. O seu menor modelo, com apenas uma haste prolongadora, mede 1,90m.

No início de setembro de 2005, depois de pronto, o novo bastonete térmico foi testado em laboratório, com sua temperatura sendo elevada até 700°C. Tal ensaio durou cerca de 6 horas e, durante este período, o instrumento não apresentou nenhum problema. O termopar utilizado para medir esta temperatura foi o de ponta isolada.

Com relação aos custos despendidos, segue a Tabela 3.2 a seguir apresentando os gastos realizados para a compra dos materiais e fabricação do novo protótipo, já contando com a mão-de-obra para fabricação do bastonete térmico e das hastes prolongadoras, uma vez que os conectores mecânicos para as tubulações e as roscas e peças de ligação do bastonete e das hastes prolongadoras foram todos fabricados no **LGMA/PUC-Rio**, ou seja, as suas respectivas mãos-de-obra não foram totalmente contabilizadas.

Tabela 3.2 – Estimativa de custos relativos ao novo protótipo do bastonete térmico

| <b>Material</b>  | <b>Custo (R\$)</b> |
|--|--------------------|
| Bastonete térmico (cartucho de resistência, tubo de aço e cabos elétricos) | 1.500,00           |
| Hastes prolongadoras (2 x 1,5m)  | 580,00             |
| Tubulação-guia do termopar e tubulação para injeção de ar (3m cada)        | 308,00             |
| Conectores para as tubulações  | 12,00              |
| <b>TOTAL</b>   | <b>2.400,00</b>    |

Em 2004, Baptista havia gastado cerca de **R\$ 1.000,00** para construção do seu bastonete térmico, o que poderia ser comparado diretamente aos **R\$ 1.500,00** gastos apenas com o protótipo do bastonete atual, uma vez que não houve hastes complementares para o primeiro bastonete. Porém, além do incremento considerável de custos relativos aos cerca de dois anos de reajustes no Brasil – de 2003 até 2005 – o material atual possui qualidade superior ao anterior, possuindo ainda uma conexão especial para que o bastonete possa alcançar profundidades maiores, por meio das hastes prolongadoras sem aumentar o diâmetro total externo do bastonete.

### **3.2.2. Sondas medidoras de temperatura**

Para auxiliar a avaliação do desempenho do novo protótipo sob condições de campo, idealizou-se a criação de medidores de temperatura a serem instalados em diversos pontos do solo, próximos ao bastonete – tomando como base o fato da emissão de calor se dar radialmente. Assim, foi proposta a utilização de sondas contendo termopares de ponta isolada ao longo do seu comprimento. O seu diâmetro externo e sistema de conexão entre hastes deveriam seguir o mesmo padrão utilizado no conjunto hastes-bastonete para que os procedimentos de instalações em campo fossem idênticos, ou seja, utilizando trados de mesmo diâmetro para realização de pré-furos para a instalação de qualquer um dos instrumentos. O comprimento das sondas e de suas hastes também deveria ser de 1,5m, tal como as hastes do bastonete.

Com relação ao material utilizado, também justificado pelas vantagens custo-benefício, decidiu-se que este deveria ser o Aço SCH 160, com características relativamente inferiores ao material das hastes do bastonete. Isto pelos fatos das sondas, a princípio, serem menos solicitadas mecanicamente e possuírem menor importância do que as hastes do bastonete.

Quanto ao número de sondas que seriam construídas, assim como a quantidade de termopares para cada uma delas, por se tratar de um projeto de pesquisa, levou-se em conta o aspecto financeiro, como pode ser observado nos custos apresentados na Tabela 3.3 abaixo.

Tabela 3.3 – Custo unitário do conjunto de materiais das sondas medidoras de temperatura

| Material  | Custo Unitário (R\$) |
|---|----------------------|
| Termopar (isolação mineral com junta isolada Ø3mm x 3100mm, tipo K, montado com saída de conector compensado tipo tomada e instalado em sondas) | 350,00               |
| Cabos de compensação (tipo K, revestimento de PVC)  | 4,00/m               |
| Hastes prolongadoras  | 140,00/m             |
| Conectores e acabamento para hastes e sondas  | 17,50/haste          |

A faixa de medição de temperatura destes termopares varia entre 0 e 900°C, com precisão de 0,1°C.

Logo, optou-se pelo projeto e fabricação de 04 sondas com 02 termopares instalados em cada uma, juntamente com 01 haste prolongadora para cada uma delas. Somando-se aos cerca de 50 metros de cabos de compensação (necessidade estimada) a serem divididos igualmente entre elas, os 04 conjuntos haste-sonda sairiam ao custo total de **R\$ 4.260,00**, já contando com a mão-de-obra para montagem e usinagem das sondas. Algumas das peças, como os conectores mecânicos que serão mostrados a seguir, foram concebidas no **LGMA** e, portanto, não foram levados em consideração nestes cálculos.

Obviamente, seria bem melhor a utilização de um número maior de termopares, a serem posicionados ao longo de todo o comprimento da sonda, porém, conforme mencionado anteriormente, o fator custo inviabilizou o uso de um número maior do que dois para cada uma delas. Com isso, optou-se por alocações próximas às extremidades da sonda, a exatos 15 cm das pontas cada uma. Idealizou-se que, desta forma, atender-se-iam tranqüilamente às dimensões do aquecedor do novo bastonete térmico – limites superior e inferior da distribuição de calor – e, já se pensando em casos práticos, poder-se-ia ao menos abranger as extremidades de uma pluma de cerca de 1,20m de altura.

O projeto estrutural do conjunto sonda-termopares-haste está mostrado na Figura 3.11, juntamente com os seus detalhes de posicionamento de termopares e dimensões de materiais.

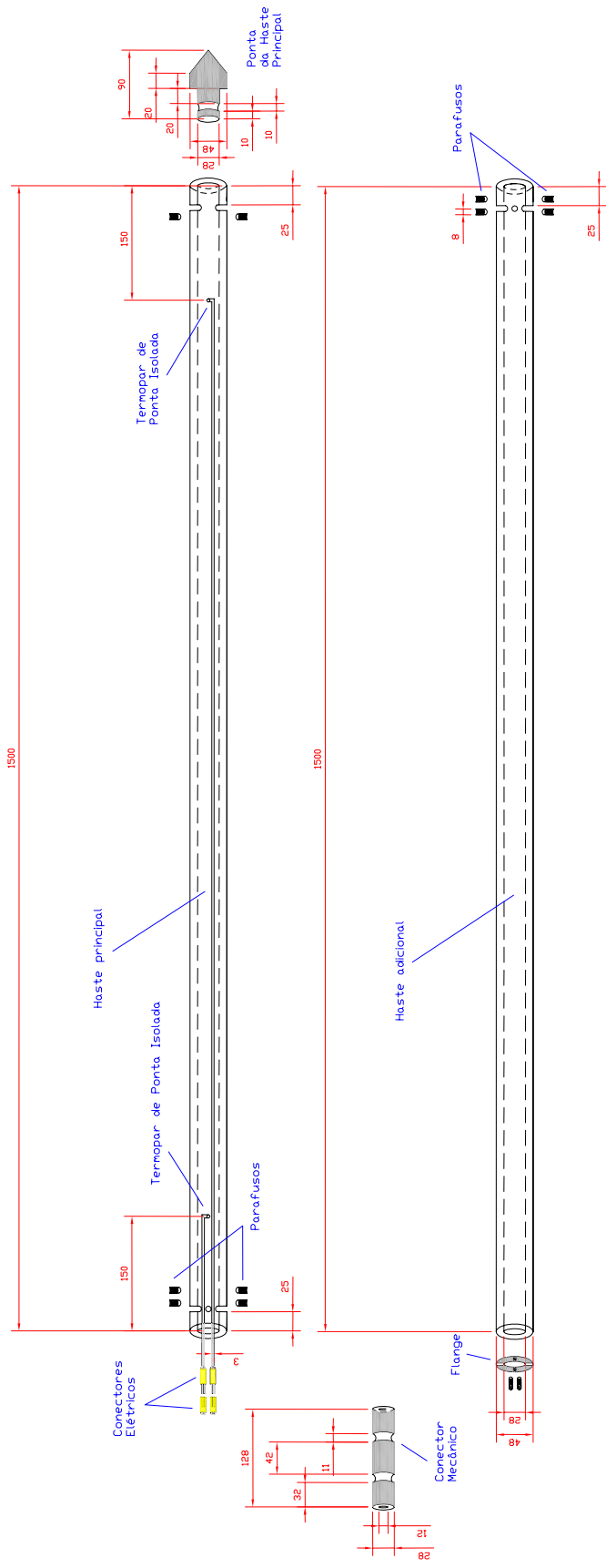


Figura 3.11 – Esquema do projeto estrutural do conjunto sonda-termopares-haste (dimensões em milímetros)

Por outro lado, o posicionamento do conjunto sonda-termopares-haste em relação a qualquer outro referencial também poderia ser alterado, de forma a abranger outros limites ou captar a temperatura em um ponto específico. A Figura 3.12 ilustra três possíveis casos de instalação das sondas medidas de temperatura, com o posicionamento dos termopares variando em relação ao aquecedor do bastonete.

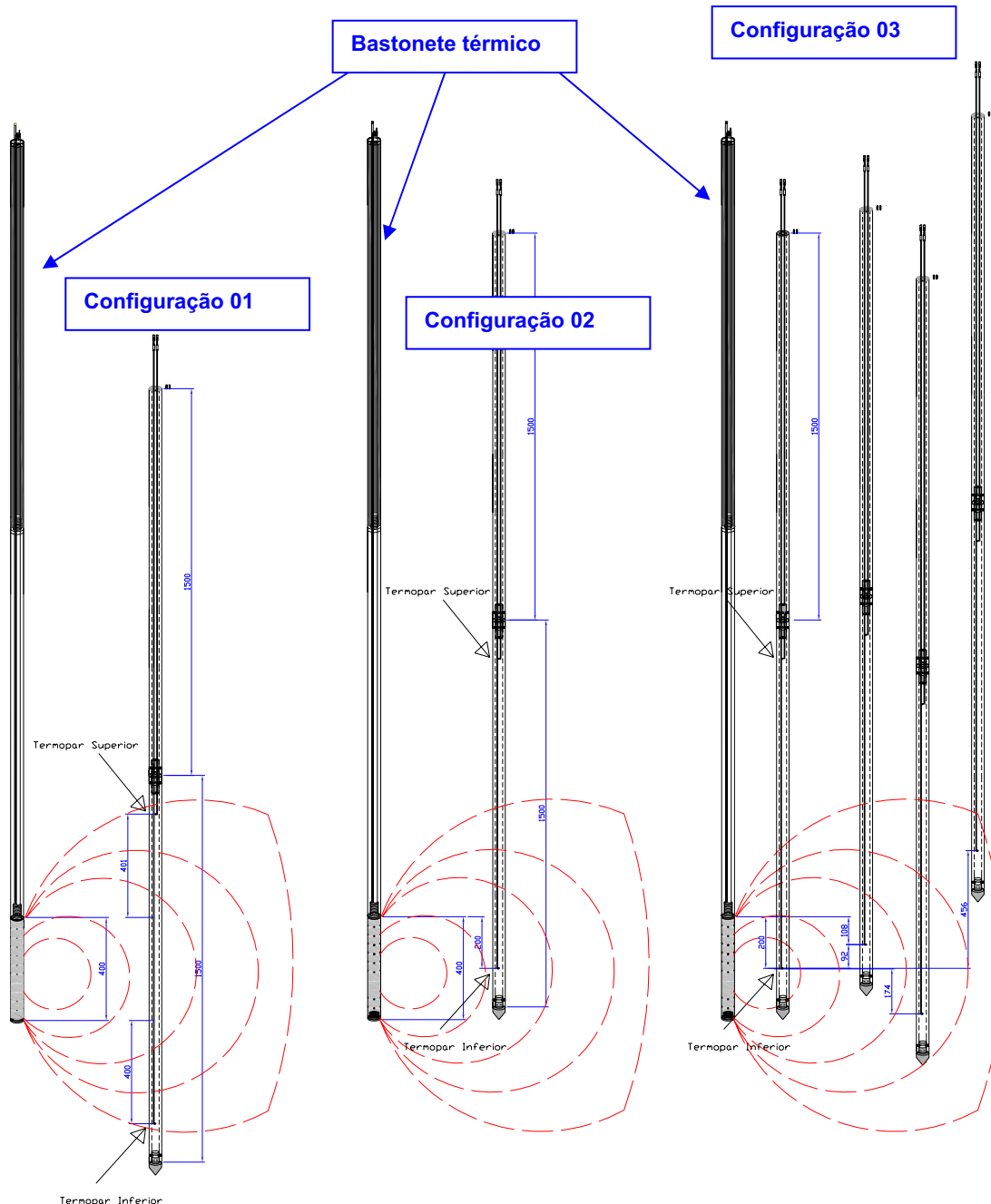


Figura 3.12 – Casos genéricos de instalação das sondas medidas de temperatura

No primeiro caso, os termopares superior e inferior da sonda procuraram abranger os limites máximos de aquecimento do bastonete. Na segunda configuração, o termopar inferior é posicionado no ponto médio vertical do aquecedor, enquanto no terceiro caso, três bastonetes térmicos são instalados, com o posicionamento de seus termopares inferior e superior variando. Outras configurações alternativas referem-se ao distanciamento horizontal destas sondas em relação ao bastonete. Algumas dessas variações foram utilizadas durante os ensaios de campo desta dissertação.

Ressalta-se ainda, conforme observado, que os termopares utilizados possuem medição isolada em suas pontas. Para se instalá-los, fez-se necessário um trabalho de usinagem e soldagem junto à sonda para se alocarem as pontas dos termopares (3 mm de diâmetro) em furos com o mesmo diâmetro. Desta forma, além de não restarem folgas, evitando a entrada de materiais indesejáveis no interior da sonda, ele poderia se posicionar rente ao comprimento da própria sonda, de forma a não ultrapassar o seu diâmetro externo, evitando assim desgastes mecânicos por abrasão durante a sua instalação e funcionamento.

Finalizado o projeto estrutural, partiu-se para a fase de fabricação dos conjuntos. As Figuras 3.13 a 3.17, a seguir, mostram, em detalhe, o resultado final do instrumento.

Os dois termopares de cada sonda são ligados a um conector duplo que, por sua vez, é ligado a um instrumento de aquisição de dados, cujas especificações estarão detalhadas no tópico 3.2.3.2, a seguir.

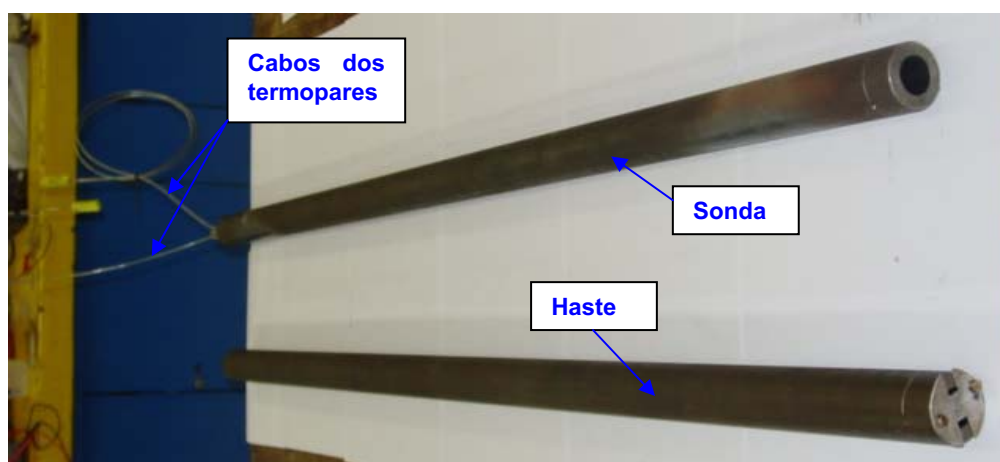


Figura 3.13 – Conjunto sonda-termopares-haste



Figura 3.14 – Detalhe do acabamento da parte superior da haste



Figura 3.15 – Detalhe do acabamento da ponta da sonda

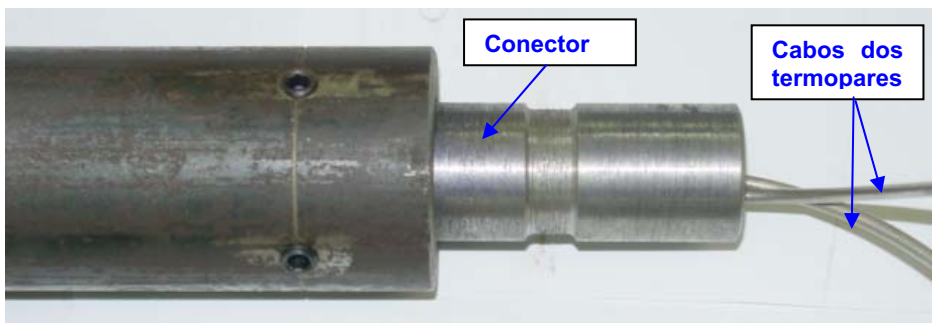


Figura 3.16 – Detalhe da conexão (fixada por parafusos) entre a sonda e a haste, com passagem interna livre para os cabos dos termopares ( $\varnothing 3\text{mm}$ )



Figura 3.17 – Detalhe do posicionamento da ponta isolada do termopar inferior, soldada a 15cm do final da sonda

Depois de finalizadas e devidamente conectorizadas, as sondas medidoras de temperatura foram testadas em laboratório com o auxílio de uma unidade de leitura de dados, a qual será mais detalhada posteriormente, quando foi verificado o seu correto e perfeito funcionamento.

### **3.2.3. Elementos Auxiliares**

Baseado na estrutura montada por Baptista (2004) em seus experimentos, o novo sistema de dessorção térmica *in situ* manteve a utilização de outros três componentes auxiliares necessários para o seu funcionamento, a serem descritos a seguir.

#### **3.2.3.1. Controlador de Temperatura**

Os terminais elétricos do bastonete térmico são ligados diretamente a um aparelho de automação comumente denominado de controlador de temperatura, cuja principal função é a de aplicar e controlar a temperatura a ser emitida pelo próprio bastonete. Esta pode ser direcionada de forma direta ou programada sob patamares graduais como, por exemplo:

- De 0 a 400°C em 5 minutos;
- De 0 a 400°C em 4 horas, sendo de 0 a 100 na 1ª hora, de 100 a 200 na 2ª hora, de 200 a 300 na 3ª hora e de 300 a 400°C na 4ª hora.

O conjunto do controlador de temperatura é composto, além de uma chave controladora, por um controlador de potência, no qual os terminais do bastonete são conectados, um visor (*'display'*) com botões multifuncionais e uma chave liga-desliga, para acionar o funcionamento do sistema, conforme ilustra a Figura 3.18 abaixo. Para se medir a temperatura do bastonete, há ainda um termopar do tipo K, de ponta isolada, medindo cerca de 600 mm de comprimento, que é posicionado internamente ao bastonete, junto ao seu aquecedor, através da sua tubulação-guia. É ele quem “avisa” ao controlador a temperatura atual do aparelho, fazendo com que ele envie mais ou menos corrente elétrica.



A alimentação do sistema é dada em 220 Volts, para atender a uma corrente elétrica de, aproximadamente, 12 Ampères, do controlador e do próprio bastonete térmico.

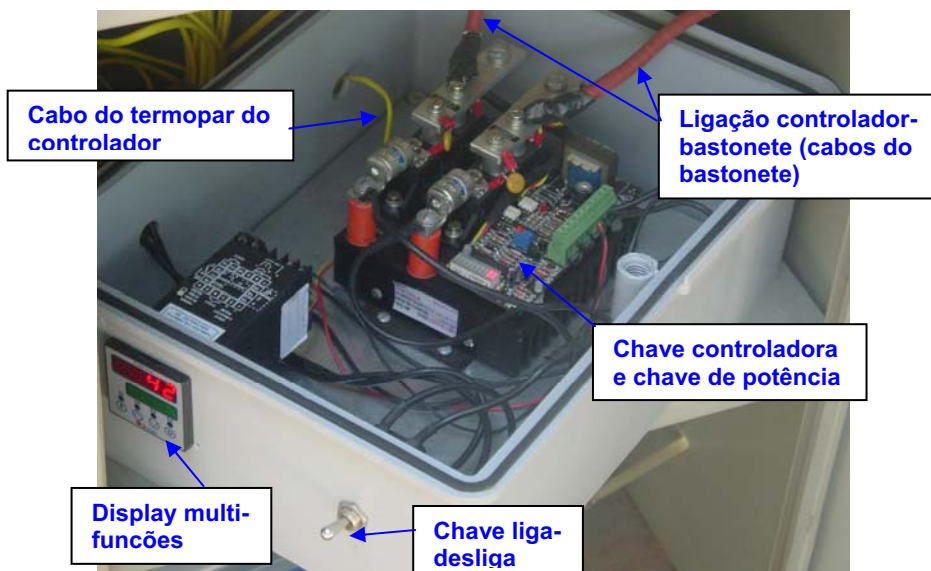


Figura 3.18 – Controlador de Temperatura

O aparelho é o mesmo utilizado em outros experimentos de dessorção térmica já realizados pelo **Núcleo de Geotecnia Ambiental – NGA da PUC-Rio**, de marca **INCON®**, modelo CNT 110, e suas especificações, conforme o manual, estão descritas na Tabela 3.4 a seguir:

Tabela 3.4 – Especificações do controlados de temperatura

| Controlador de Temperatura – Especificações |   |
|---|---|
| Alimentação                                 | 85 – 264 V; 50 a 60 Hz  |
| Consumo                                     | 4 kVA   |
| Termopares compatíveis                      | Tipo J, K, T, N, S, E, R, S e B   |
| Precisão                                    | Tipo J, K, T e N: 0,25% da faixa máxima de $\pm 1^{\circ}\text{C}$<br>Tipo E, R, S e B: 0,025% da faixa máxima de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ |
| Resolução                                   | 0,1 $^{\circ}\text{C}$  |

### 3.2.3.2. Aquisitor e Armazenador de Dados

Um outro importante componente do sistema é a unidade de aquisição e armazenamento de dados (*'data-logger'*), instrumento utilizado para adquirir e armazenar os dados de temperatura que podem ser provenientes de até cinco conectores. Nele, pode-se programar o intervalo entre cada aquisição, além das

datas e horários de início e término de medições, por meio de uma chave multifuncional.

A sua precisão é de 0,1°C.

Há conectores duplos que permitem a conexão de até dois termopares simultaneamente, o que pode ampliar a capacidade do '*data-logger*' para até dez termopares. Para os experimentos deste trabalho, este tipo de conector foi utilizado em todas as quatro sondas medidoras de temperatura (um conector duplo para cada sonda).

Finalizada a coleta, os dados armazenados são transmitidos para um computador por meio do software **AMR-CONTROL®**, versão **4.02**, via placa USB, onde seus arquivos em '.txt' são processados de forma a serem organizados em uma planilha como a **Microsoft Excel®** ('.xls'), por exemplo.

O instrumento, mostrado na figura seguinte, também é o mesmo que foi utilizado para outros ensaios de dessorção térmica pelo **NGA/PUC-Rio**.

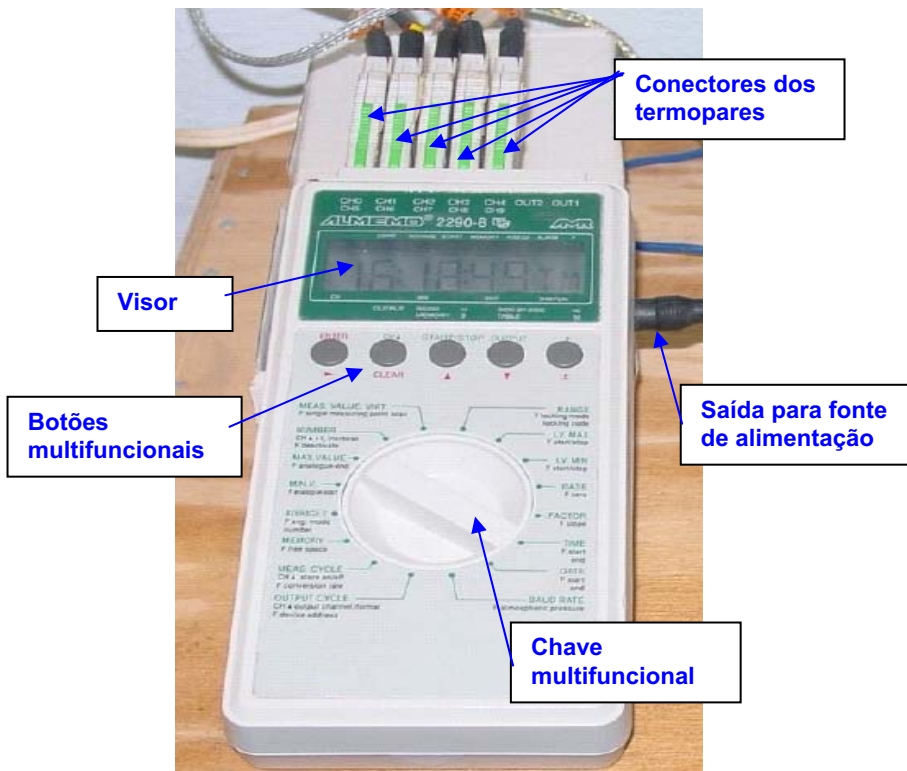


Figura 3.19 – '*Data-logger*' do SDTIS (Baptista, 2004)

Na sua parte superior, observa-se a ligação de cinco conectores que estão diretamente ligados a 05 termopares. No caso do presente trabalho, serão usados 04 conectores duplos para os 08 termopares.

A sua alimentação é fornecida tanto por baterias, quanto por uma fonte de 12 Volts ligada à rede elétrica.

### 3.2.3.3.

#### Bomba/Compressor de Ar e Controlador de Tempo

O terceiro componente utilizado é um compressor de ar – que também trabalha como bomba a vácuo – marca **Goldsun**<sup>®</sup>, modelo 0411, com 1/4HP (*Horse Power*) de potência, e vazão máxima de 36L/min, que está representado na Figura 3.20, a seguir. Sua faixa de voltagem varia de 110 a 220 Volts.

A sua função no sistema de dessorção térmica *in situ* é a de injetar ar no solo através de uma das tubulações internas do bastonete, de forma a aumentar o fluxo de calor e evitar o coqueamento do solo próximo aos furos, conforme citado por Baptista (2004).

Este compressor pode ser ligado a um instrumento controlador de tempo Multi-Timer Digital (Figura 3.21), de marca **ICEL**<sup>®</sup> capaz de ligá-lo e desligá-lo em até 10 intervalos de tempo.



Figura 3.20 – Compressor de ar (Baptista, 2004)



Figura 3.21 – Multi-timer digital (Baptista, 2004)

### 3.2.3.4. Fontes de Energia

Por se tratar de uma técnica de remediação de solos *in situ*, deve haver, dentre os componentes, um que represente a fonte de energia para alimentar o sistema e que possa ser levado a campo, independentemente assim da disponibilidade de pontos de rede elétrica no local.

#### 3.2.3.4.1. Gerador a diesel

Para o presente caso, pensou-se em um gerador a diesel, fabricado pela **AGRALE**, de marca M90 e com potência de 6kW<sup>8</sup> (seis quilowatts). Tal gerador, adquirido anteriormente para outras finalidades pelo **NGA/PUC-Rio**, teoricamente, estaria apto a sustentar a alimentação de todo o sistema, visto que seriam necessários cerca de 4kW (quatro quilowatts) para a sua totalidade.

De acordo com o manual, a sua autonomia, considerando um tanque de 12 litros, era de cerca de 10 horas ininterruptas. No entanto, ele alerta para os seguintes pontos:

1. A cada 10 horas, deve-se completar o óleo do carter;
2. A cada 150 horas (6 dias) deve-se trocar o óleo do carter, limpar aletas, cilindros, cabeçotes e turbinas;
3. A cada 250 horas (10 dias) deve-se trocar o filtro de ar seco e o filtro de combustível;
4. A cada 300 horas (12 dias) deve-se limpar a tela do filtro de óleo lubrificante, apertar parafusos e porcas externas;
5. A cada 500 horas (20 dias) deve-se trocar o elemento do filtro de ar, limpar / drenar tanque de combustível, limpar aletas, cilindros, cabeçotes e turbinas.

Outro detalhe importante constado no manual de instruções é que, após o abastecimento, deve-se deixar o combustível em repouso por 24 horas.

---

<sup>8</sup> 1kW = 1kV.A (um kilo Volt Ampère)

Com relação a sua parte elétrica, há uma caixa de força onde foram instaladas 06 tomadas e 01 disjuntor, todos trabalhando a 220 Volts. Projetou-se que, nas tomadas, seriam ligados os terminais do controlador de temperatura, a unidade aquisitora de dados e o compressor de ar, junto ao controlador de tempo, sobrando ainda três delas para quaisquer eventuais necessidades.

Para facilitar o seu transporte, foi criada uma carreta própria para comportá-lo e que pudesse ser engatada a qualquer outro veículo automotor.

No capítulo seguinte, quando serão descritos os ensaios de campo, será mostrado que este gerador não conseguiu atender às solicitações dos experimentos de campo.

#### **3.2.3.4.2. Energia elétrica convencional**

E, como o gerador disponível para os experimentos de campo não atendeu à demanda energética do novo sistema de dessorção térmica *in situ*, foi necessário captar energia elétrica da rede convencional para dar continuidade aos ensaios.

Nas dependências do **Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente – LGMA** da **PUC-Rio** já havia, inclusive, uma instalação própria para este sistema, sendo a mesma que havia sido utilizada para o trabalho de Baptista (2004) e que está mostrada nas Figuras 3.22 e 3.23 seguintes. Esta instalação possui um medidor de consumo elétrico próprio, a fim de se registrarem e contabilizarem os gastos energéticos do equipamento.

A rede elétrica comum do **LGMA / PUC-Rio** também foi disponibilizada para a realização dos experimentos, porém sem a possibilidade de se registrar o consumo.



Figura 3.22 – Local da instalação elétrica, no **LGMA/PUC-Rio**, para os sistemas de dessorção térmica



Figura 3.23 – Instalação elétrica do **LGMA/PUC-Rio**, com medidor de consumo individualizado para os sistemas de dessorção térmica

### 3.2.3.5. Armário

Para armazenar e guardar, em campo, todos os componentes do sistema, tais como ferramentas, utensílios em geral, equipamentos de proteção individual – luvas, jaleco e máscara – e outros materiais, foi utilizado um armário, estruturado em coluna, com 05 prateleiras móveis, o qual está mostrado nas Figuras 3.24 e 3.25 a seguir. Por questões de segurança, tal armário é lacrado durante os ensaios de campo.

Na Figura 3.25, com o armário aberto, observa-se a organização dos equipamentos e utensílios utilizados durante os ensaios. Na prateleira superior, está alocada a caixa de ferramentas. Abaixo dela, encontra-se o ‘*data-logger*’, no qual são ‘*plugados*’ os conectores dos termopares instalados nas sondas. Nas duas prateleiras seguintes são colocados, aleatoriamente, mais algumas ferramentas e utensílios. Já a última prateleira comporta o controlador de temperatura, no qual são conectados o termopar e a resistência do bastonete térmico. Por fim, na base do armário, encontra-se o compressor, do qual sai uma tubulação de ar que é ligada ao bastonete.

Para que os termopares, tubulações e cabos pudessem permanecer conectados aos seus instrumentos correspondentes com o armário fechado, foram executados alguns furos na sua lateral.



Figura 3.24 – Armário do SDTIS



Figura 3.25 – Armário do SDTIS aberto

### 3.2.3.6. Sistema de tratamento de gases

O sistema de tratamento de gases do novo SDTIS é composto por um oxidador, um condensador, um filtro de carvão ativado, um separador de líquidos e uma bomba de sucção, alguns deles inclusive foram fabricados no próprio **LGMA**. Todos pertencem ao **NGA/PUC-Rio** e vêm sendo utilizados em pesquisas sobre a dessorção térmica desde o trabalho de Portes (2002).

No entanto, tais instrumentos, em princípio, não serão utilizados durante este trabalho, uma vez que está previsto que os campos experimentais onde o bastonete será testado não apresentarão qualquer tipo de contaminação, já que o objetivo do presente trabalho é fazer uma avaliação do desempenho do bastonete térmico e suas possíveis conseqüências ao solo e ao ecossistema quando submetido a condições naturais de campo. E, conforme observado no trabalho de Baptista (2004), a eficiência do instrumento para remediar solos contaminados por contaminantes orgânicos já foi devidamente comprovada utilizando, inclusive, este mesmo sistema de tratamento de gases.

Tais elementos estão apresentados na figura a seguir, encontrando-se dispostos para uso em um dos experimentos de dessorção térmica do **NGA/PUC-Rio**.

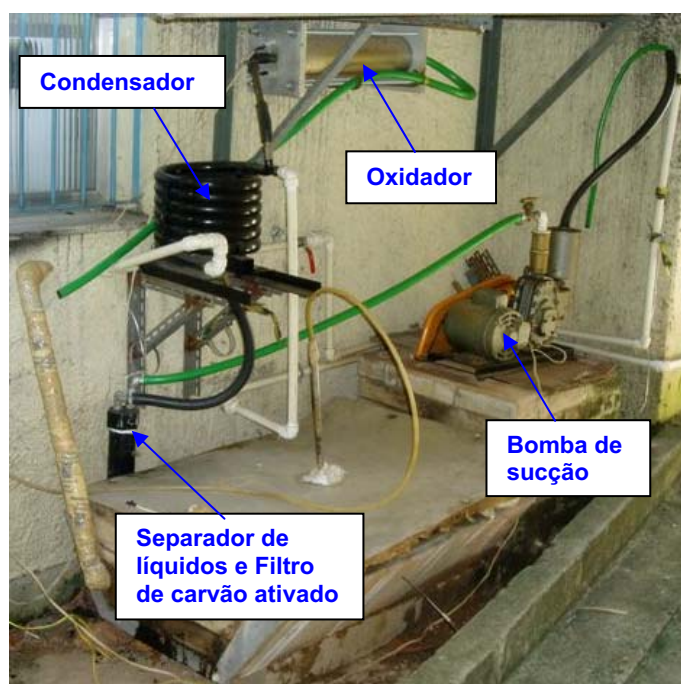


Figura 3.26 – Sistema de tratamento de vapor do **NGA/PUC-Rio**

### 3.3. Comentários Finais

Com todos os elementos apresentados e devidamente testados, considerou-se que o novo sistema de dessorção térmica *in situ* encontrava-se completo, funcionando e pronto para uso. Sua aplicação e resultados serão mostrados a partir dos capítulos seguintes.



## 4 ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

### 4.1. Introdução

O presente capítulo apresentará os ensaios realizados ao longo deste trabalho, os quais foram divididos em ensaios de campo e ensaios de laboratório.

Os ensaios de campo foram realizados em dois locais distintos. O primeiro em uma área gentilmente cedida pela **EMBRAPA Solos**, em seu espaço físico situado no bairro Jardim Botânico, Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro – RJ, que, neste trabalho, será denominada de CE-01 – Campo Experimental 01.

Esta parceria entre o **Núcleo de Geotecnia Ambiental da PUC-Rio** e a **EMBRAPA Solos**, que se mostrou fundamental para a realização dos ensaios neste local, contou com o apoio do **PRONEX-Rio – Projeto do Núcleo em Excelência em Geotecnia do Rio de Janeiro**.

Já a segunda área está situada dentro do espaço físico da **PUC-Rio** – bairro Gávea, Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro – e fica nas dependências do **Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente – LGMA**, anexo ao **Departamento de Engenharia Civil – DEC**, que, além do local, forneceu toda infra-estrutura elétrica necessária para a realização dos experimentos. Ela será denominada de CE-02 – Campo Experimental 02.

Antes de se viabilizarem as áreas experimentais citadas, houve algumas tentativas de disponibilização de outros locais para o uso do novo protótipo, tanto na própria **PUC-Rio**, quanto em outros locais da cidade, porém estas tentativas não obtiveram grande sucesso. Uma delas, mostrada nas Figuras 4.1 e 4.2 a seguir, também se situava nas dependências da **PUC-Rio**, às margens do Rio Rainha, ao lado do campo de futebol e, a princípio, parecia atender aos principais requisitos para se utilizá-la: área plana, de tamanho suficiente para acolher toda a instrumentação e componentes do novo sistema de dessorção

térmica *in situ* e, por último, “perfurável”. E foi exatamente este último requisito que a impediu de ser utilizada, uma vez que, após várias tentativas, não foi possível perfurá-la com o trado mecânico disponível – Figuras 4.3 e 4.4.



Figura 4.1 – Possível área experimental, na **PUC-Rio**, às margens do Rio Rainha e próxima ao campo de futebol (1)



Figura 4.2 – Possível área experimental na **PUC-Rio**, acima de um talude localizado às margens do Rio Rainha e próximo ao campo de futebol (2)



Figura 4.3 – Tentativas de se perfurar o solo local com o trado mecânico (1)



Figura 4.4 – Tentativas de se perfurar o solo local com o trado mecânico (2)

Posteriormente, descobriu-se que, no passado, toda aquela área era utilizada como descarte de material de obras da **PUC-Rio** – vigas, blocos de concreto, ferragens e outros – e que, em alguma época, todo aquele entulho havia sido aterrado para que a área ficasse plana e transitável, conforme ela se encontra atualmente. Tais fatos foram comprovados com a passagem do GPR – *Ground Penetration Radar*<sup>9</sup> (Radar de Penetração no Solo) no local, que detectou uma grande presença de materiais que se diferenciavam do solo, e com uma investigação mais detalhada do local. Algumas fotografias estão mostradas nas Figuras 4.5 e 4.6, a seguir, onde se observa o “afloramento” de vigas e o aparecimento de diversos entulhos na face do talude, às margens do Rio

Rainha, indicando que, realmente, havia a presença de materiais deste tipo enterrados no local.

Conforme mencionado anteriormente, mesmo tomando conhecimento destes fatos investigativos, ainda tentou-se perfurar o solo em diversos pontos, porém o máximo que se obteve foi uma profundidade de 50 cm, o que, em princípio, não seria tão interessante para a aplicação do bastonete térmico, tendo em vista o seu comprimento mínimo e, principalmente, conforme mostrado no Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, levando em conta que este nível de profundidade mostrasse mais favorável ao uso do cobertor térmico. Logo, esta área foi descartada.



Figura 4.5 – Vista da face do talude, mostrando pedaços de vigas surgindo do solo

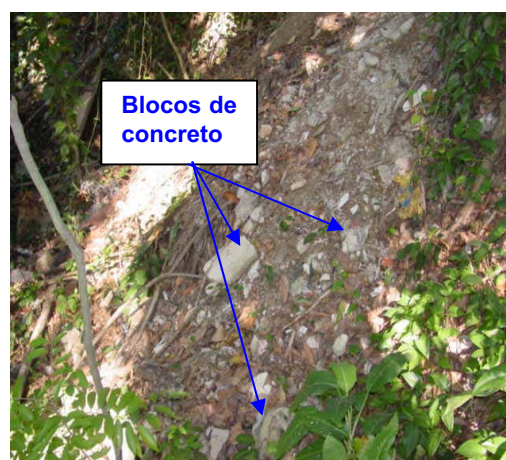


Figura 4.6 – Mais entulhos (blocos de concreto) visíveis no talude do local

Outras áreas também foram oferecidas para receber os experimentos do presente trabalho, como um depósito de argila mole que, na época, estava sendo utilizado pelo **NGA/PUC-Rio** na Zona Industrial de Santa Cruz. Porém, esta acabou se tornando inviável devido a diversos fatores. Neste caso, alguns dos problemas observados foi o elevado nível freático do local e a sua distância física até a **PUC-Rio** (mais de 100km), o que prejudicaria a agilidade em se realizarem os trabalhos desejados.

Logo, os ensaios de campo realizados em duas áreas da cidade do Rio de Janeiro – RJ (CE-01 e CE-02), já citadas anteriormente, consistiram em:

---

<sup>9</sup> **GPR** – Método não intrusivo de sondagem eletromagnética utilizado para detectar, com alguma razão de incertezas, a presença de materiais de diferentes densidades no solo.

1. Sondagens a trado mecânico, amostragem de solo sob diferentes profundidades e medição de nível d'água;
2. Amostragem de um bloco de solo indeformável;
3. Instalação e execução do novo sistema de dessorção térmica *in situ*;

Como será descrito a seguir, estes locais não apresentavam nenhum nível de contaminação de solo ou lençol freático. Apesar de ser uma técnica de remediação de solos, a relevância dos ensaios realizados e, conseqüentemente, do presente trabalho, foi a de avaliar o desempenho deste novo protótipo do bastonete térmico quando submetido a condições de campo – e as eventuais conseqüências que ele possa vir a causar – uma vez que a eficiência do protótipo anterior para tratar de solos contaminados já foi devidamente comprovada no trabalho de Baptista (2004).

Já em laboratório, os ensaios foram os seguintes:

1. Caracterização geotécnica das amostras de solo obtidas a partir das sondagens (diferentes locações e profundidades);
2. Obtenção dos parâmetros térmicos de um bloco de solo indeformável retirado do local;
3. Difração de Raios-X em amostras de solo;
4. Ensaios de microbiologia (umidade, teor de matéria orgânica, contagem e controle de atividade orgânica) em amostras de solo, antes e após uma simulação dos ensaios de dessorção térmica;

Os tópicos a seguir apresentarão, detalhadamente, os ensaios realizados, bem como os resultados obtidos e seus comentários correspondentes.

Meramente por questões de organização, e para facilitar a leitura e compreensão do presente trabalho, os ensaios de microbiologia e as simulações da dessorção térmica em laboratório correspondentes, serão descritos no próximo capítulo.

## 4.2. Ensaio de Campo no CE-01

Conforme mencionado, os primeiros ensaios de campo, e respectivos ensaios de laboratório, foram realizados nas dependências da sede da **EMBRAPA Solos**, situada na Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro, local denominado de CE-01.

A seguir são mostradas algumas fotografias da área em questão.



Figura 4.7 – Vista frontal da CE-01, situada entre duas árvores e vizinha ao Prédio Sudeste, da **EMBRAPA Solos**



Figura 4.8 – Vista lateral da CE-01, próxima à Rua Jardim Botânico (1)

A área é plana, descampada e possui um total de 50m<sup>2</sup>, aproximadamente. Sua delimitação física, conforme referenciado nas Figuras 4.7 e 4.8, é dada pelo Prédio Sudeste, por duas árvores e pela pavimentação do estacionamento (parqueamento) da **EMBRAPA Solos**. Atrás de uma das árvores (denominada de Árvore 01, na Figura 4.7), encontra-se uma grade que delimita a sede da **EMBRAPA Solos** junto à Rua Jardim Botânico, como mostram as Figuras 4.9 e 4.10 a seguir.



Figura 4.9 – Vista lateral da CE-01, próxima à Rua Jardim Botânico (2)



Figura 4.10 – Vista lateral da CE-01 (3)

#### 4.2.1.

#### **Sondagens e medições do nível d'água no CE-01**

No dia 13 de outubro de 2005, procederam-se às primeiras atividades de campo, relacionadas mais propriamente aos serviços de sondagens. Elas foram executadas com um trado mecânico de 3” de diâmetro externo – hastes de 1m de comprimento – executados, em sua maioria, a até dois metros de profundidade e em três locações diferentes, formando uma base triangular (vista em planta) para se facilitar a determinação do perfil do solo, conforme será observado posteriormente. A profundidade máxima das sondagens foi delimitada pelo nível d'água que, no dia dos trabalhos<sup>10</sup>, se encontrava nesta posição.

Isto porque, conforme citado anteriormente, como este bastonete térmico não previu um bom sistema de isolamento para água, ele não deveria, inicialmente, ser instalado em locais abaixo do nível freático a fim de se evitarem problemas elétricos com ele.

A cada 0,5 metro eram coletadas amostras de solo para as caracterizações físicas e mineralógicas.

A seguir, são mostradas algumas fotografias tiradas no dia<sup>11</sup> das sondagens – Figuras 4.11 a 4.14 – juntamente com uma planta baixa do local, e a locação dos pontos correspondentes – Figura 4.15 – denominados de S-01, S-02 e S-03:

---

<sup>10</sup> Conforme será mostrado mais adiante, o nível d'água da região varia de acordo com a época de chuvas no Rio de Janeiro e o bairro Jardim Botânico é, em geral, o mais afetado em relação à Zona Sul da cidade.

<sup>11</sup> Dia 13 de outubro de 2005.



Figura 4.11 – Sondagem S-01, realizada no CE-01



Figura 4.12 – Detalhe do nível d'água encontrado pela sondagem S-01, realizada no CE-01



Figura 4.13 – Sondagem S-03, realizada no CE-01



Figura 4.14 – Vista geral dos serviços de sondagens realizados no CE-01

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410751/CA

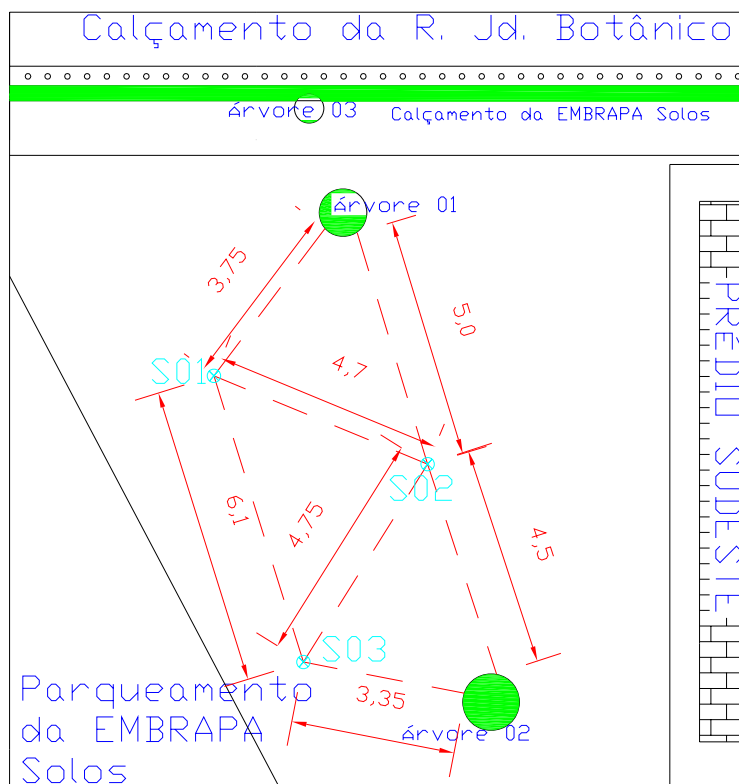


Figura 4.15 – Planta baixa do CE-01, com locação das sondagens S-01, S-02 e S-03 (distâncias em metros)

No primeiro furo (S-01), o que se percebeu tátil-visualmente foi que, aproximadamente, os primeiros 50 cm de profundidades eram constituídos por um material típico de aterro, com a presença predominante de areia seguida por pedregulhos, blocos rochosos, pedaços de entulhos, tijolos, dentre outros.

Os 50 cm seguintes eram formados por um solo tipicamente arenoso, enquanto o 1,8 metro restante, apesar de predominantemente arenoso, continha grumos argilosos com bastante umidade, indicando a proximidade ou nivelamento com o lençol freático.

Esta primeira sondagem fez com que o trado chegasse à profundidade máxima de 2,8m, sendo que, por volta de 2 metros de profundidade, de acordo com medições utilizando uma trena comum, encontrava-se água livre. Obviamente, o nível d'água deveria estar acima deste patamar, uma vez que se faz necessário aguardar um certo tempo para que ele se estabilize.

O perfil observado com o furo S-02 mostrou-se praticamente idêntico ao do S-01, com exceção da cota variando entre 1,5 e 2,0 metros, que indicava uma presença maior de argila do que a encontrada no S-01. Na data da sondagem, que chegou a uma profundidade máxima de 2,5 metros, a água livre, medida com uma trena, se encontrava na cota equivalente a 2,0 metros em relação ao nível do terreno.

Por fim, o perfil visto a partir do furo S-03, que chegou à profundidade máxima de 2,0 metros (mesmo ponto onde se encontrava água livre), mostrou-se igual ao furo S-02, porém com material de granulometria mais grosseira sendo encontrado até cerca de 1,0 metro de profundidade.

A relação obtida entre os perfis de sondagens será mostrada mais adiante.

Uma pequena escavação utilizando pá e enxada também foi feita entre os furos S-01 e S-03 para se recolherem as primeiras amostras microbiológicas do solo local, sob uma profundidade de cerca de 30 cm.

A cerca de 24 horas após a campanha de sondagens, fez-se uma nova medição do nível d'água nos furos S-01, S-02 e S-03 utilizando um medidor elétrico



portátil (Figuras 4.16 e 4.17 abaixo), encontrando-o sob uma profundidade média de 1,40m.



Figura 4.16 – Medidor de nível d'água elétrico portátil (1)



Figura 4.17 – Medidor de nível d'água elétrico portátil (2)

Outras medições foram feitas a cada vez que se ia ao CE-01, já que um dos furos de sondagem foi deixado aberto. O que se percebeu foi uma grande variação desta camada superior de água, uma vez que, a cerca de 30 dias após os serviços de sondagens, este nível se encontrava a 1,13m e, mais 20 dias após, sob o patamar de 1,32m.

Tal variação sugeriu uma correspondência à sazonalidade da região, pois durante este período (setembro, outubro, novembro e dezembro de 2005), choveu bastante na região metropolitana do Rio de Janeiro e, conseqüentemente, na zona sul da cidade. Fato este comprovado pelo **Sistema Alerta-Rio**, da **Fundação GEO-RIO**<sup>12</sup>.

A Tabela 4.1 a seguir mostra os dados referentes à pluviometria em alguns pontos da cidade, entre agosto e dezembro de 2005.

<sup>12</sup> **GEO-RIO – Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro**

Tabela 4.1 – Dados pluviométricos médios mensais de algumas estações em 2005 e 2006 (precipitação em mm) (GEO-RIO, 2005/2006)

| ESTAÇÕES                  | 2005        |              |              |              |              | 2006         |              |              | TOTAL          |
|---------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
|                           | AGO         | SET          | OUT          | NOV          | DEZ          | JAN          | FEV          | MAR          |                |
| <b>1 Vidigal</b>          | 45,4        | 258,8        | 204,0        | 167,4        | 173,6        | 163,6        | 141,0        | 191,8        | <b>2.465,2</b> |
| <b>2 Urca</b>             | 38,4        | 186,8        | 142,6        | 162,4        | 173,2        | 191,0        | 133,4        | 151,2        | <b>2.000,4</b> |
| <b>3 Rocinha</b>          | 71,6        | 442,2        | 248,4        | 222,8        | 252,2        | 187,4        | 118,6        | 214,8        | <b>2.536,4</b> |
| <b>4 Tijuca</b>           | 14,6        | 238,6        | 182,8        | 179,6        | 286,4        | 225,4        | 125,6        | 104,6        | <b>1.357,6</b> |
| <b>16 Jardim Botânico</b> | <b>55,6</b> | <b>348,6</b> | <b>207,8</b> | <b>187,0</b> | <b>214,2</b> | <b>177,4</b> | <b>134,8</b> | <b>202,0</b> | <b>2.566,4</b> |
| <b>17 Itanhangá</b>       | 23,0        | 368,8        | 248,2        | 191,4        | 228,6        | 178,4        | 83,8         | 139,0        | <b>2.623,0</b> |
| <b>18 Cid. de Deus</b>    | 14,4        | 104,2        | 129,8        | 122,6        | 167,8        | 307,2        | 112,0        | 68,0         | <b>1.821,2</b> |
| <b>22 Santa Cruz</b>      | 8,8         | 112,2        | 81,6         | 143,8        | 202,0        | 246,0        | 171,6        | 88,2         | <b>1.813,8</b> |
| <b>27 Sepetiba</b>        | 10,0        | 89,4         | 149,8        | 175,2        | 156,2        | 220,8        | 237,8        | 93,2         | <b>1.933,8</b> |
| <b>28 Sumaré</b>          | 45,0        | 610,0        | 267,8        | 270,4        | 376,6        | 255,0        | 196,8        | 196,2        | <b>3.725,0</b> |
| <b>29 Mendanha</b>        | 13,2        | 212,6        | 101,4        | 188,4        | 287,6        | 175,6        | 117,6        | 95,8         | <b>2.105,0</b> |
| <b>31 Laranjeiras</b>     | 34,4        | 294,6        | 166,8        | 182,4        | 221,4        | 213,0        | 136,8        | 147,6        | <b>2.374,4</b> |
| <b>32 São Cristóvão</b>   | 8,6         | 79,8         | 126,4        | 128,4        | 134,4        | 214,2        | 73,2         | 58,2         | <b>1.626,2</b> |

Observa-se com a tabela acima que as chuvas ocorridas no bairro Jardim Botânico durante o período apresentado foram umas das mais intensas da cidade. Inclusive, a ida a campo para realização dos trabalhos teve que ser adiada por muitas vezes devido, exatamente, a este fato, o que prejudicou sensivelmente o progresso dos trabalhos.

#### 4.2.2.

##### Instalação e montagem do novo SDTIS no CE-01

Com a realização das sondagens e determinações iniciais do nível d'água, foi possível projetar a instalação do bastonete térmico e dos seus respectivos equipamentos de medição de temperatura, idealizando-se a locação dos seus respectivos pontos e, principalmente, a profundidade sob as quais eles seriam posicionados.

Em princípio, a configuração escolhida para o posicionamento das sondas medidoras de temperatura baseou-se no segundo caso, mostrado na Figura 3.12, do capítulo anterior, com os termopares inferiores de cada uma delas alocados na cota do eixo central do aquecedor do bastonete térmico.

Para “fugir” das variações freáticas e capilares sazonais do local, e das suas conseqüências à parte elétrica do bastonete térmico, tendo em vista suas

condições mecânicas, projetou-se uma profundidade limite de 1,0m. Esta margem de segurança levou em consideração, principalmente, o fato de que, nos meses de janeiro, fevereiro e março, as chuvas são ainda mais abundantes na cidade do Rio de Janeiro.

Levando em conta esta profundidade máxima, a configuração que melhor se aplicava ao caso, baseando-se na Figura 3.11 do capítulo anterior, era mesmo a do segundo caso (termopar inferior situado no ponto médio do aquecedor do bastonete térmico).

Chegou-se inclusive a se tentar projetar uma maneira de se impermeabilizar o fundo de onde o bastonete seria posicionado, de forma a levá-lo a uma profundidade maior e evitar com que o nível d'água atrapalhasse o seu funcionamento. Para isso, pensou-se em materiais como uma mistura solo-cimento<sup>13</sup>, padronizada pela norma brasileira que regulamenta procedimentos de pavimentação, e até em uma mistura de bentonita com água (empiricamente), que poderiam ser lançados no local. Porém, chegou-se à conclusão de que tal medida seria insuficiente e ineficaz para conter os avanços freáticos e capilares e, sobretudo, traria algumas influências à transmissão de calor no solo que tornariam estudo em questão mais complexo ainda.

Uma opção indiscutível, sob o ponto de vista de engenharia, seria o rebaixamento do nível d'água e/ou a instalação de cortinas hidráulicas, o que certamente manteria este patamar sob um nível mais abaixo. Porém, isto dependeria de grandes custos e fugiria do escopo principal desta pesquisa.

Finalmente, decidiu-se pelo local de realização dos ensaios do novo sistema de dessorção térmica *in situ*, juntamente com a locação dos furos nos quais seriam instalados o bastonete térmico e os 04 conjuntos sonda-termopares-haste. A planta baixa mostrada na Figura 4.18 a seguir, representando basicamente a parte inferior da planta divulgada na Figura 4.15, aponta exatamente as localizações apresentadas em relação a algumas referências como o Prédio Sudeste, o estacionamento e a árvore 02.

---

<sup>13</sup> Mistura entre Cimento Portland (DNER-ME 036, ABNT EB-1), Água (isenta de sais, ácidos, álcalis e matéria orgânica), e Solo (DNE-ME 080, DNER-ME 122, DNER-ME 082), com período mínimo de cura de 72 horas.

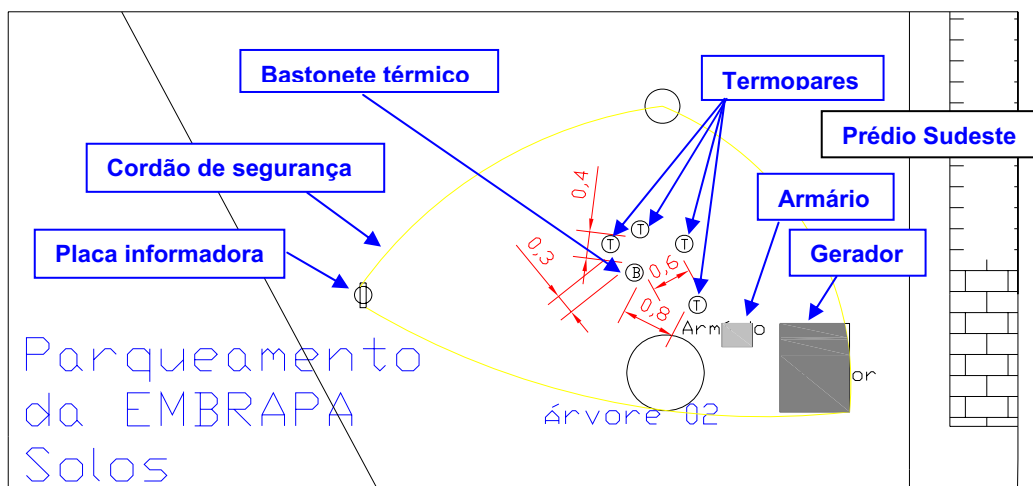


Figura 4.18 – Localização do bastonete térmico, termopares, armário, gerador, placa informativa sobre o experimento e cordão de segurança (cotas em metros)

Por questões de segurança, a área foi destacada por um cordão de isolamento usual (de cores amarela e preta), e identificada com uma placa informativa sobre o experimento e seu responsável, que inclusive foi posicionada no furo executado para a terceira sondagem (S-03).

As Figuras 4.19 a 4.22, seqüenciadas a seguir, mostram como foi realizado todo o procedimento, desde a locação e execução dos furos, utilizando um trado mecânico de 2” de diâmetro, até a instalação da instrumentação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410751/CA



Figura 4.19 – Execução dos furos a trado, para instalação do bastonete e das sondas (vista geral)



Figura 4.20 – Execução dos furos a trado, com locação pré-determinada, para instalação do bastonete e das sondas (vista aproximada)



Figura 4.21 – Furos de 2” já executados

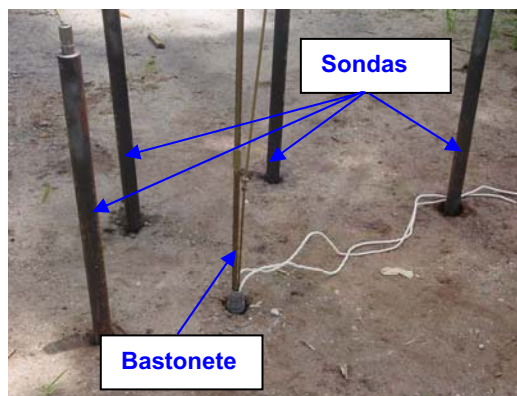


Figura 4.22 – Instalação do bastonete térmico e das sondas

Embora projetados inicialmente para chegarem a 1,0 metro de profundidade, as execuções dos furos a trado mecânico não obtiveram o alcance desejado ao encontrar materiais duros e grosseiros que impediam a ultrapassagem dos primeiros 80 cm. Com isso, houve uma alteração no planejamento inicial, com a profundidade máxima dos furos passando para este novo nível.

Faz-se necessário ressaltar que, durante a execução dos furos e, devido ao excesso de materiais grosseiros encontrados no solo, o trado de 2” de diâmetro foi completamente danificado.

Assim, levando-se em consideração a profundidade dos furos executados, os comprimentos dos instrumentos de medição e do bastonete térmico, e o perfil do solo local, chegou-se à seguinte configuração, mostrada na Figura 4.23 a seguir:

Conforme observado, tanto o bastonete térmico quanto as sondas medidoras de temperatura ficariam com uma boa parte de suas estruturas expostas. Inclusive, no caso das sondas, a ponta dos termopares superiores ficariam a 60 cm da superfície do terreno.

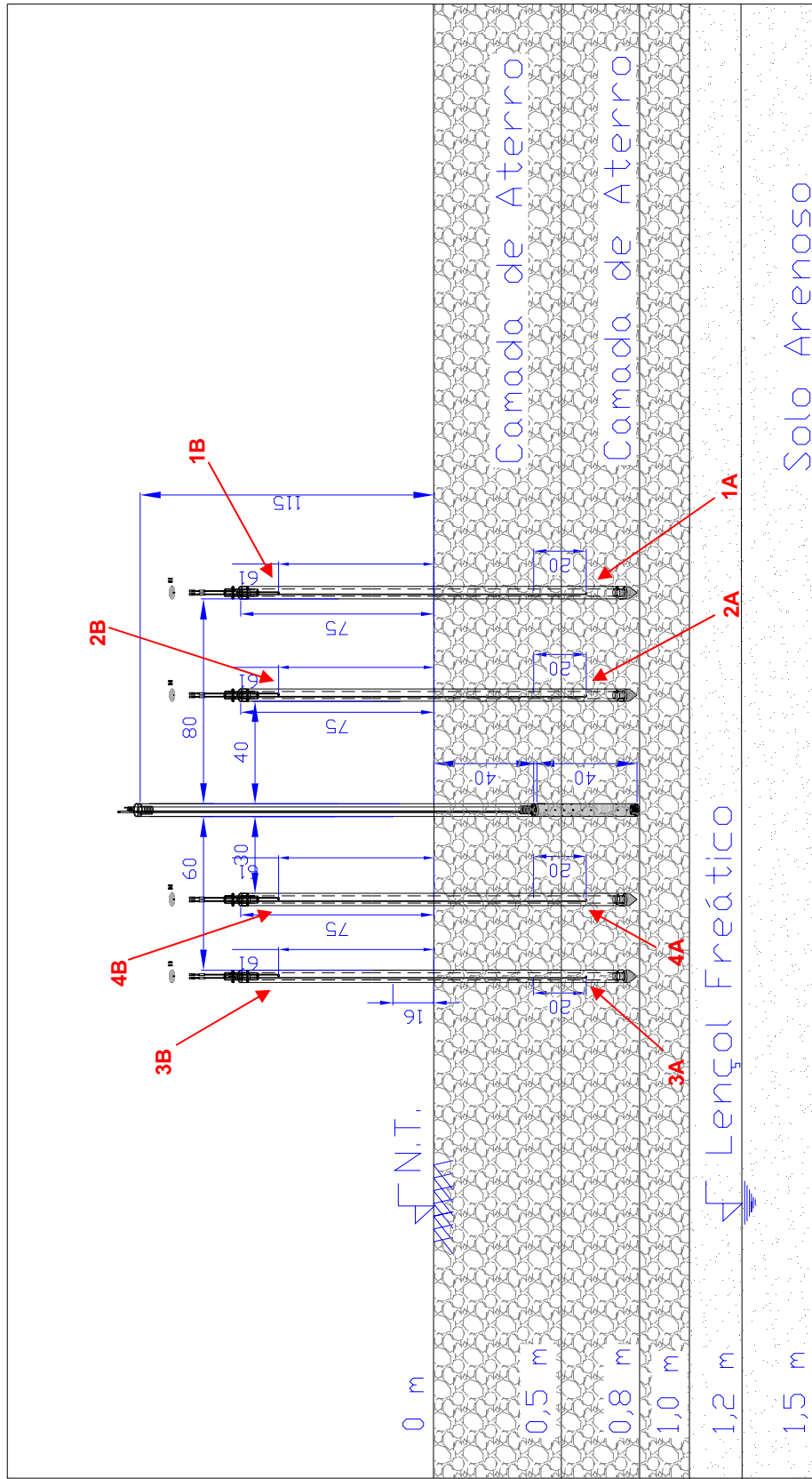


Figura 4.23 – Configuração do bastonete térmico e das sondas medidoras de temperatura no CE-01

De acordo com a idealização da configuração espacial dos instrumentos, mostrada na Figura 4.23, a parte inferior das sondas medidoras de temperatura deveria ficar a cerca de 03 centímetros da cota vertical da base do bastonete. No entanto, utilizando um trado mecânico manual é impossível obter tal precisão. Logo, decidiu-se que, caso a base de todos os instrumentos se situassem mais ou menos sob a mesma cota vertical, o objetivo já estaria atingido.

Portanto, uma vez posicionados a 80 cm da superfície do terreno, restaram apenas a montagem e conexão do sistema o que envolveu, basicamente, as instalações elétricas destes elementos e as ligações e conexões entre os demais instrumentos.

As sondas, enumeradas de 01 a 04, e termopares, nomeados de “a” (termopar inferior) e “b” (termopar superior), estavam posicionadas conforme mostra Tabela 4.2 a seguir, que também apresenta os canais da unidade aquisitora e armazenadora (*'data logger'*) nos quais foram conectados cada um dos termopares.:

Tabela 4.2 – Configuração literal dos termopares no CE-01

| Sonda | Termopar | Cota Vertical (cm) | Posição Horizontal (em relação à extremidade do bastonete) (cm) | Canal do 'data logger' |
|-------|----------|--------------------|---|------------------------|
| 01    | A        | 60                 | 80  | CH00                   |
|       | B        | -60                | 80  | CH05                   |
| 02    | A        | 60                 | 40  | CH01                   |
|       | B        | -60                | 40  | CH06                   |
| 03    | A        | 60                 | 60  | CH02                   |
|       | B        | -60                | 60  | CH07                   |
| 04    | A        | 60                 | 30  | CH03                   |
|       | B        | -60                | 30  | CH08                   |

Por fim, a Figura 4.24, a seguir, mostra como ficou o SDTIS depois de instalado e montado no CE-01.

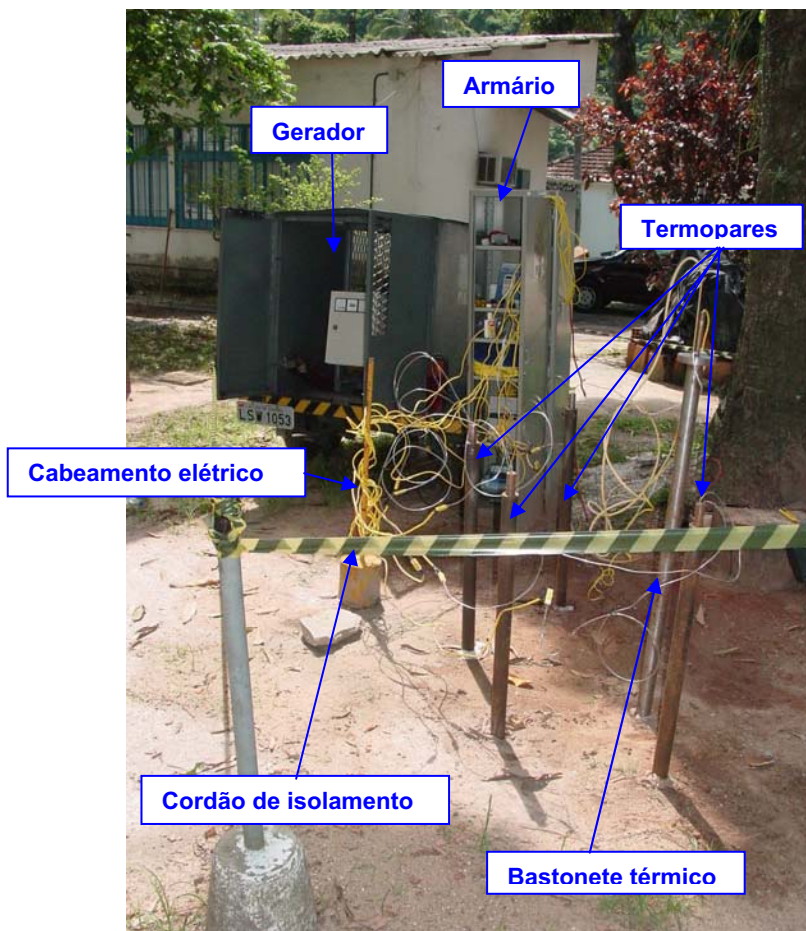


Figura 4.24 – Sistema de dessorção térmica *in situ* instalado na **EMBRAPA Solos**

Para se tentar proteger a instrumentação do SDTIS da ação danosa da chuva, ventos e raios solares, principalmente no que diz respeito à sua parte elétrica, foi colocada uma lona de plástico por cima, conforme mostra a Figura 4.25 a seguir.



Figura 4.25 – SDTIS instalado na **EMBRAPA Solos**, vista geral



Em meados de dezembro de 2005, a **EMBRAPA Solos** passou a utilizar parte desta área para depósito de entulhos provenientes de uma obra que estava sendo realizada em suas dependências. Com isso, o acesso ao furo utilizado para monitoramento do nível d'água foi fechado, impedindo que fosse feitas novas aferições. Por outro lado, grande parte da área do CE-01 também foi tomada por estes materiais, limitando em muito a sua utilização, conforme se planejava anteriormente.

### 4.2.3. Aplicação do novo SDTIS no CE-01

Como mostrado no capítulo anterior, a energia de alimentação do sistema seria fornecida pelo gerador a diesel. Para isso, foi necessário se fazer uma programação dos períodos do dia nos quais o gerador seria abastecido, levando-se em consideração a capacidade de seu tanque (12 Litros) e a sua autonomia correspondente (10 horas), de forma a se tentar otimizar o seu uso e “prejudicar” o mínimo possível o seu operador (evitando, por exemplo, que o gerador fosse abastecido durante a madrugada).

Logo, chegou-se aos horários de abastecimento apresentados na Tabela 4.3, que deveriam ser rigorosamente respeitados durante todo o funcionamento do SDTIS evitando, assim, a chamada “pane-seca”:

Tabela 4.3 – Programação do abastecimento do gerador

| Horário<br>(horas:minutos) | Combustível<br>(L) |
|----------------------------|--------------------|
| 08:00                      | 8,4                |
| 14:00                      | 9,6                |
| 22:00                      | 12                 |
| <b>Total (L/dia)</b>       | <b>30</b>          |

O consumo diário, levando-se em consideração o litro de diesel a **R\$1,86**<sup>14</sup>, e o total de combustível consumido diariamente, seria de aproximadamente **R\$56,00**.

<sup>14</sup> Preço referente a dezembro/2006, de acordo com Relatório Anual de Acompanhamento de Mercado da ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Para o experimento, havia a disponibilidade de 02 galões de armazenamento sobressalentes, sendo um de 50L e outro de 20L que, segundo os cálculos, deveriam durar cerca de dois dias. Isto facilitaria o abastecimento, uma vez que não seria preciso levar o gerador até um posto de combustíveis.

Tomando-se conhecimento destes dados, e com todos os instrumentos testados previamente em laboratório e, a princípio, funcionando corretamente, o novo SDTIS estava apto a iniciar os ensaios.

Então foram ligados diretamente no gerador o controlador de temperatura (no qual estava ligado o bastonete), a unidade aquisitora e armazenadora de dados (no qual estavam ligados os termopares das sondas) e o controlador de tempo (no qual estava instalado o compressor de ar).

Como será observado a partir de agora, muitos problemas foram registrados durante os ensaios, o que os obrigou a serem desligados para, em seguida, serem reiniciados novamente. Com isso, foi realizado um total de cinco tentativas no CE-01. Logo, de forma a facilitar a leitura e compreensão de cada um deles, o texto que se segue será estruturado em sub-itens e enumerado em 'experimentos', os quais se iniciaram em meados de dezembro e foram se sucedendo até meados de fevereiro.

#### **4.2.3.1. Primeiro Experimento**

Previamente, para se ter uma idéia das variações ambientais periódicas (diurna e noturna) de temperatura no CE-01, de forma a embasar possíveis discussões acerca de mudanças ocorridas durante os ensaios, resolveu-se deixar a unidade aquisitora de dados gravando as variações medidas pelos termopares durante cerca de 03 dias, sem que o bastonete térmico fosse ligado.

Conforme mostrado na Figura 4.23, o posicionamento das sondas mostrava 04 termopares a 60 cm de profundidade e mais 04 acima do nível do terreno. A idéia seria que os termopares superiores (1B, 2B, 3B e 4B) indicassem, em média, a temperatura ambiente externa do CE-01, enquanto os inferiores (1A, 2A, 3A e 4A) registrariam a temperatura aferida diretamente no solo.

É bem verdade que não se pode afirmar que os termopares superiores meçam exatamente a temperatura ambiente, uma vez que, apesar de estarem em contato com o ar, eles também se encontram em contato com a própria sonda e, conseqüentemente, também sofrem a influência das suas variações de temperatura. Logo, para padronizar estas aferições durante este trabalho, a temperatura média aferida pelos pontos 1B, 2B, 3B e 4B será chamada de 'temperatura externa'.

Assim, tal acompanhamento foi iniciado no dia 09 de dezembro de 2005, com programação para ser finalizado dia 12/12/2005. Porém, nesta data de "estréia" foi verificado o primeiro problema relacionado ao gerador.

Em pleno estado de funcionamento, além de um enorme barulho provocado pelo seu motor, havia uma grande trepidação do conjunto 'gerador-carroceria', o que causava uma grande instabilidade na voltagem fornecida pelo gerador. Com isso, a corrente elétrica que passava pelo sistema de dessorção térmica *in situ* também se tornava instável, alternando-se constantemente. Eventualmente, esta amperagem ultrapassava o limite do disjuntor, fazendo com que ele, conseqüentemente, se 'desarmasse'. Considerando-se que a resistência elétrica dos instrumentos ligados no gerador permanecia a mesma, havia o risco de danos serem causados a eles, o que acabou exatamente ocorrendo com a fonte de alimentação (12 Volts) do '*data logger*' e com o transformador de voltagens do compressor de ar que, devido a esta alternância de voltagem, foram danificados (queimados).

Certamente o '*data logger*' poderia trabalhar sem a fonte, caso fosse utilizadas baterias adequadas, assim como o compressor, desde que o seu sistema elétrico fosse modificado. No entanto, pensou-se que este problema do gerador também poderia danificar os demais instrumentos, principalmente o controlador de temperatura, o que deveria ser terminantemente evitado.

A questão principal foi que o chassi da carroceria, montado para o gerador, não tinha um sistema de amortecimento adequado para suportar as fortes e constantes vibrações durante o seu funcionamento, o que fazia com que o seu sistema elétrico sofresse estes problemas. Logo, para evitar estas alternâncias

de voltagens, seria necessário um sistema “antivibração” capaz de responder a estas trepidações.

Em face disto, a providência tomada foi a de se desligar todo o sistema e levar o veículo gerador-carroceria de volta ao seu montador, de forma a se tentar solucionar o problema.

#### **4.2.3.2. Segundo Experimento**

No dia 20 de dezembro de 2005, o veículo retornou ao CE-01. Como solução, foram instalados calços de borracha ao longo de toda a sua estrutura de forma a se tentar amortecê-la melhor perante as trepidações provocadas pelo gerador.

Com relação ao ‘*data logger*’, outra fonte foi adquirida. Para o compressor, mudou-se sua ligação elétrica interna de forma que ele pudesse trabalhar a 220 Volts, e não mais a 110.

No dia 21 de dezembro de 2005, houve uma nova tentativa em se ligar o sistema, porém o problema anterior voltou a ocorrer – desarme do disjuntor e desligamento do sistema, logo outra solução deveria ser tomada.

#### **4.2.3.3. Terceiro Experimento**

Para esta nova tentativa foi chamado um técnico especializado em eletrônica para dar uma consultoria acerca do problema apresentado. Segundo ele, realmente não haveria maneiras do sistema elétrico do gerador funcionar caso ele continuasse a sofrer estas trepidações.

Assim, como não se vislumbravam outras opções para se tentar melhorar o seu amortecimento, a não ser montando um outro chassi para o gerador, resolveu-se tirar a caixa de força (onde se encontravam as tomadas e o disjuntor) para fora do veículo e instalá-la em uma estrutura independente. Desta forma, ela não mais seria influenciada pelas suas trepidações e o sistema poderia funcionar normalmente. A Figura 4.26, abaixo, mostra o resultado desta nova alternativa:

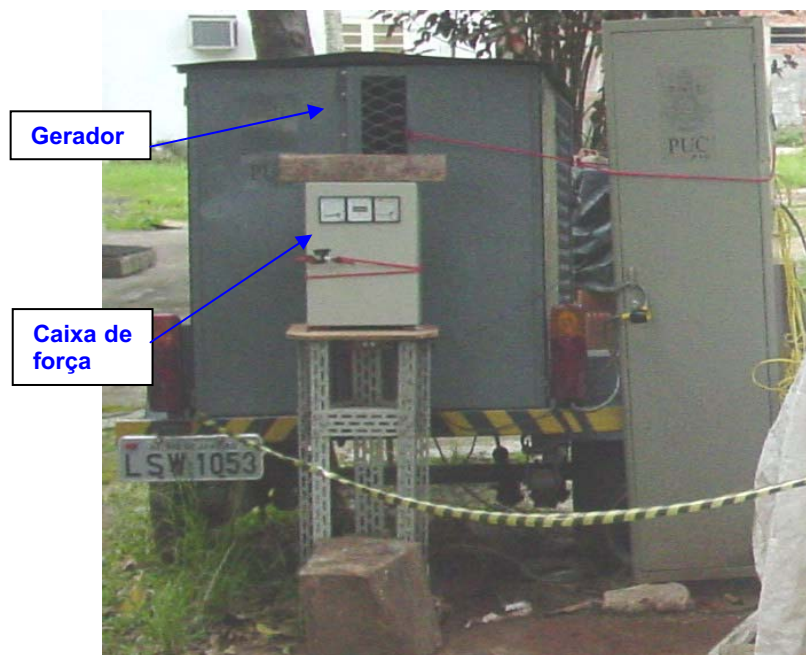


Figura 4.26 – Caixa de força do gerador independente da sua estrutura

Com isso, a princípio, o sistema elétrico do gerador passou a funcionar normalmente.

No dia 23 de janeiro de 2006, iniciou-se o terceiro experimento.

Pouco antes de se ligar o sistema, escavou-se o terreno em um local próximo de onde seria realizado o experimento para se colherem amostras de solo para determinação do teor de umidade (a cerca de 50 cm de profundidade) e para análises microbiológicas (a 20 e 40 cm), conforme ilustrado pelas Figuras 4.27 a 4.32.

Para o solo destinado às análises microbiológicas utilizou-se um anel de 1,5” de diâmetro e 4 cm de altura, com ponta biselada, o qual era cravado à profundidade desejada, conforme mostra a Figura 4.28. O local de coleta se situava a cerca de 1 metro de distância do bastonete térmico, conforme mostra a Figura 4.30.

Para amostragem de solo para determinação do teor de umidade foi utilizado um trado mecânico do tipo holandês de 1”, gentilmente cedido pela **EMBRAPA Solos**, conforme mostrado pela Figura 4.31.



Figura 4.27 – Coleta de amostras de solo para microbiologia



Figura 4.28 – Cravação de anel com ponta biselada para coleta de amostras de solo



Figura 4.29 – Cuidados para conservar as amostras de solo para microbiologia



Figura 4.30 – Medição da distância do local de extração de amostras até o bastonete

Inclusive, observa-se em algumas fotos (Figuras 4.29 e 4.30) mostradas acima que, durante o período no qual estes trabalhos de campo foram realizados, a **EMBRAPA Solos** já utilizava parte da área para depositar entulhos provenientes de uma obra em suas dependências, o que acabou limitando o uso do CE-01.



Figura 4.31 – Cravação de trado para coleta de amostras



Figura 4.32 – Recolhimento de amostras para determinação de umidade

O teor de umidade obtido a partir de 03 amostras de solo levadas à estufa sob 110°C por um período de 24 horas foi de **16,24%**. Este valor foi utilizado como parâmetro inicial para os ensaios.

Finalizadas as amostragens, decidiu-se então que, a princípio, o bastonete térmico trabalharia sob uma temperatura de 100°C por cerca de 03 dias e que, gradualmente, esta seria incrementada até que se chegasse a 400°C. Os dados seriam coletados a cada 10 segundos. Assim, foi ligado o sistema de dessorção térmica *in situ*.

Contudo, entre os dias 23 e 24 de janeiro, o controlador de temperatura apresentou-se sempre por volta de 50°C, sem ultrapassar este valor. Então, após quase 19 horas de ensaio, decidiu-se desligar o sistema para verificação do armazenamento dos dados pelo '*data logger*'. O objetivo era plotar e analisar um gráfico relacionando as temperaturas aferidas pelos termopares e o tempo, o qual está apresentado na Figura 4.33, a seguir, e identificar o que poderia estar ocorrendo:

CE-01, de 23-01 a 24-01

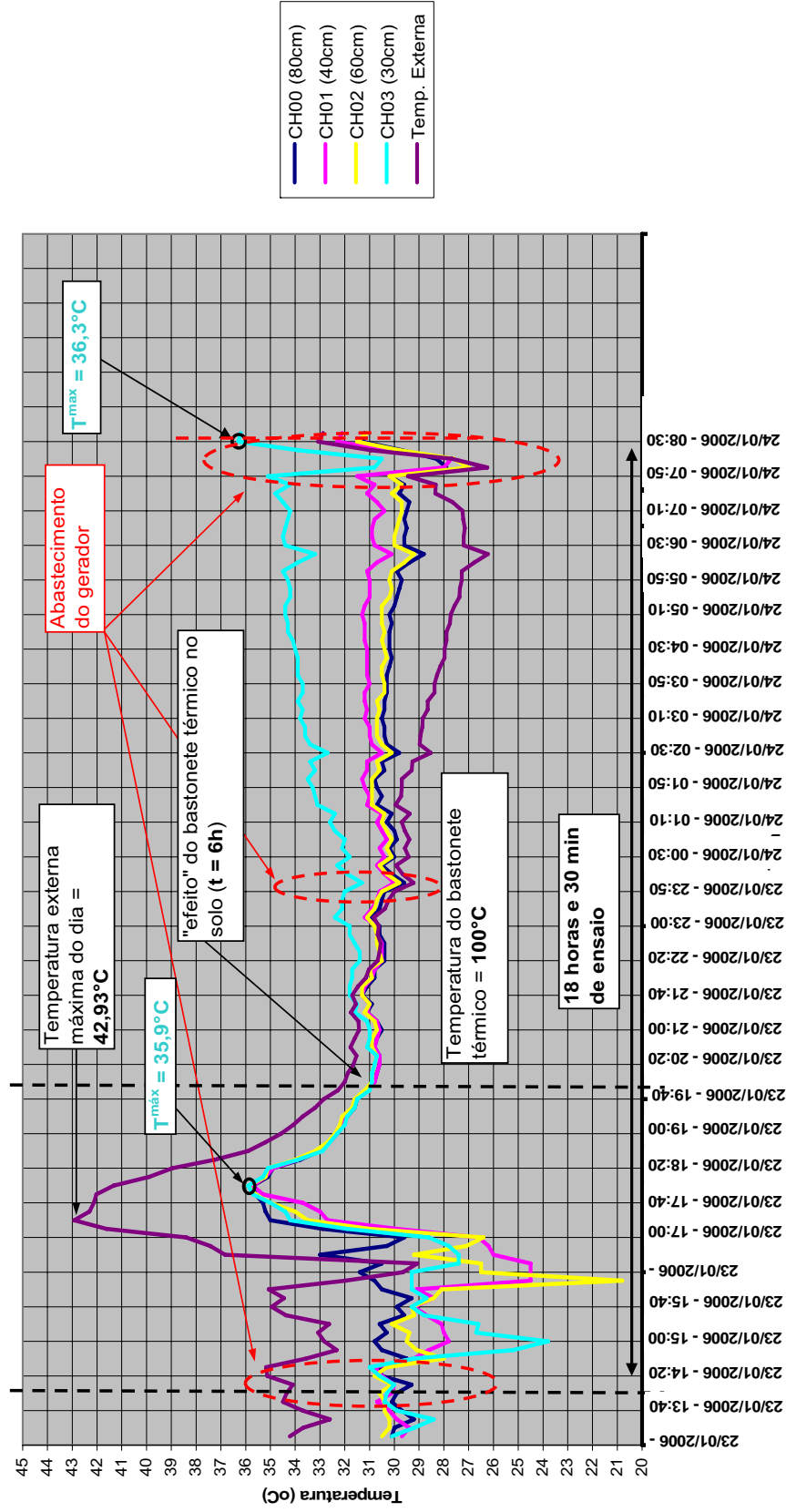


Figura 4.33 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006



A partir das curvas, percebeu-se que os dados estavam sendo gravados normalmente e, aparentemente, o bastonete térmico estava aplicando calor no solo, apesar de não se saber ao certo sob quais níveis de temperatura.

Conforme a legenda do gráfico, a 'temperatura externa' representa a média das aferições realizadas pelos termopares localizados acima do nível do terreno. As demais curvas indicam as temperaturas de cada sonda a 60 cm de profundidade, porém, conforme mencionado anteriormente, com diferentes distâncias horizontais em relação à extremidade do bastonete térmico, as quais estão devidamente indicadas no gráfico.

Como era de se esperar, os dados de temperatura seguiram, inicialmente, um padrão (crescente e decrescente) conforme o período do dia e o tempo de exposição ao sol e ao aquecimento do bastonete térmico. Por volta das 17h30min, por exemplo, era o momento do dia durante o qual os raios solares incidiam com maior intensidade no CE-01, naquela época do ano (verão), o que correspondeu exatamente aos picos de temperatura aferidos no dia 23 de janeiro. Após este momento, a 'temperatura externa' começou a decrescer, equivalentemente à chegada do período noturno, onde se esperava que a temperatura ambiente fosse menor.

Durante as primeiras 04 horas, as tendências das curvas que representavam os termopares inferiores, situados a 60 cm de profundidade, foram bem semelhantes. Entre as 18 e 20 horas do dia 23/01, estas curvas seguiram a mesma trajetória, no entanto, após este momento, o termopar 4A, representado pelo canal 03 (CH03) sofreu uma queda de 5°C para, em seguida, seguir uma crescente, muito possivelmente indicando um aquecimento provocado pela sua maior proximidade ao bastonete (30 cm) – o qual deveria estar, em princípio, a 100°C. Esta crescente durou até o final do ensaio e, provavelmente, continuaria caso o mesmo não fosse interrompido. Já as demais curvas (canais 00, 01 e 02) suplantaram as temperaturas aferidas acima do nível do terreno, o que não quer dizer, necessariamente, que o aquecimento do bastonete já estava fazendo efeito nestas sondas, uma vez que, por outro lado, também se espera intuitivamente que, durante a noite, a temperatura do terreno seja maior do que a externa.

Porém, como houve uma diferença de temperatura entre elas, pode-se afirmar que houve sim a influência do bastonete térmico.

Também se pôde observar nos gráficos que alguns pontos “saíam da curva”, fugindo de uma certa tendência, possivelmente indicando problemas relacionados à transmissão do sinal elétrico (e.g. perda de sinal ao longo de cabos devido a interferências eletromagnéticas do gerador e ruídos<sup>15</sup>).

Complementando as informações obtidas com o gráfico, tem-se que:

1. O ensaio foi iniciado às 14 horas do dia 23/01 e teve a duração de 18 horas e 30 minutos.
2. Durante os abastecimentos do gerador, as curvas apresentavam uma queda brusca. Quando o sistema era religado, elas retornavam um pouco acima dos pontos anteriores, o que pode ser considerado normal, pois a transmissão de calor no solo, e no ar, tanto pelos raios solares quanto pelo bastonete térmico, continuava a ocorrer neste mínimo espaço de tempo (menos de 1 hora).
3. O pico da 'temperatura externa' correspondia ao momento em que o sol incidia com maior intensidade no CE-01 durante aquela estação do ano. Não por coincidência, este pico também foi notado pelas demais curvas poucos minutos após – inclusive a mesma temperatura para os 04 termopares inferiores – indicando três possibilidades: a) a incidência solar no CE-01, naquele momento, foi suficiente para aquecer o solo e, conseqüentemente, as partes inferiores de cada sonda; b) houve condução térmica descendente através da sonda de ferro, aquecendo também a parte inferior das sondas; e c) ocorreu um somatório das duas condições anteriores.
4. As últimas 12 horas de ensaio mostraram que a diferença vertical entre as curvas que representam os termopares inferiores das sondas medidoras de temperatura apresentou-se coerente com as suas respectivas distâncias em relação ao bastonete térmico. Ou seja, quanto

---

<sup>15</sup> Os termopares trabalham em uma frequência dC muito baixa, logo quanto maior é o cabo, mais susceptível será a transmissão do sinal em relação a perdas de correntes de atividades eletromagnéticas externas, inclusive do gerador, o que pode influenciar na aferição da temperatura pela unidade de medição ('data logger').

mais distante do bastonete, menor será a sua influência com relação a um aumento ou decréscimo de temperatura.

5. Entre 17h20min e 19 horas do dia 23/01, a 'temperatura externa' sofreu a queda mais acentuada. Após este momento, as temperaturas aferidas pelos termopares inferiores superaram as dos superiores. Com relação a isto, observa-se que:
  - a. Na transição entre os períodos diurno e noturno, a temperatura ambiente decresce mais do que a temperatura do solo.
  - b. O comportamento crescente das curvas dos termopares inferiores, principalmente a que representa a sonda mais próxima ao bastonete térmico (30 cm), mostra que o aquecedor já estava fazendo efeito no solo.

Mesmo com base nestas informações, provavelmente devido ao pequeno período de duração do experimento, não se pôde concluir com certeza se o bastonete térmico realmente apresentava-se a uma temperatura de 100°C, conforme ordenado e, neste caso, a informação passada pelo controlador (temperatura a 50°C) não condizia com a realidade. A título de informação, esta foi uma possibilidade só levantada durante outros ensaios posteriores.

Contudo, é importante afirmar que mesmo que o solo esteja exposto a cerca de 50°C, durante as quase 19 horas de ensaio, já é possível que a fase líquida da água existente nos poros do volume de solo ao redor do bastonete térmico seja proporcionalmente evaporada. Em outros termos, possivelmente houve um decréscimo nos 16,24% de teor de umidade determinados antes do início do ensaio.

No Anexo II são comparados, individualmente, cada um dos termopares inferiores junto à média da temperatura aferida pelos termopares superiores (*i.e.* 'temperatura externa').

Analisando-se cada um delas, pode-se afirmar que todas apresentaram um comportamento semelhante. Nas últimas 12 horas de ensaio, os canais 00, 01 e 02 ficaram, praticamente, constantes (variações inferiores a 1°C). Já o canal 03, que representa o termopar inferior mais próximo ao bastonete, mostrou-se

crecente. Provavelmente, caso este experimento continuasse, a temperatura continuaria a subir.

O 'off-set' representa a diferença entre as 'temperaturas externa' e as aferidas pelos termopares inferiores. 'Off-set' com sinal negativo mostra que a 'temperatura externa' é maior do que a medida pelo termopar inferior, já o sinal positivo diz exatamente o inverso. Estão destacados, em todos os gráficos, o momento em que eles são máximos e, conforme se pode observar, isto ocorre quase simultaneamente, o que mostra que o comportamento do solo em função da temperatura apresentou-se de forma semelhante.

Como observação final, para este ensaio, ou experimento, foram gastos cerca de 24 litros de diesel.

#### **4.2.3.4. Quarto Experimento**

No dia 25 de janeiro, por volta das 13hs, iniciou-se o quarto experimento com o bastonete e as sondas medidoras de temperatura nas mesmas posições as quais se encontravam anteriormente. Para esta nova fase, decidiu-se que a temperatura a ser emitida pelo bastonete térmico já seria de 400°C, e de forma contínua.

Porém, até o dia 27 de janeiro, a temperatura apresentada pelo controlador, medida pelo termopar inserido no bastonete térmico, não indicava qualquer mudança, mantendo-se sempre em cerca de 50°C, assim como apresentado entre os dias 23 e 24. Logo, decidiu-se desmontar o bastonete para se tentar avaliar o que poderia estar ocorrendo.

Ao desmontar e abrir o instrumento, verificou-se o rompimento de um dos terminais de saída do cartucho de resistência, conforme mostra a Figura 4.34 a seguir. Curiosamente, embora a temperatura aferida pelo controlador a partir do termopar instalado dentro do bastonete não indicasse, ele aparentava ter derretido em função de altas temperaturas, já que tanto a sua camada protetora isolante, quanto a anilha cerâmica utilizada para a mesma função, mostravam-se chamuscadas. O material externo do cartucho de resistência também apresentava sinais de queimado.



Figura 4.34 – Detalhe do rompimento de um dos terminais do cartucho de resistência do aquecedor, com sinais de 'queimado'

Logo, foram levantadas algumas hipóteses em relação a este problema. Uma delas considera um grande temporal ocorrido na noite do dia 25/01/2006, observado “ao vivo” durante um abastecimento às 23 horas. Neste caso, a água da chuva infiltrou-se no solo do CE-01 com grande intensidade e, conseqüentemente, acabou infiltrando-se no bastonete térmico, uma vez que a sua estrutura mecânica não previa vedações. Ao molhar os terminais, pode ter provocado um surto de corrente que, por sua vez, pode ter culminado em um curto circuito, danificando assim o sistema elétrico.

Outra hipótese levantada foi com relação ao tipo de solda utilizada para unir a resistência elétrica aos seus cabos terminais, a qual poderia não ser capaz de suportar o peso próprio do cartucho de resistência do aquecedor quando submetido a altas temperaturas. Logo, conforme a temperatura do aquecedor aumentava, este contato se enfraquecia.

Com isso, o experimento precisou ser interrompido para que o bastonete térmico passasse por reparos.

De qualquer forma, assim como no experimento anterior, os gráficos de temperatura *versus* tempo foram plotados para todos os termopares, cujas distâncias horizontais em relação à extremidade do bastonete térmico estão apresentadas na legenda. A Figura 4.35, da página seguinte, mostra todos os termopares ao mesmo tempo, enquanto o Anexo II apresenta seus resultados individuais, da mesma forma como foi feito no experimento anterior.

Como observações a partir dos gráficos, têm-se que:

1. O ensaio durou 48 horas ininterruptas.
2. As 'temperaturas externas' máximas de cada dia foram registradas por volta das 17h30min, como já era de se esperar. Assim como no ensaio anterior, picos de temperatura para os termopares inferiores também foram registrados um pouco depois deste instante, indicando mais uma vez que: a) ou a incidência solar no CE-01, naquele momento, foi suficiente para aquecer o solo e, conseqüentemente, as partes inferiores de cada sonda; b) ou houve condução térmica descendente através da sonda de ferro, aquecendo também a parte inferior das sondas; e c) ou ocorreu um somatório das duas condições anteriores, o que já se torna mais provável no presente momento.
3. Durante os períodos de abastecimento do gerador, todas as curvas apresentavam uma queda acentuada. Contudo, após o restabelecimento do ensaio, elas retomavam a tendência seguida anteriormente.
4. Assim como no experimento anterior, a diferença vertical entre as curvas que representam os termopares inferiores apresentou-se coerente com as suas respectivas distâncias em relação ao bastonete térmico, ou seja, a curva correspondente ao termopar localizado a 30 cm, por exemplo, mostra temperaturas superiores às demais, e assim por diante.
5. Dentre os termopares inferiores, a temperatura máxima aferida foi de 44,7°C, registrada pela sonda mais próxima ao bastonete térmico, como já era de se esperar, o que ainda é relativamente baixo.
6. Por volta das 23h do dia 25/01, houve uma intensa chuva na cidade e, após este momento, todas as curvas que representam os termopares inferiores apresentaram um crescimento que culminou no ponto máximo de cada uma delas. Algum tempo depois, estas curvas apresentaram-se de forma decrescente, mantendo o que parecia ser a sua tendência anterior.

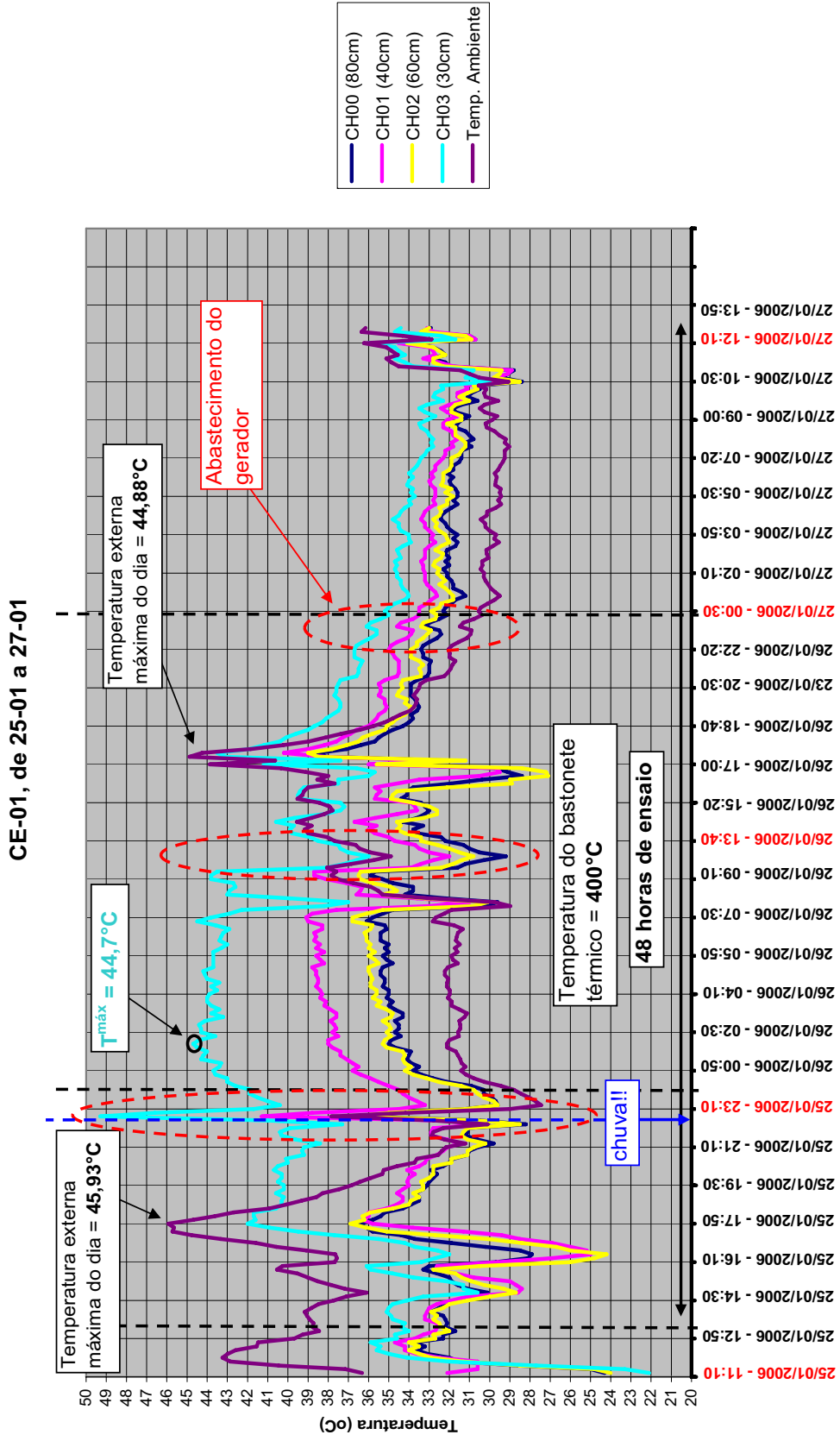


Figura 4.35 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006

Tentando-se analisar fisicamente o comportamento do solo em função das curvas dos termopares inferiores, tanto conjuntamente, quanto de forma individual, tem-se o seguinte:

- I. Assume-se que o volume de solo ao redor do bastonete possuía, antes deste quarto experimento, teor de umidade inferior aos 16,24% determinados antes do terceiro experimento, ou seja, praticamente seco.
- II. Pode-se observar que, durante as primeiras 3 horas de experimento, mesmo com o bastonete ligado, houve, em média, um pequeno decréscimo de temperatura (apesar das variações), não indicando alterações significativas nos pontos 1A, 2A e 3A de referência de medição de temperatura. Já a curva do ponto 4A (canal 04), mais próximo ao bastonete, se mostrou superior às demais em até 3°C, o que já indica uma certa influência em relação ao aquecimento do bastonete térmico. Considerando a hipótese de que o bastonete térmico estava funcionando corretamente (a 400°C), pode-se dizer que esta influência não foi tão grande devido ao fato da baixíssima umidade existente naquele volume de solo. Logo, o processo de fluxo de calor deveria ser mais lento e muito menos eficiente do que o normal, uma vez que ele se daria por condução, através do mínimo contato entre as partículas de solo e pelo ar, e por radiação, também através do ar.
- III. Entre 16 e 18h, houve um crescimento substancial de temperatura em todas as curvas, o que muito provavelmente está relacionado à incidência direta dos raios solares no CE-01. Ou seja, houve outra fonte de calor naquele volume de solo – outro gradiente de temperatura – aumentando o padrão anterior.
- IV. Em seguida houve um decréscimo em todas elas, indicando uma possível convergência em retornar às tendências anteriores, o que já seria de se esperar, já que nestes períodos já não havia mais sol no CE-01.
- V. Aparentemente, a tendência destas curvas seria a de decrescer após este período, porém, por voltas das 23h do dia 25/01, e conforme mencionado anteriormente, houve um grande temporal no local. Com isso, houve um processo natural de molhagem do solo, aumentando o seu teor de umidade. Quase simultaneamente, as curvas que representam os termopares inferiores registraram um grande pico e tornaram-se crescentes nas 8 horas seguintes, registrando um aumento de até 5°C em cada curva. Foi inclusive no intervalo entre 1h e 7h30min da manhã onde foram



consideradas as máximas temperaturas nos pontos 1A, 2A, 3A e 4A, indicando que, quando há umidade no solo, o calor se difunde mais do que quando ele se encontra seco. Em linhas gerais, a presença de um meio líquido nos interstícios do solo torna-se um catalisador para este fluxo.

- VI. Porém, a temperatura do solo não se manteve crescente, nem tão pouco constante. Pelo contrário, começou a decrescer, indicando que a sua umidade estava decrescendo novamente. Entre 9 e 17 horas do dia 26/01 os dados registraram grandes variações de temperatura, alternando-se entre grandes quedas seguidas de ascensões em menores proporções, porém o solo já apresentava esta tendência em reduzir a sua temperatura. Analisando bem o gráfico, é bem provável que os terminais do bastonete tenham se rompido por volta das 7 horas da manhã.
- VII. Os períodos seguintes foram de decréscimo total, sob taxa quase constante.

E, finalmente, não se tem certeza se o bastonete térmico chegou a apresentar temperaturas superiores aos 50°C mostrados pelo controlador. É muito provável que sim.

Como última observação, para este experimento foram gastos cerca de 50 litros de diesel.

#### **4.2.3.5. Quinto Experimento**

Com relação aos terminais do cartucho de resistência anterior, eles foram novamente soldados, porém, desta vez, por uma solda mais resistente quando submetida a altas temperaturas. Paralelamente, trocou-se todo o cabeamento, que antes era de níquel  $\varnothing 3\text{mm}$  (sem proteção), passando-o para cabos protegidos por fibras de amianto, diâmetro externo total de 5 mm, reforçando-se assim o seu isolamento térmico.

No dia 03 de fevereiro, com o bastonete térmico consertado, posicionaram-se os equipamentos do novo sistema de dessorção térmica *in situ* nos mesmos locais que eles se encontravam nos experimentos anteriores para, em seguida, iniciar-se o quinto experimento.

Nesta data, grande parte da área do CE-01 já estava completamente tomada pelos entulhos da **EMBRAPA Solos**, conforme mostra a Figura 4.36 abaixo, o que limitou bastante a sua utilização. Neste momento, já não havia mais pontos de medições do nível d'água, pontos para coleta de solo e locais para a realização de ensaios em um novo local. Até por isso, a área de experimentos teve que continuar a mesma.



Figura 4.36 – Vista do CE-01, mostrando grande parte da área tomada por entulhos

Um outro importante fator a ser relatado é que nos dias 29 e 31 de janeiro, ocorreram grandes temporais na cidade do Rio de Janeiro. Logo, apesar de não ter sido determinado o teor de umidade do solo antes deste novo experimento, levando em consideração as limitações do CE-01, ele certamente estaria superior ao que foi determinado anteriormente, uma vez que o ensaio anterior havia sido finalizado há uma semana atrás.

Portanto, por volta das 15h30min do dia 03 de fevereiro de 2006, decidiu-se programar o controlador de temperatura para chegar à temperatura de 400°C em 24 horas e, a partir daí, manter esta temperatura contínua.

No entanto, 24 horas depois o termopar interno do bastonete térmico ainda indicava uma temperatura de 200°C, mostrando, novamente, que poderia estar ocorrendo algum problema.

Por volta das 10hs do dia 05/02/2006, quando o gerador foi reabastecido, notou-se que a sua parte elétrica havia deixado de funcionar, já que nem o *'data logger'* e nem o controlador de temperatura estavam mais funcionando, apesar do seu motor continuar trabalhando normalmente. Não se tinha idéia do que poderia ter acontecido.

Logo, foram desligados todos os equipamentos.

Até o momento, tinham sido gastos cerca de 50 litros de diesel.

De qualquer forma, mais uma vez os gráficos foram plotados e estão mostrados na Figura 4.37 a seguir e no Anexo II, conforme ensaios anteriores.

Com relação ao gráfico principal contendo todas as curvas, foram feitas as seguintes observações:

1. O experimento teve a duração de 42 horas até que o gerador deixasse de funcionar.
2. As máximas 'temperaturas externas' foram registradas por volta das 17h30min, como já era de se esperar. Nestes momentos, as curvas dos termopares inferiores também apresentaram picos de temperatura, mostrando, mais uma vez, que estava havendo condução de calor através da sonda medidora de temperatura (de cima para baixo) e que a incidência de raios solares no CE-01 também representava uma outra fonte de calor ao solo.
3. Assim como nos demais experimentos, quando o gerador era abastecido, todas as curvas apresentavam uma queda para, tempos depois, seguirem as trajetórias anteriores.
4. Começou-se a notar um efeito do aquecimento provocado pelo bastonete térmico a partir da 3ª hora de ensaio. Neste momento, o ponto 4A, a 30 cm de distância, começou a se destacar em relação aos demais, com a sua curva seguindo uma grande crescente.

CE-01, de 03/02 a 05/02

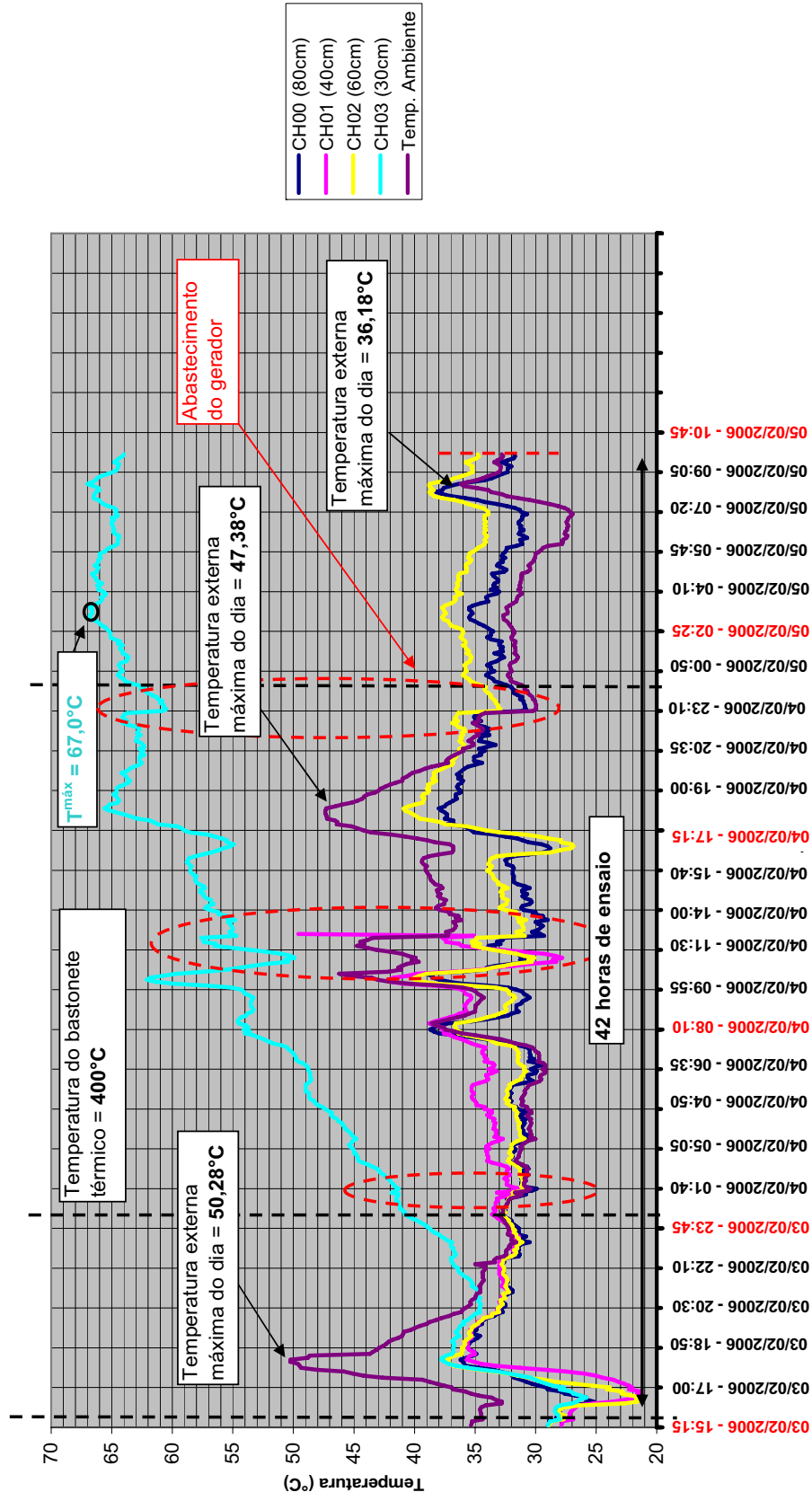


Figura 4.37 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006

5. A maior temperatura do experimento foi de 67°C, registrada pelo Ponto 4A, ainda assim muito inferior aos 400°C, hipoteticamente, impostos pelo bastonete.
6. Mais ou menos a partir das 23h50min do dia 03/02, o ponto 2A, a 40 cm de distância do bastonete térmico, também começou a se destacar em relação aos pontos mais distantes, já indicando uma influência da fonte aquecedora.
7. Assim como no experimento anterior, entre 8 e 18 horas do dia 04/02, os dados registraram grandes variações de temperatura, alternando-se entre grandes quedas seguidas de ascensões em mesmas proporções, porém com todas as curvas ainda apresentando tendência de crescimento.
8. Por volta do meio dia, do dia 04/02, o canal 01 (ponto 2A), que registra temperaturas a 40 cm de distância, deixou de funcionar. Provavelmente, deve ter havido algum mau contato, a princípio, sem maiores explicações. Porém isto não foi notado durante o experimento, só após a plotagem dos gráficos.
9. Ainda neste momento, o ponto 3A, situado a 60 cm de distância em relação ao bastonete térmico, também começou a se destacar em relação ao último ponto, já indicando o efeito do aquecedor.
10. De acordo com o gráfico principal, muito provavelmente às 8 horas da manhã, do dia 05/02, a parte elétrica do gerador deixou de funcionar, uma vez que todas as curvas passaram a se apresentar em queda.

Neste experimento, o ponto 4A registrou uma temperatura maior do que as registradas nos experimentos anteriores: 67°C, às 3 horas da manhã do dia 05/02. O mesmo ocorreu para os demais pontos, conforme se observa a Tabela 4.4, a seguir. Levando-se em conta observações realizadas nos outros experimentos, pode-se afirmar que o bastonete térmico foi mais eficiente neste caso porque havia mais água nos vazios do solo do que antes, o que certamente foi provocado pelos grandes temporais ocorridos durante a semana anterior.

No entanto, a temperatura máxima neste quinto experimento só foi registrada com pouco mais de 41 horas de ensaio, muito superior ao tempo necessário para que outros experimentos chegassem às suas máximas.

Tabela 4.4 – Comparação dos registros de temperatura máxima nos terceiro, quarto e quinto experimentos

| Ponto            | Terceiro Experimento<br>(23 e 24 de janeiro) |                       | Quarto Experimento<br>(25, 26 e 27 de janeiro) |                       | Quinto Experimento<br>(3, 4 e 5 de fevereiro) |                       |
|------------------|--|-----------------------|--|-----------------------|---|-----------------------|
|                  | Temperatura<br>Máxima                        | Tempo<br>de<br>ensaio | Temperatura<br>Máxima                          | Tempo<br>de<br>ensaio | Temperatura<br>Máxima                         | Tempo<br>de<br>ensaio |
| 4A (30 cm)       | 36,3°C                                       | 18h30min              | 44,7°C   | 14h34min              | <b>67,0°C</b>                                 | 41h16min              |
| 2A (40 cm)       | 32,3°C                                       | 18h30min              | 39,1°C   | 20h04min              | <b>49,6°C</b>                                 | 21h35min              |
| 3A (60 cm)       | 31,5°C                                       | 18h30min              | 36,8°C   | 20h04min              | <b>40,9°C</b>                                 | 26h50min              |
| 1A (80 cm)       | 31,3°C                                       | 18h30min              | 36,1°C   | 19h54min              | <b>39,2°C</b>                                 | 19h14min              |
| Temp.<br>externa | 42,93°C                                      | 4h02min               | 45,93°C  | 6h25min               | <b>50,28°C</b>                                | 2h47min               |

Faz-se necessário ressaltar que a escolha das máximas temperaturas levou em conta exclusivamente a tendência dos gráficos, ou seja, se havia um pico que poderia ter sido influenciado por problemas de sinais elétricos, ou nos momentos em que o sol incidia no CE-01, ele era desprezado.

Por outro lado, o fato da 'temperatura externa' mostrar valores tão elevados se deve ao contato entre os termopares superiores e a sonda de aço. Como o aço conduz muito mais calor do que o ar, ela exercia muito mais influência nas aferições destes termopares, o que foi determinante para estas medições. E isto não foi previsto antes dos ensaios, o que fez com que não houvesse um termômetro ambiente, que medisse apenas a temperatura do ar.

Com isso, é bem provável que durante as incidências dos raios solares no CE-01, a chamada 'temperatura externa' era superior à temperatura atmosférica, porém não se sabe em quanto.

Voltando ao assunto do problema apresentado pelo gerador, no dia 08/02/2006, o técnico eletricista foi ao CE-01 para fazer uma avaliação das suas condições elétricas, onde foi necessário desmontá-lo e levar algumas peças (capacitor, dentre outras) ao **Laboratório de Elétrica da PUC-Rio** para análise.

Uma semana após a visita, e depois de verificar estas peças, o técnico concluiu que o seu conserto não era viável, levando em conta relações custo-benefício.

Na verdade, este problema apenas contribuiu à tomada de decisão com relação a não mais se utilizar este tipo de gerador para experiências envolvendo o novo sistema de dessorção térmica *in situ*. Uma de suas principais dificuldades era o

seu consumo, pois cada tanque de combustível cheio (cerca de 12L) correspondia a apenas 10 horas de autonomia, o que resultava em uma série de problemas para o seu abastecimento em períodos intercalados ao longo do dia (necessidade de se abastecê-lo durante a noite e, em alguns casos, durante a madrugada), afora a necessidade em se deixar o gerador em repouso por algum tempo após o seu abastecimento, o que acabou entrando em conflito com a demanda contínua do sistema de dessorção térmica *in situ*. Possivelmente, como este período de repouso não era respeitado, a parte elétrica do gerador acabou não resistindo ao processo.

Vislumbra-se, para este tipo de técnica, uma fonte de energia que represente um custo relativamente barato, ao se comparar com as demais, e que possa trabalhar continuamente durante um longo período de tempo.

Com isso, concluiu-se que este tipo de gerador não poderia ser utilizado para aplicações como esta.

Como solução, tentou-se pleitear junto a **EMBRAPA Solos** e a **LIGHT** (companhia de energia elétrica do Rio de Janeiro) a instalação de um ponto de rede elétrica com consumo individualizado (“relógio” do CE-01 diferenciado do “relógio” registrador do consumo da **EMBRAPA Solos**) para o experimento. Primeiramente pela questão de se ter o registro do consumo de energia elétrica do novo SDTIS, o que ocorria anteriormente com o gerador. E, em segundo lugar, para se separar as contas de luz **EMBRAPA Solos** e **NGA/PUC-Rio**, evitando quaisquer tipos de problemas relacionados à área financeira de ambos.

Como esta possibilidade não foi viável tecnicamente, tentou-se a simples instalação de um ponto de energia elétrica no CE-01, porém proveniente da rede particular da **EMBRAPA Solos**. Porém, a instituição **EMBRAPA Solos** e o **NGA/PUC-Rio** não entraram em acordo, o que acarretou na impossibilidade de realizar tal empreitada.

Logo, os experimentos relativos à aplicação da dessorção por meio do bastonete térmico não puderam mais ser realizados no CE-01. Estas avaliações e negociações duraram cerca de um mês, desde o final do último experimento.

**4.2.3.6.****Considerações finais sobre a aplicação da dessorção térmica e demais ensaios no CE-01**

A intenção de se discriminar e relatar todas as atividades realizadas no CE-01 em ordem cronológica, dando grande destaque para as datas e mostrando também as suas durações, foi para mostrar, claramente, que os problemas ocorridos em campo (e que não foram poucos) resultaram em tempo decorrido, e também perdido, durante a dissertação, mesmo sabendo que estes problemas são passíveis e normais de ocorrerem em ensaios de campo.

Esta relação cronológica das atividades mostra alguns intervalos de tempo entre cada item, às vezes longos, o que também pode ser explicado pelos trabalhos realizados "extra-campo", tais como:

- Manutenção da instrumentação e aparelhagem danificada;
- Ensaios e testes realizados em laboratório;
- Estudo de alternativas aos problemas apresentados;
- Leituras e redação do texto da dissertação.

Outros importantes fatores limitadores dos trabalhos de campo, conforme já mencionados anteriormente, foram relativos à ocupação do CE-01 com entulhos e devidos às condições meteorológicas apresentadas durante estes quase 03 meses, já que a ocorrência de chuvas prejudicava serviços como sondagens, execução de furos para instalação da instrumentação, amostragem de solo e, obviamente, a simples ida e estadia no local. E, conforme observado na Tabela 4.1, o bairro Jardim Botânico foi um dos bairros cariocas que mais sofreu com estes problemas durante este tempo.



#### **4.2.4. Amostragem de bloco no CE-01**

Conforme mencionado na introdução deste capítulo, o serviço realizado para complementar as atividades de campo no CE-01 foi a extração de um bloco de solo indeformável, a uma profundidade de cerca 80 cm, a qual correspondeu ao nível máximo onde a base do bastonete térmico foi posicionada. Esta campanha foi realizada no dia 06 de março de 2006 e durou o dia todo.

O objetivo desta amostragem foi o de levar um bloco de solo para o laboratório (LGMA/PUC-Rio) e nele realizar os ensaios de determinação dos parâmetros térmicos e de microbiologia, dentre os quais as simulações da dessorção térmica em uma estufa do tipo mufla. Com relação ao seu tamanho, peso e volume, idealizou-se que um bloco de cerca de 40cm<sup>3</sup> seria suficiente para atender às solicitações.

Os materiais utilizados durante o serviço foram:

- Enxada, pá, picareta, facão e espátula;
- Fogareiro a gás portátil, parafina e pincel, para isolar o bloco;
- Tecido e filme de PVC, para cobrir e isolar o bloco;
- Trena.

Após a escolha do local, entre a zona de aplicação da dessorção térmica e a placa de informação sobre o experimento (próximo ao antigo ponto de sondagem S-03), foram realizados os procedimentos de abertura de trincheira, ou vala, com tamanho e profundidade suficientes para que o bloco de solo desejado, de dimensões pré-determinadas, pudesse ser extraído sem ser perturbado. Para isso, foram utilizadas ferramentas manuais como enxada, pá e picareta, conforme mostrado nas Figuras 4.38 a 4.41.



Figura 4.38 – Abertura de trincheira (1)



Figura 4.39 – Abertura de trincheira (2)



Figura 4.40 – Abertura de trincheira (3)

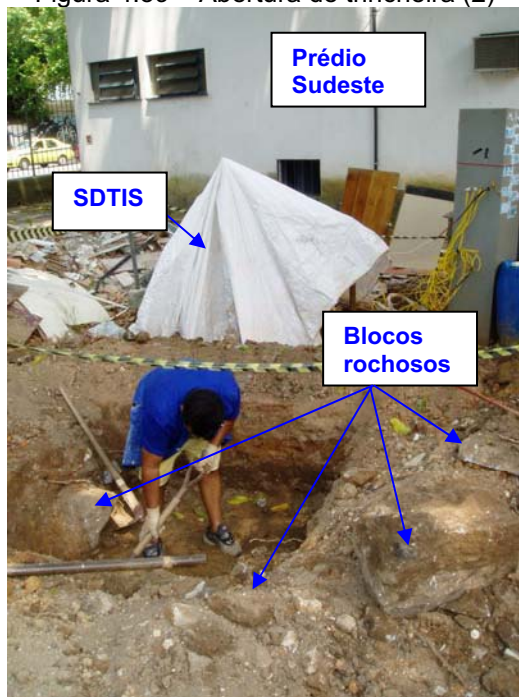


Figura 4.41 – Abertura de trincheira (4)

Porém, pode ocorrer da escolha do local de extração não ser muito boa, como foi no presente caso, uma vez que foram encontrados diversos blocos rochosos, pedregulhos, cascalhos e outros materiais duros e de grande volume, conforme se observa nas Figuras 4.42 e 4.43, o que resultou em algumas dificuldades durante a realização do serviço.

O fato foi que os resultados das caracterizações feitas a partir das amostras obtidas com as sondagens somente foram analisados após o dia da extração do bloco. Caso isto fosse realizado antes, este problema poderia ser previsto, já que o local escolhido para extração foi muito próximo ao da sondagem 03 (S-03).

Conforme será mostrado mais adiante, este local apresentava uma porcentagem substancial de pedregulhos, indicando grandes chances de se encontrarem dificuldades para se abrir uma trincheira no local com instrumentos manuais.

Por outro lado, grande parte da área do CE-01 já estava comprometida devido ao seu uso para depósito de entulhos, como mencionado anteriormente, e conforme pôde ser visto nas Figuras 4.38 a 4.40.

Logo, com a disponibilidade física do local, a única opção foi tentar encontrar um local vizinho relativamente mais favorável, tendo como conseqüência a abertura de uma trincheira maior do que o esperado.

Após a primeira fase do serviço, e alcançada a profundidade pré-determinada, modelou-se, no local, um bloco de solo do tamanho desejado (um cubo de, aproximadamente, 30 cm de aresta) conforme a seqüência mostrada pelas Figuras 4.42, 4.43 e 4.44. Para esta tarefa foram utilizados, principalmente, o facão e a espátula.



Figura 4.42 – Modelagem do bloco (1)



Figura 4.43 – Modelagem do bloco (2)



Figura 4.44 – Bloco de solo moldado



Figura 4.45 – Isolamento do bloco

As Figuras 4.45 e 4.46 mostram o isolamento do bloco feito com filme de PVC e parafina derretida, após esta ter sido fervida em um fogareiro a gás portátil.



Figura 4.46 – Isolamento do bloco



Figura 4.47 – Vista geral do serviço de extração do bloco de solo

Por fim, retirou-se cuidadosamente o bloco de solo do seu local de origem, para transportá-lo ao laboratório.

A Figura 4.47, mostrada acima, dá uma idéia geral sobre a dificuldade desta última tarefa, que finalizou o serviço, tendo em vista o peso, as dimensões do bloco, que corresponderam a 28cm de altura e a uma base de 33x32cm, e as dimensões da trincheira.

Após o seu transporte, ele foi devidamente acondicionado na câmara úmida do **LGMA/PUC-Rio**.

### 4.3.

#### Ensaio de Laboratório com o solo do CE-01

Com as amostras deformadas, obtidas durante os procedimentos de sondagem, e indeformadas, a partir da extração do bloco de solo, conforme descrições anteriores, procederam-se os ensaios de laboratório.

#### 4.3.1.

##### Caracterização

Os ensaios de caracterização foram realizados com amostras obtidas de 0,5 em 0,5m a partir das sondagens S-01, S-02 e S-03 e compreenderam a determinação da granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação), dos limites de liquidez – LL e de plasticidade – LP, e da densidade relativa dos grãos –  $G_{ds}$ .

As rotinas empregadas seguiram, basicamente, as metodologias preconizadas pelas **Normas Brasileiras – NBR**, listadas a seguir:

- NBR 7181/84 (Análise granulométrica);
- NBR 6508/84 (Densidade dos grãos);
- NBR 6459/84 (Limite de liquidez);
- NBR 7180/84 (Limite de plasticidade).

Nos ensaios de sedimentação empregou-se como defloculante o hexametáfosfato de sódio. Em todos os casos as amostras foram previamente secas ao ar, homogeneizadas e destorroadas. Para a execução dos ensaios de densidade dos grãos e de limites de consistência utilizaram-se amostras passantes na peneira nº 40 ( $\Phi = 0.42\text{mm}$ ) da **ASTM – American Society for Testing and Materials**. Todas as secagens em estufa foram realizadas sob temperatura de 110°C, enquanto as pesagens requeridas foram efetuadas em balanças eletrônicas com precisão de 0,01g.

Os resultados dos ensaios de caracterização encontram-se resumidos na Tabela 4.5, a seguir. O índice de plasticidade – IP corresponde à diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. As porcentagens de pedregulho, areia, silte e argila indicadas correspondem à classificação definida pela **ABNT** –

**Associação Brasileira de Normas Técnicas.** A classificação dos solos é baseada no **SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos.**

Tabela 4.5 – Resumo dos Resultados dos Ensaio de Caracterização

| Sond. | Prof. (m) | Limites de Atterberg (%) |      |      | G <sub>ds</sub> | Granulometria (%) |       |       |        | SUCS |
|-------|-----------|--------------------------|------|------|-----------------|-------------------|-------|-------|--------|------|
|       |           | LL                       | LP   | IP   |                 | Pedregulho        | Areia | Silte | Argila |      |
| S-01  | 0 – 0,5   | 27,9                     | 15,6 | 12,3 | 2,62            | 3,0               | 63,1  | 16,8  | 17,1   | SC   |
|       | 0,5 – 1,0 | 26,9                     | 14,5 | 12,4 | 2,66            | 4,6               | 62,6  | 16,0  | 16,8   | SC   |
|       | 1,0 – 1,5 | 25,3                     | 13,9 | 11,4 | 2,65            | 11,7              | 68,3  | 9,2   | 10,9   | SC   |
|       | 1,5 – 2,0 | 45,3                     | 38,9 | 6,5  | 2,69            | 17,2              | 59,1  | 5,7   | 18,0   | SM   |
| S-02  | 0 – 0,5   | 29,6                     | 19,0 | 10,6 | 2,64            | 1,6               | 58,0  | 22,1  | 18,3   | SC   |
|       | 0,5 – 1,0 | 33,6                     | 20,2 | 13,4 | 2,64            | 9,7               | 59,8  | 16,4  | 14,0   | SC   |
|       | 1,0 – 1,5 | 37,0                     | 24,0 | 13,0 | 2,65            | 7,1               | 61,0  | 9,6   | 22,3   | SC   |
|       | 1,5 – 2,0 | 26,9                     | 16,6 | 10,3 | 2,65            | 8,1               | 71,4  | 7,0   | 13,5   | SC   |
| S-03  | 0 – 0,5   | 39,3                     | 26,1 | 13,2 | 2,68            | 12,1              | 55,4  | 16,5  | 16,1   | SM   |
|       | 0,5 – 1,0 | 35,7                     | 14,5 | 21,2 | 2,65            | 31,0              | 46,2  | 10,8  | 12,0   | SC   |
|       | 1,0 – 1,5 | 35,7                     | 19,1 | 16,6 | 2,65            | 3,4               | 64,3  | 6,9   | 25,4   | SC   |
|       | 1,5 – 2,0 | 26,3                     | 14,5 | 11,8 | 2,65            | 5,8               | 70,8  | 8,8   | 14,6   | SC   |

Com relação aos resultados obtidos, observa-se que a densidade relativa dos grãos é similar dentre todas as amostras, se encontrando sempre por volta de 2,65, com raras exceções.

Os índices de plasticidade também se assemelham muito, estando todos por volta de 12,7%, com apenas duas exceções, indicando um solo pouco plástico e com baixo percentual de finos.

Já os limites de liquidez e de plasticidade se mostraram relativamente diferentes, como era de se esperar após a identificação táctil-visual dos materiais durante a campanha de sondagens.

As Figuras 4.40 e 4.41, mostrando as mais importantes curvas de distribuição granulométrica obtidas, estão apresentadas a seguir. Devido ao posicionamento do bastonete, cuja base se encontrava na cota 0,80m, estas curvas estão representadas pelos dois primeiros extratos do solo, ou seja, de 0,0 a 0,5m e de 0,5 a 1,0m.

Demais curvas granulométricas, apresentadas individualmente, estão incluídas no Anexo I, ao final do presente trabalho.

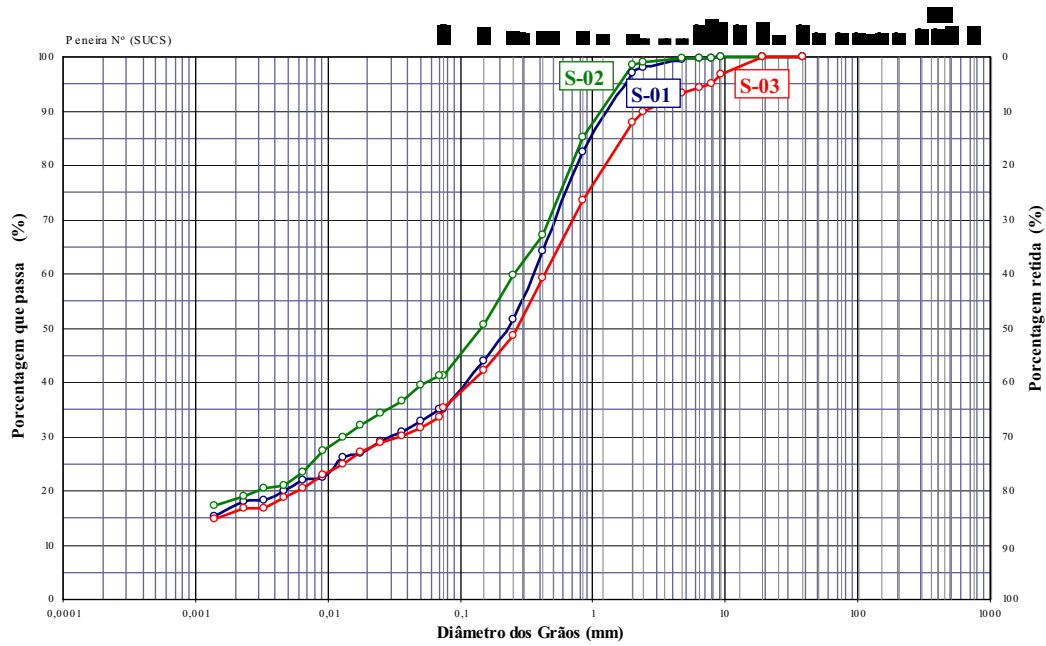


Figura 4.48 – Curvas granulométricas das sondagens 01, 02 e 03, sob profundidade de 0 a 0,5m

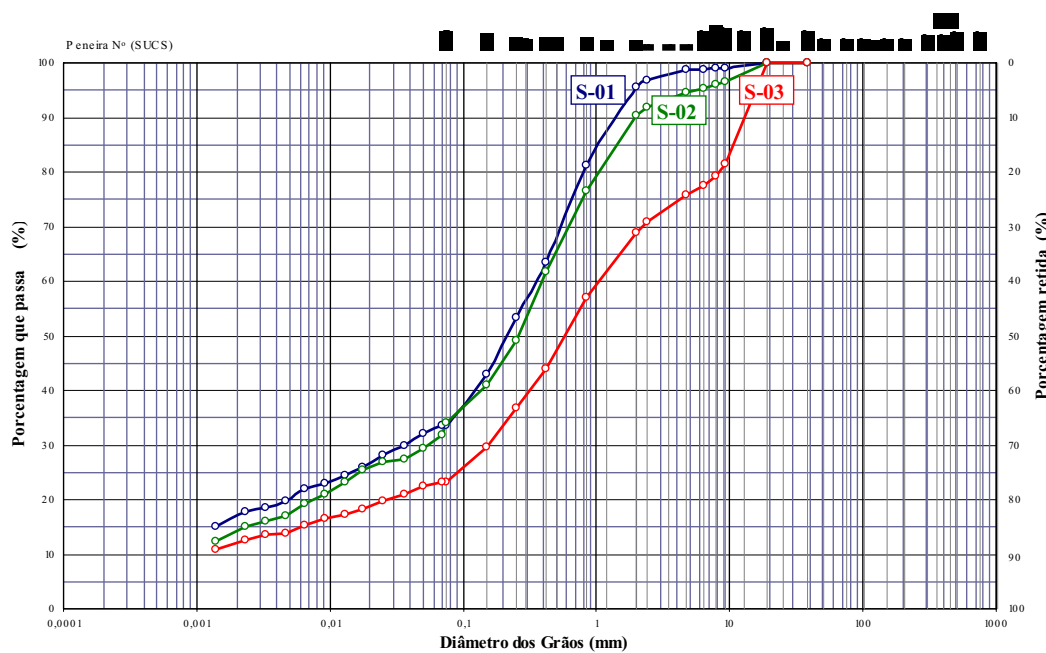


Figura 4.49 – Curvas granulométricas das sondagens 01, 02 e 03, sob profundidade de 0,5 a 1,0m

As curvas granulométricas mostradas nas Figuras 4.38 e 4.39 indicam uma certa disparidade entre o solo do local da sondagem 03 e as demais no que diz respeito, principalmente, à presença de material granular de diâmetro grosseiro, como os pedregulhos. Inclusive, observa-se na Tabela 4.5 que a faixa de solo situada entre 0,5 e 1,0m de profundidade é a que possui maior porcentagem



deste material, indicando exatamente o que foi encontrado anteriormente, durante a extração de bloco indeformado.

De qualquer forma, a grande maioria das faixas de solo pode ser classificada como areno-argilosa, de acordo com o **SUCS**.

E, ao se traçar um paralelo entre o perfil do S-03 e a área de experimentos, devido a sua maior proximidade, pode-se considerar que o bastonete e os termopares inferiores se situavam em um solo areno-argiloso.

Logo, um dos motivos da baixa transmissão de calor, apenas levando em conta a sua classificação granular, pode ser devido à porcentagem de finos no material.

#### 4.3.2. Análises de Difração de Raios-X

O material passante na peneira #200, resultante dos ensaios de caracterização, foram secos ao ar e destinados às análises de difração de raios-x. De forma a evitar que fossem realizadas análises desnecessárias, selecionou-se apenas as amostras correspondentes às profundidades entre 0 e 0,5 m, e entre 0,5 e 1,0 m, todas areno-argilosas, correspondendo à provável faixa de influência do aquecimento provocado pelo bastonete térmico no solo do CE-01.

Seus gráficos correspondentes estão mostrados no Anexo III do presente trabalho. E, de acordo com as distâncias interplanares basais determinadas, têm-se os seguintes argilominerais e minerais em cada faixa de solo (Tabela 4.6):

Tabela 4.6 – Ensaios de Difração de raios-x

| Sond. | Prof. (m) | Argilominerais    | Minerais                  |
|-------|-----------|-------------------|---------------------------|
| S-01  | 0,5 – 1,0 | n/d               | Quartzo e Feldspato       |
| S-02  | 0 – 0,5   | Ilita e Caulinita | Quartzo                   |
|       | 0,5 – 1,0 | Ilita e Caulinita | Quartzo e Feldspato       |
| S-03  | 0 – 0,5   | Caulinita         | Mica, Quartzo e Feldspato |
|       | 0,5 – 1,0 | Ilita e Caulinita | Quartzo e Feldspato       |

De acordo com a tabela acima, as análises de difração só observaram a presença de 02 argilominerais neste solo.

Considerando as temperaturas máximas dos 04 pontos pré-determinados influenciados pelo bastonete térmico no CE-01 (Tabela 4.4), e de acordo com as explicações de Antunes (2005) colocadas no segundo capítulo deste trabalho, pode-se considerar que os argilomineirais aquecidos só devem ter perdido sua água adsorvida e que, portanto, a sua água estrutural (oxidrilas) deve ter permanecido inalterada.

Já com relação aos minerais, nada ocorreu em função da aplicação do bastonete térmico.

#### 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 – $S$ ’**

O ensaio para determinação do peso específico total ( $\gamma_t$ ) foi realizado a partir do bloco indeformado extraído do CE-01.

O procedimento foi o seguinte:

1. Extração de uma sub-amostra de solo cravando-se um anel de dimensões e massa conhecidas no bloco indeformado;
2. Determinação do peso do conjunto ‘anel + solo’;
3. Determinação do peso específico total a partir de relações massa-volume-aceleração da gravidade;

Um vez determinado o peso específico total do solo, e obtida a sua umidade média natural, pode-se, a partir de correlações, determinar o peso específico seco ( $\gamma_d$ ).

A umidade média do bloco de solo foi obtida com 03 (três) sub-amostras colocadas em estufa sob temperatura de 110°C por 24 horas. O valor foi de 14,76%, ainda inferior ao valor obtido há mais ou menos 2 meses antes.

O índice de vazios ( $e$ ) e o grau de saturação ( $S$ ) também podem ser obtidos de forma teórica a partir de correlações utilizando os índices físicos já determinados.

Logo, em unidades do **Sistema Internacional – SI**, o Quadro 4.1 a seguir mostra que:

|                                  |   |   |
|----------------------------------|---|---|
| $d_{anel} = 5,5\text{cm}$        | } | $V_{anel} = \frac{\pi \cdot (d_{anel})^2}{4} \cdot h_{anel} = 46,80\text{cm}^3$ |
| $h_{anel} = 1,97\text{cm}$       |   | $\rho_t = \frac{m_{solo}}{V_{anel}} = 1,4464\text{g/cm}^3$                      |
| $m_{anel} = 35,03\text{g}$       |   | $\gamma_t = \rho_t \cdot g = 14,19\text{kN/m}^3$                                |
| $m_{anel+solo} = 102,72\text{g}$ |   | $\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w_{bloco}} = 12,37\text{kN/m}^3$                |
| $g = 9,81\text{m/s}^2$           |   | $e = \frac{\gamma_t}{\gamma_d} - 1 = 1,15$                                      |
| $w_{bloco} = 14,76\%$            |   | $S = \frac{\gamma_t \cdot w}{e \cdot \gamma_w} = 0,1825 = 18,25\%$              |

Quadro 4.1– Determinação dos índices físicos

Os índices físicos determinados no quadro acima correspondem a uma profundidade que pode variar entre de 50 e 80cm de solo, ou seja, a principal zona de atuação do bastonete térmico, no solo daquela região do CE-01, ao se traçar um paralelo do local de extração do bloco e o local de aplicação do bastonete.

Com estes dados, observa-se claramente o baixo grau de saturação do solo, que está associado à sua baixa umidade. Segundo Duarte (2004), o grau de saturação e a umidade influenciam diretamente na transmissão de calor no solo

e, no caso do CE-01, influenciaram negativamente, conforme mostrado nos resultados, confirmando as hipóteses levantadas anteriormente.

Para possíveis modelagens numéricas relacionadas ao experimento, estes valores são válidos para utilização.

#### 4.3.4. Propriedades Térmicas

Os ensaios para determinação das propriedades térmicas do solo do CE-01 foram realizados diretamente no bloco de solo indeformado.

O objetivo principal destes ensaios foi o de caracterizar termicamente o solo do CE-01. Outros objetivos paralelos foram o de se tentar obter, de forma geral, alguma relação entre possíveis heterogeneidade e anisotropia e a transmissão de calor no solo e, por fim, fornecer dados para uma possível modelagem numérica do problema estudado.

O instrumento utilizado para se efetuar as leituras é um medidor portátil ‘**Thermal Properties Analysys**’<sup>®</sup> (Analisador de Propriedades Térmicas), do tipo KD2. O aparelho, mostrado na Figura 4.50 a seguir, é constituído por uma sonda de 60mm de comprimento e 1,28mm de diâmetro que é conectada a um sistema digital contendo um visor (*display*) e dois botões funcionais. Nele são medidas 04 (quatro) grandezas térmicas, devidamente explanadas no Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica da presente dissertação:

- Condutividade térmica  $\lambda_t$  [W/m°C];
- Resistividade térmica  $R_t$  [m°C/W];
- Difusividade térmica  $D_t$  [mm<sup>2</sup>/s];
- Temperatura [°C].



Figura 4.50 – Instrumento 'Thermal Properties Analysis', do tipo KD2

De acordo com o seu manual de instruções, tanto a condutividade quanto a resistividade térmica podem fornecer valores com até 5% de erro. As escalas de ambos variam entre 0,02 a 2,0 W/m°C, e de 0,5 a 10 m°C/W, respectivamente.

O nível de temperatura ambiente para operação, sem haver qualquer interferência relacionada, vai de -20 a 60°C.

O aparelho funciona com uma bateria de 3,0 Volts e é certificado pela 'Certificate Quality Assurance' (Certificado de Qualidade).

O seu funcionamento é simples. Basta ligá-lo, inserir a sonda no solo e aguardar que o sistema faça a leitura e forneça os resultados. Por questão de confiabilidade, recomenda-se executar no mínimo três leituras para se obter uma média aritmética dos valores determinados. Porém, a vantagem de serem realizadas pelo menos cinco é que, caso sejam percebidas grandes discrepâncias entre algumas delas, pode-se simplesmente cortá-las da amostragem (tal método foi utilizado no presente trabalho, conforme será mostrado mais adiante). Finalizada cada leitura, aguarda-se cerca de 5 minutos para que o sistema seja zerado e reinicializado. A partir daí, pode-se fazer uma nova leitura, seja no mesmo local de antes ou em um novo furo.

No caso do solo oferecer alguma resistência à introdução da sonda, utiliza-se uma mini-perfuradora, movida à manivela, para realizar um pré-furo. O diâmetro de sua broca é um pouco menor que o da sonda, o que já facilita a sua introdução e não prejudica possíveis mensurações.

#### 4.3.4.1.

##### **Procedimentos adotados**

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios para determinação dos parâmetros térmicos foram realizados no próprio bloco de solo indeformado. O procedimento técnico adotado foi, primeiramente, o de escolher três faces do bloco (cúbico) ortogonais entre si. Em seguida, marcar alguns pontos arbitrários em cada uma das faces escolhidas para, então, inserir a sonda e realizar as leituras.

Um sério problema observado foi que, quando o bloco de solo foi aberto (retirada parcial do tecido, parafina e filme de pvc que o protegiam), havia algumas rachaduras diagonais (a principal tinha aproximadamente 45° em relação à horizontal) em uma de suas faces, conforme mostra a Figura 4.51 a seguir, indicando que ele havia sofrido deformação e estava a ponto de romper. Há duas possíveis causas para isso: a primeira, e bastante provável, é que a cravação do anel para determinação dos parâmetros físicos, citada anteriormente, pode ter sido feita com uma força relativamente alta e capaz de provocar estas rachaduras; a segunda é que ele pode ter sido mal transportado do CE-01 ao **LGMA/PUC-Rio**, o que é pouco provável, pois todo este procedimento foi acompanhado cuidadosamente.

Associado a isto está o fato do solo ser predominantemente arenoso e possuir baixo teor de umidade (**14,76%**), determinado assim que ele foi aberto dentro da “câmara úmida”, no **LGMA/PUC-Rio**. Lembrando apenas que, antes do primeiro ensaio de dessorção térmica no CE-01, esta umidade encontrava-se em 16,24%. Logo, pode-se afirmar ainda que a sua coesão aparente era muito baixa.

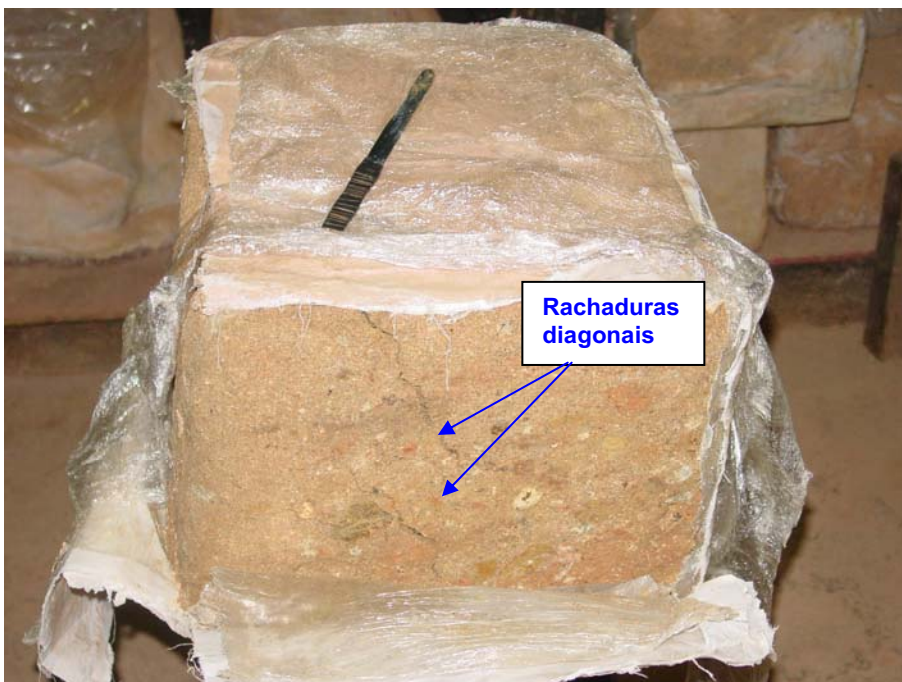


Figura 4.51 – Bloco de solo indeformado aberto, apresentando rachaduras diagonais

Mesmo com estes problemas, os ensaios térmicos foram realizados no bloco de solo. Quase ao final das aferições, conforme será mostrado posteriormente, o solo se rompeu.

A Figura 4.52 abaixo esquematiza e enumera os pontos escolhidos, arbitrariamente, em cada face do bloco, para introdução da sonda:

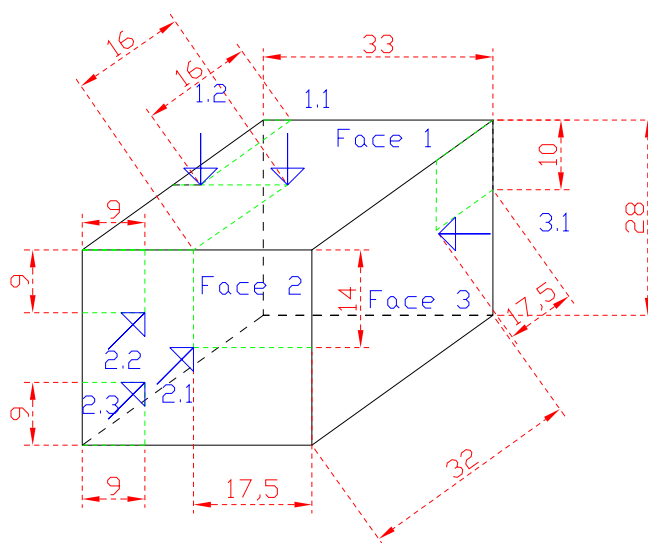


Figura 4.52 – Posicionamento dos pontos no bloco de solo (dimensões em centímetros)

As rachaduras foram observadas principalmente na face 03 do bloco, que acabou rompendo na quina superior entre as faces 2 e 3, abrangendo uma parte da face 1, conforme será detalhado mais adiante.

A seguir, são mostradas as Figuras 4.53 a 4.56, em seqüência, relativas aos procedimentos adotados para determinação dos parâmetros térmicos e onde são apresentados alguns dos pontos amostrados:



Figura 4.53 – Ensaio em andamento para determinação dos parâmetros térmicos na face 01 do bloco, ponto 1.1



Figura 4.54 – Ensaio em andamento na face 02 do bloco, ponto 2.1

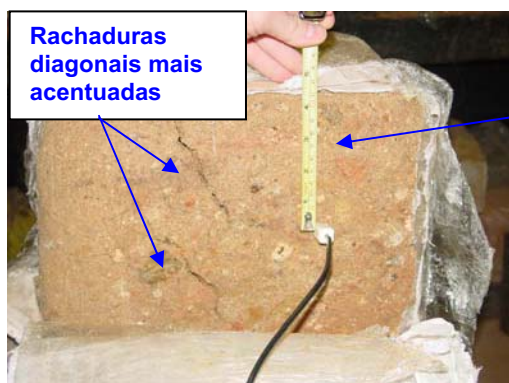


Figura 4.55 – Ensaio em andamento na face 03 do bloco (rachaduras mais acentuadas), ponto 3.1



Figura 4.56 – Ensaio em andamento na face 03 do bloco (localização do ponto 3.1)

Os resultados obtidos para cada ponto estão mostrados nas Tabelas 4.7 a 4.12, que se seguem:



Tabela 4.7 – Parâmetros Térmicos do Ponto 1.1

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | 05   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,31 | 0,49 | 0,39 | 0,47 | 0,49 | <b>0,48</b> |
| R (m°C/W)              | 3,24 | 2,04 | 2,56 | 2,12 | 2,02 | <b>2,06</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,09 | 0,12 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | <b>0,12</b> |
| T (°C)                 | 22,9 | 22,8 | 22,7 | 22,7 | 22,7 | <b>22,7</b> |

Tabela 4.8 – Parâmetros Térmicos do Ponto 1.2

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | 05   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,74 | 0,76 | 0,79 | 0,78 | 0,77 | <b>0,78</b> |
| R (m°C/W)              | 1,34 | 1,30 | 1,26 | 1,28 | 1,28 | <b>1,28</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,17 | 0,17 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | <b>0,18</b> |
| T (°C)                 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | <b>23,4</b> |

Tabela 4.9 – Parâmetros Térmicos do Ponto 2.1

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | 05   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,68 | 0,70 | 0,68 | 0,67 | 0,66 | <b>0,67</b> |
| R (m°C/W)              | 1,46 | 1,42 | 1,46 | 1,50 | 1,50 | <b>1,48</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,19 | 0,21 | 0,20 | 0,19 | 0,20 | <b>0,20</b> |
| T (°C)                 | 22,8 | 22,7 | 22,6 | 22,5 | 22,4 | <b>22,6</b> |

Tabela 4.10 – Parâmetros Térmicos do Ponto 2.2

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | 05   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,89 | 0,87 | <b>0,87</b> |
| R (m°C/W)              | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,12 | 1,14 | <b>1,14</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,26 | 0,25 | <b>0,25</b> |
| T (°C)                 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | <b>23,3</b> |

Tabela 4.11 – Parâmetros Térmicos do Ponto 2.3

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | 05 | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|----|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,23 | 0,22 | 0,20 | 0,19 | -  | <b>0,22</b> |
| R (m°C/W)              | 4,28 | 4,58 | 5,06 | 5,40 | -  | <b>4,64</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,10 | 0,10 | 0,09 | 0,10 | -  | <b>0,10</b> |
| T (°C)                 | 23,1 | 23,1 | 23,1 | 23,1 | -  | <b>23,1</b> |

Tabela 4.12 – Parâmetros Térmicos do Ponto 3.1

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | 05   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,89 | 0,93 | 0,92 | 0,91 | 0,92 | <b>0,92</b> |
| R (m°C/W)              | 1,12 | 1,06 | 1,08 | 1,10 | 1,08 | <b>1,08</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,21 | 0,23 | 0,21 | 0,21 | 0,23 | <b>0,22</b> |
| T (°C)                 | 22,9 | 22,8 | 22,7 | 22,7 | 22,8 | <b>22,8</b> |

Os valores mostrados nas tabelas acima não mostraram nenhuma relação de similaridade entre eles, mesmo levando em consideração os pontos situados na mesma face. Como causa de suas disparidades, foram feitas algumas suposições:

- O solo do CE-01 apresenta-se altamente anisotrópico e com poros mal distribuídos:

De certa forma, esta pode ser considerada a principal explicação para os valores obtidos, uma vez que nem os pontos situados na mesma face se assemelharam em alguns dos parâmetros térmicos. O fato dos poros de um solo areno-argiloso com baixa umidade (cerca de 14%) estarem mal distribuídos significa que, nos locais onde eles se encontram com maior frequência, há uma maior presença de ar, o que exerce uma influência negativa na transmissão de calor nesta região. Os pontos 1.1 e 2.3, por exemplo, devem estar com uma quantidade maior de poros em sua “vizinhança” do que os demais.

- O solo do CE-01 apresenta-se com uma má distribuição granulométrica:

Tal suposição pode ser confirmada analisando-se os cinco fatores básicos que, associadas à compactação do material, influenciam os valores de condutividade térmica, todos mostrados no Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica do presente trabalho: mineralogia, peso específico, distribuição granulométrica, temperatura e grau de saturação.

De acordo com o local de onde este bloco foi extraído, a mineralogia deste solo é, basicamente, a mesma, o que descarta um dos fatores.

A temperatura do solo no momento dos ensaios, conforme mostrado nas tabelas, tem variação máxima de 0,8°C, o que pode ser considerada baixa.

Considerando que o bloco de solo possui umidade igual em todos os seus pontos, o que é mais ou menos razoável, o peso específico e o grau de saturação praticamente não se alteram em todo o bloco.

Com isso, resta a distribuição granulométrica, sobre a qual se pode supor uma má distribuição de grumos de argila no bloco de solo, por exemplo. Conforme já explicado anteriormente, quanto mais argiloso for o solo, menor

será a sua transmissão de calor por condução. Logo, os pontos 2.2 e 3.1 poderiam ter uma menor concentração de argilominerais do que os demais.

Estas foram, portanto, as principais explicações encontradas para a grande disparidade dos valores obtidos.

#### 4.4. Ensaio de Campo no CE-02

Diante da impossibilidade em se continuarem os experimentos na **EMBRAPA Solos**, foi necessária a obtenção de um outro local. Felizmente, a solução encontrada foi dentro da **PUC-Rio**, próximo à sua entrada principal (acesso pela Rua Padre Leonel Franca), nas dependências do **Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente – LGMA**, o qual forneceu toda a infra-estrutura necessária para realização dos ensaios. Este local foi denominado de CE-02.

Uma das vantagens do local é que o novo sistema de dessorção térmica *in situ* poderia utilizar a energia elétrica do **LGMA**, onde existia inclusive uma tomada 220 Volts possuindo um medidor próprio de consumo (“relógio”). Logo, o que precisava ser feito era uma extensão cujo comprimento chegasse até o CE-02.

Algumas fotografias da área estão mostradas nas Figuras 4.57 a 4.60, a seguir:



Figura 4.57 – Vista da CE-02, próxima à entrada principal da **PUC-Rio** (1)



Figura 4.58 – Vista da CE-02 (2)



Figura 4.59 – Local dos experimentos (1)



Figura 4.60 – Local dos experimentos, com laje de concreto (2)

Conforme se pode observar nas figuras acima e nas seguintes, o piso do CE-02 possuía uma camada de concreto, a qual deveria ser vencida para se chegar ao solo do local. Para isso, foi utilizada uma ‘britadeira’ manual, pertencente ao **LGMA**, conforme mostrado nas Figuras 4.61 a 4.63 a seguir.

A área escolhida tinha o formato de uma piscina e, muito provavelmente, havia sido utilizada em alguns dos inúmeros estudos de mestrado e doutorado realizados no **LGMA**. Possuindo cerca de 5,25 x 1,12 metros de área, e 0,60 metros de altura, o local deveria, a princípio, servir como campo experimental para a presente dissertação.



Figura 4.61 – Perfuração da laje de concreto com a britadeira

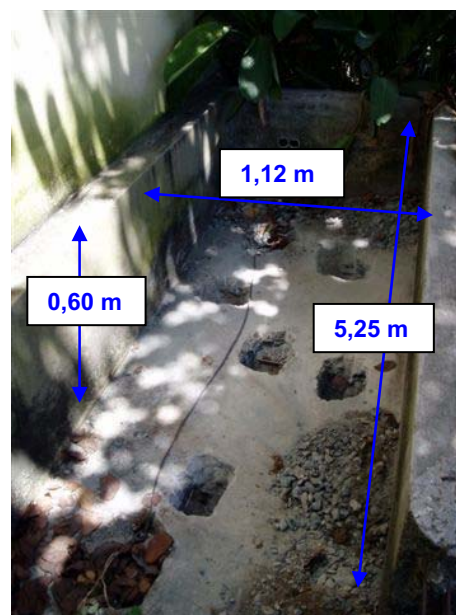


Figura 4.62 – Laje de concreto perfurada

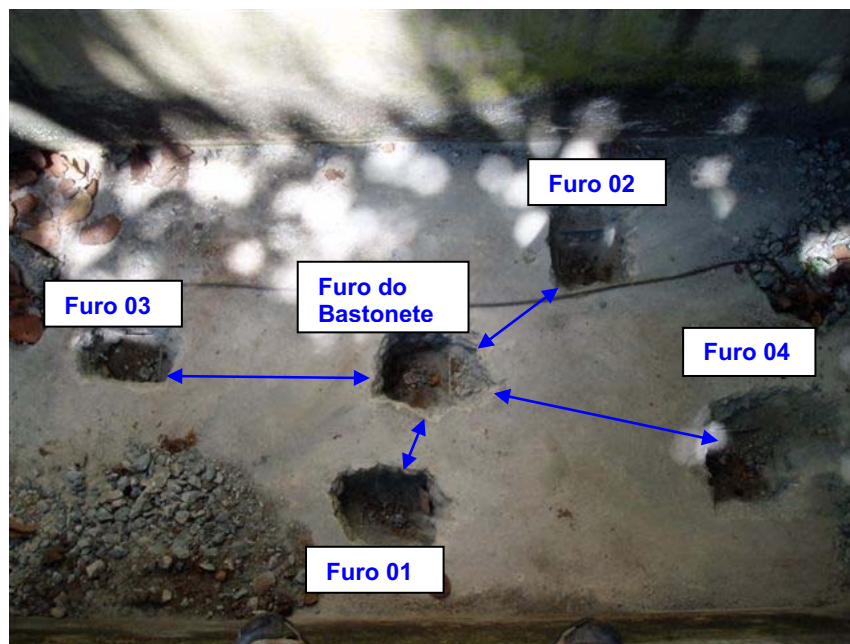


Figura 4.63 – Furos executados

Os pontos de perfuração foram demarcados previamente, pois eles já se tornariam os pontos de locação do bastonete e das sondas medidoras de temperatura.

A Tabela 4.13 abaixo mostra a distância dos demais furos em relação ao furo do bastonete.

Tabela 4.13 – Posicionamento dos furos em relação ao furo do bastonete térmico

| Furos | Distância em relação ao bastonete |
|-------|-----------------------------------|
| 01    | 27 cm                             |
| 02    | 44 cm                             |
| 03    | 68 cm                             |
| 04    | 75 cm                             |

Como se pode observar, apesar de se desejar que os furos ficassem em distâncias exatamente iguais às do CE-01, isto não foi possível devido à grande imprecisão e dificuldade de manuseio da 'britadeira'. Além disso, a laje de concreto possuía armadura nas direções longitudinal e transversal, o que também dificultou o trabalho.

#### 4.4.1. Sondagens e medições do nível d'água no CE-02

Para esta nova campanha de sondagens, visto que o trado utilizado anteriormente tinha sido permanentemente danificado, foi necessário solicitar a fabricação de um novo instrumento que possuísse as mesmas 2 polegadas de diâmetro correspondentes às dimensões do bastonete e das sondas medidoras de temperatura.

Logo, após a abertura de furos na laje de concreto armado, foram executadas as sondagens no solo com amostragem de 0,5 em 0,5 metro, mesmo procedimento adotado no CE-01. A identificação de cada uma delas, tal como o seu posicionamento em relação ao bastonete, seguiu a nomenclatura da Tabela 4.13, sendo então S-01, S-02, S-03 e S-04.

Durante a amostragem de material, observou-se táctil-visualmente que eles eram predominantemente arenosos.

Inicialmente, buscava-se chegar a uma profundidade de aproximadamente 2,0m, porém, a cerca de 1,50m, o trado mecânico encontrou um material extremamente duro resistente, inclusive com reflexos notados na ponta do trado. Aparentemente, tratava-se de uma rocha, já que os outros pontos perfurados também detectaram o mesmo problema. Outra hipótese seria a presença de um matacão, ou até da fundação do próprio **LGMA** (sapata corrida, de acordo com relatos de funcionários mais antigos), porém esta terceira opção era menos provável devido à distância dos pontos à parede do prédio. A Figura 4.64 abaixo ilustra a realização dos serviços.



Figura 4.64 – Sondagens no CE-02

Com relação ao nível d'água, este não foi encontrado durante a campanha de sondagens. No entanto, tinha-se uma boa noção de sua posição, uma vez que o Rio Rainha situa-se a cerca de 4 metros do CE-02, conforme já mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Em relação ao nível do terreno (asfalto), sua profundidade é de aproximadamente 3,5m.

#### **4.4.2. Instalação e montagem do novo SDTIS no CE-02**

Após os furos terem sido executados, efetuou-se o transporte de toda a instrumentação, aparelhagem para o CE-02. A Figura 4.65 mostra como ficou o CE-02, detalhando inclusive o isolamento da área por questões de segurança.



Figura 4.65 – Fotografia do CE-02, já com toda a aparelhagem do novo SDTIS

Uma extensão foi fabricada, de forma a conduzir a energia elétrica para o local e, assim, alimentar o sistema. Porém, a tomada citada anteriormente (com medidor de consumo próprio) não estava mais funcionando, o que implicou na necessidade do uso de uma outra tomada do **LGMA**. Em função disso, não seria mais possível medir o consumo elétrico do novo sistema de dessorção térmica *in situ*, conforme desejado anteriormente.

No momento em que os instrumentos – bastonete térmico e as sondas térmicas – foram instalados nos furos, de acordo com a Figura 4.66 a seguir, percebeu-se que o trado utilizado havia sido fabricado com um diâmetro superior às duas polegadas para as quais ele foi projetado, o que acarretou em uma folga de cerca de meia polegada radial para cada furo em relação ao instrumento. Infelizmente, isto só foi percebido após todos os furos terem sido executados.





Figura 4.66 – Instalação do sistema de dessorção térmica *in situ*

Com isso, restaram duas alternativas: a primeira seria a de continuar com os instrumentos nestes furos, porém utilizando algum tipo de material que preenchesse a folga existente em cada um deles, de forma a garantir os seus contatos com a parede do solo, evitando ao máximo a presença de vazios; a segunda seria a de executar novos furos em outro local, já com o diâmetro apropriado.

A princípio, escolheu-se a primeira opção.

Com relação ao preenchimento, inicialmente pensou-se em um material cuja consistência fosse semelhante à de uma lama (pastosa, nem tão líquida e nem tão sólida), de forma a preencher as folgas dos furos com certa facilidade e, paralelamente, não deixar espaços vazios que facilitariam a presença de ar e, conseqüentemente, dificultariam o fluxo de calor.

Após algumas consultas com de Campos (2006) e Araruna (2006), decidiu-se que o caulim misturado, empiricamente, com alguma proporção de água, poderia resultar no tipo material desejado. O caulim citado seria o que estava sendo

utilizado por Pessoa (2006), no próprio **LGMA**, e que já tinha todos os seus parâmetros físicos determinados.

Inicialmente, decidiu-se que a massa de água seria correspondente a 1,5 vezes o limite de liquidez do caulim, ou seja, o teor de umidade da mistura água-caulim deveria ser igual a 1,5 vezes este limite de liquidez. Como o teor de umidade é a divisão entre a massa de água e a massa de sólidos, saber-se-ia quantos litros de água corresponderiam a uma massa seca de caulim e, assim, seria feita a mistura. As equações abaixo literalizam o problema:

$$W_{H_2O+caulim} = 1,5 \times LL_{caulim} \quad \text{Equação 4.1}$$

$$P_{H_2O} = P_s \times W_{mistura} \quad \text{Equação 4.1}$$

O teor de umidade e o limite de liquidez do caulim, determinados por Pessoa (2006), correspondiam aos valores de 1,47% e 72,8%, respectivamente. Sendo assim, o teor de umidade da mistura deveria ser de 109,20%. Logo, para cada 1kg de caulim seco, deveriam ser utilizados 1,09kg de água.

Inicialmente, pegou-se 5kg de massa seca de caulim para 5,46kg de água, utilizando-se uma balança de baixa precisão, disponível no **LGMA**. Ambos os materiais foram homogeneizados em um balde de plástico com o auxílio de um bastão de alumínio.

No entanto, tal mistura ficou com aparência extremamente líquida, o que não serviria para solucionar o problema de preenchimento dos furos, uma vez que se vislumbrava um material com consistência semelhante a de uma lama.

Então foram adicionados mais 500g de caulim, o que também não foram suficientes.

Sucessivamente, foram sendo acrescentadas quantidades de caulim, de 500 em 500g, de forma a se tentar obter a consistência desejada.

Somente após mais 1kg, esta consistência foi atingida. Ou seja, a massa de caulim necessária para transformar 5,46 kg de água em lama era de 6,5kg.

A Figura 4.67 abaixo mostra o resultado final desta lama e seu local de preparo:



Figura 4.67 – Mistura caulim-água

Fazendo-se uma retro-análise, isto significou um teor de umidade de 84,62% para a mistura e, conseqüentemente, um fator multiplicador de 1,16, ao invés dos 1,5 propostos antes.

Imediatamente após o preparo e homogeneização da mistura, foram determinadas as suas propriedades térmicas de acordo com a mesma metodologia utilizada para o material proveniente do CE-01, ou seja, utilizando-se uma sonda térmica com leituras digitais, conforme ilustra a Figura 4.68 abaixo. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 4.14 a seguir. Foram realizadas 04 medições, sendo que antes de cada uma delas era executado um novo processo de homogeneização.



Figura 4.68 – Medição dos parâmetros térmicos da mistura caulim-água

Tabela 4.14 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 1,28 | 0,78 | 0,80 | 0,81 | <b>0,80</b> |
| R (m°C/W)              | 0,78 | 1,28 | 1,24 | 1,22 | <b>1,25</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,66 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | <b>0,15</b> |
| T (°C)                 | 24,2 | 24,1 | 24,0 | 24,1 | <b>24,1</b> |

Como as primeiras medições se diferenciaram muito das demais, elas foram excluídas da amostragem na hora de se calcular a média aritmética para cada um dos parâmetros térmicos, mesmo método adotado para o material proveniente do CE-01.

Cerca de 24 horas após a fabricação da mistura, decidiu-se realizar uma outra medição dos parâmetros térmicos, seguindo o mesmo procedimento anterior, obtendo-se os seguintes valores (Tabela 4.15):

Tabela 4.15 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim, 24 horas após a fabricação

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,72 | 0,77 | 0,77 | 0,78 | <b>0,77</b> |
| R (m°C/W)              | 1,38 | 1,30 | 1,30 | 1,28 | <b>1,29</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,13 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | <b>0,15</b> |
| T (°C)                 | 20,5 | 20,6 | 20,7 | 20,8 | <b>20,7</b> |

Com isso, verificou-se que a condutividade térmica média da mistura havia diminuído, apesar da difusividade térmica permanecer igual. Provavelmente, isto pode ter ocorrido porque a temperatura do material também estava menor.

Então, procedeu-se o preenchimento dos furos com a mistura, de acordo com a Figura 4.69 a seguir. O que se fazia era posicionar os instrumentos (bastonete térmico ou sonda medidora de temperatura) no centro de cada furo para, em seguida, preencher o restante livre com a lama fabricada. Obviamente, o material preparado inicialmente não foi suficiente para todos eles, sendo necessária a fabricação de uma quantidade maior.

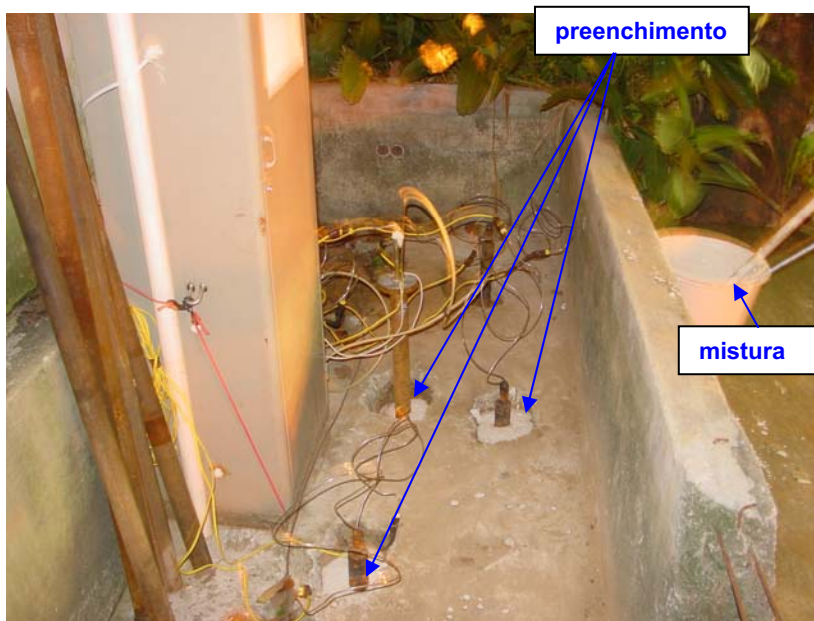


Figura 4.69 – Furos preenchidos com a mistura

Uma vez preenchidos todos furos com a mistura, aguardou-se 24 horas para se determinarem, novamente, os parâmetros térmicos dos materiais em cada furo, mesmo que isto só fosse possível superficialmente, ou seja, introduzindo a sonda do aparelho **KD2** na parte mais superficial do material. Os seguintes resultados foram obtidos (Tabelas 4.16 a 4.20):

Tabela 4.16 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo do bastonete térmico

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,81 | 0,82 | 0,85 | 0,82 | <b>0,82</b> |
| R (m°C/W)              | 1,22 | 1,20 | 1,16 | 1,20 | <b>1,19</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,15 | <b>0,15</b> |
| T (°C)                 | 22,5 | 22,6 | 22,6 | 22,6 | <b>22,6</b> |

Tabela 4.17 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 01

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,84 | <b>0,84</b> |
| R (m°C/W)              | 1,22 | 1,18 | 1,16 | 1,18 | <b>1,18</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | <b>0,15</b> |
| T (°C)                 | 22,4 | 22,4 | 22,4 | 22,4 | <b>22,4</b> |

Tabela 4.18 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 02

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | 04   | Média       |
|------------------------|------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,80 | 0,80 | 0,81 | 0,82 | <b>0,81</b> |
| R (m°C/W)              | 1,24 | 1,24 | 1,22 | 1,22 | <b>1,23</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,14 | <b>0,14</b> |
| T (°C)                 | 22,6 | 22,7 | 22,7 | 22,7 | <b>22,7</b> |

Tabela 4.19 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 03

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | Média       |
|------------------------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,84 | 0,84 | 0,84 | <b>0,84</b> |
| R (m°C/W)              | 1,18 | 1,18 | 1,18 | <b>1,18</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,16 | 0,16 | 0,15 | <b>0,16</b> |
| T (°C)                 | 23,1 | 23,1 | 23,1 | <b>23,1</b> |

Tabela 4.20 – Parâmetros Térmicos da mistura água-caulim no furo 04

| Parâmetros Térmicos    | 01   | 02   | 03   | Média       |
|------------------------|------|------|------|-------------|
| $\lambda$ (W/m°C)      | 0,83 | 0,84 | 0,84 | <b>0,84</b> |
| R (m°C/W)              | 1,18 | 1,16 | 1,18 | <b>1,17</b> |
| D (mm <sup>2</sup> /s) | 0,16 | 0,16 | 0,15 | <b>0,16</b> |
| T (°C)                 | 23,1 | 23,1 | 23,1 | <b>24,1</b> |

Com estes resultados, observou-se que a condutividade térmica média da mistura, após a sua inserção nos furos, ficou em aproximadamente 0,83 W/m°C. Já a difusividade térmica ficou, em média, em 0,15 mm<sup>2</sup>/s. Não houve nenhum valor com desvio padrão significativo em relação à média, indicando que as misturas ficaram homogêneas.

Enfim, após a instalação dos instrumentos, e procedidas as suas ligações e conexões elétricas, o novo sistema de dessorção térmica *in situ* estava apto a iniciar um novo ensaio.

#### 4.4.3. Aplicação do novo SDTIS no CE-02

Assim como os ensaios de campo no CE-01, os que foram realizados no CE-02 também apresentaram alguns problemas que, invariavelmente, obrigaram-no a ser finalizado e, posteriormente, reiniciado. Portanto, de forma a facilitar o entendimento do progresso obtido ao longo dos meses neste novo campo de trabalho de campo, eles serão divididos em “experimentos”, conforme os itens que se seguem.

#### 4.4.3.1. Primeiro Experimento

Conforme mencionado anteriormente, após a inserção de uma mistura de caulim e água de forma a preencher a folga entre os instrumentos e a parede do furo, o ensaio estava apto a ser iniciado.

No dia 20 de abril de 2006, por volta das 16 horas, programou-se o controlador de forma que o bastonete térmico aplicasse no solo uma temperatura inicial, e constante, de 100°C.

A título de informação cronológica, a mistura havia sido feita no dia anterior e inserida no solo neste dia. E, conforme informação obtida com a sonda **KD2**, a mistura de água com caulim ao redor do bastonete térmico se encontrava sob uma temperatura de 22,6°C.

Inicialmente, o controlador de temperatura registrava 23°C. Como ele não trabalha com casas decimais, sua aferição condizia com a temperatura externa do bastonete, de acordo com os 22,6°C medidos antes. Há cerca de 30 minutos após o início do experimento, ele já registrava 52°C.

Às 18h30min do dia 20/04, ou seja, 2 horas e meia após o início do ensaio, a temperatura aferida pelo controlador era de 78°C, indicando que o bastonete térmico estava funcionando e começando a fazer efeito.

Porém, no dia seguinte, 24 horas após o início do ensaio, o controlador de temperatura registrava 66°C, ou seja, abaixo do que ele vinha registrando anteriormente.

Ainda nos 04 dias seguintes, o controlador de temperatura passou a mostrar 50°C em seu display, indicando que deveria estar havendo algum problema com o bastonete térmico.

Então, no dia 25 de abril de 2006, ao se desligar o ensaio e retirar o bastonete térmico para verificação do que poderia estar ocorrendo, verificaram-se duas coisas:

1. O bastonete estava encharcado com a mistura caulim e água;
2. Um de seus terminais elétricos, que saíam do cartucho de resistência, estava rompido.

Provavelmente, o rompimento se deu por um surto de corrente que resultou em um grande curto-circuito no sistema elétrico, provocado pela entrada de lama junto aos terminais do bastonete térmico, conforme verificado. Esta lama deve ter entrado em contato com os terminais do bastonete da mesma forma que a água da chuva entrou quando os experimentos eram realizados no CE-01, ou seja, passando pelos furos ortogonais da parte inferior do bastonete e ascendendo até os terminais, uma vez que não havia nenhum tipo de vedação entre as duas peças.

Logo, mais um experimento não pôde ser continuado.

Com isso, pelo menos uma conclusão foi tirada: o bastonete térmico construído não estava apto a ser introduzido em um solo mole sem ser danificado, uma vez que a sua estrutura não possuía uma boa vedação.

De qualquer forma, a Figura 4.70 a seguir mostra o gráfico extraído deste primeiro experimento, o qual foi feito da mesma maneira que os gráficos plotados para o CE-01.

Conforme se observa, a 'temperatura externa' se mostra quase sempre inferior à temperatura abaixo do nível do terreno.

Como era de se esperar, o ponto mais próximo ao bastonete térmico (27 cm) foi o que apresentou as maiores temperaturas, em média 1°C acima do ponto seguinte (44 cm), que por sua vez, era maior do que os demais. Porém, pelo que se pôde observar, estes pontos não sofreram influências significativas, em termos de aumento de temperatura.



CE-02, de 20/04 a 25/04

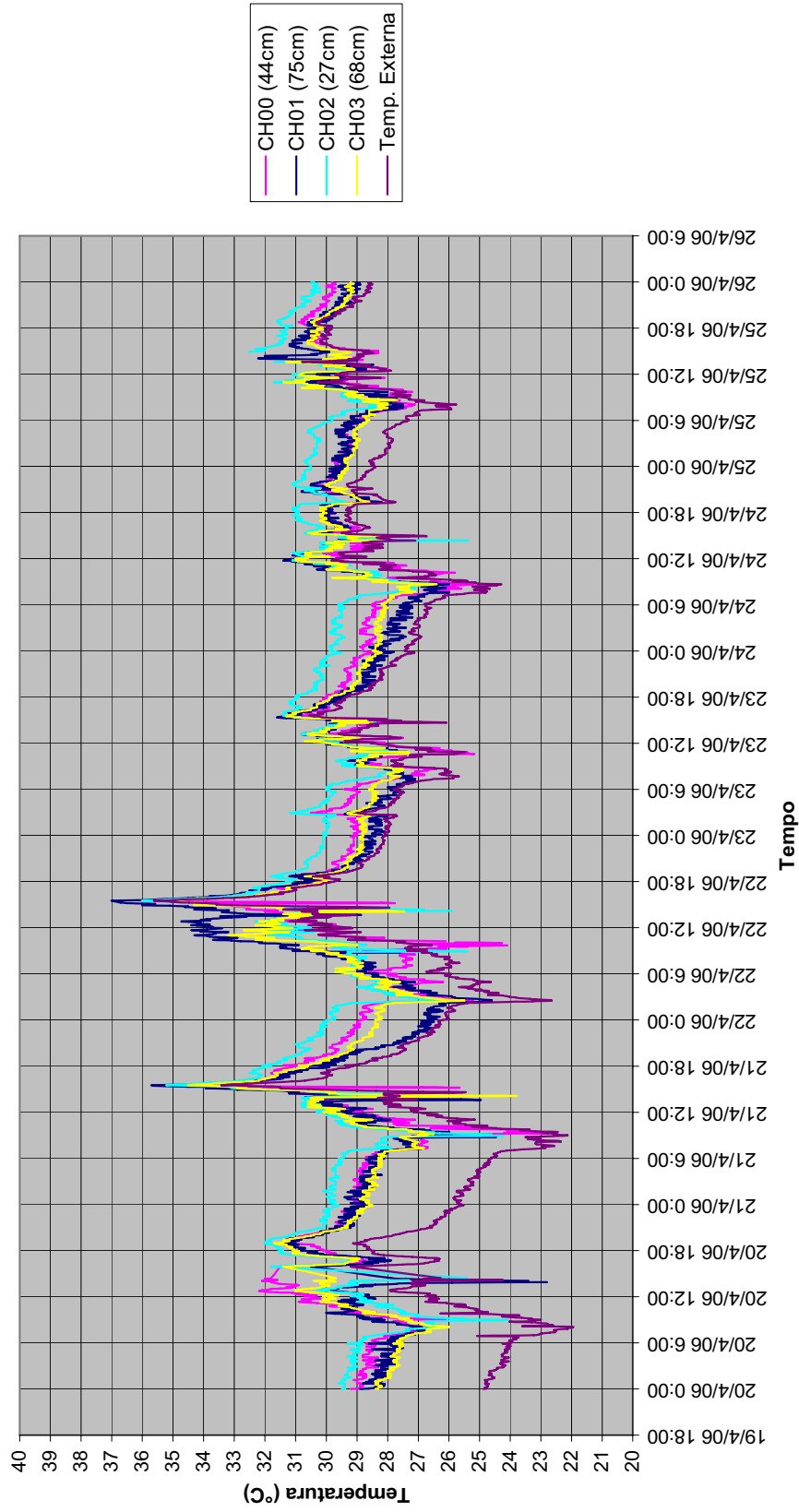


Figura 4.70 – Aplicação do bastonete térmico no CE-02, de 20/04/2006 a 25/04/2006

#### 4.4.3.2. Segundo Experimento

Para este segundo experimento, não seria mais possível a instalação da instrumentação nos mesmos furos do experimento anterior, já que eles continham aquela mistura fabricada anteriormente, a qual seria muito difícil de ser retirada. Logo, novos furos deveriam ser executados.

Como o CE-02 tinha espaço suficiente para mais uma configuração com furos possuindo o mesmo espaçamento anterior, isto não seria problema. No entanto, como o trado utilizado antes possuía diâmetro superior ao indicado, isto deveria ser consertado.

Então, novos furos foram feitos (britadeira para vencer a laje de concreto armado e novo trado com diâmetro correto para perfurar o solo) e um novo cartucho de resistência elétrica, igual ao anterior, foi instalado no bastonete térmico, já que aquele havia sido inutilizado em função do número de consertos e manutenções realizadas. As profundidades obtidas neste novo local foram ainda inferiores aos 1,50 metros obtidos no outro, consolidando ainda mais a idéia da presença de uma rocha ou de um matacão no local. Em alguns pontos, ela chegou a 1,10m, enquanto em outros se conseguiu chegar a 1,25m. Mesmo assim, resolveu-se instalar a instrumentação na profundidade máxima de cada furo.

A umidade média observada nos últimos 0,5m de cada furo foi de **20,34%**, a partir das amostras coletadas.

A Figura 4.71 a seguir, baseada nas sondagens realizadas e nos comprimentos dos instrumentos do novo sistema de dessorção térmico *in situ* ilustra esta nova configuração:



Conforme se pode observar, os termopares inferiores de cada sonda se situavam dentro dos limites horizontais superior e inferior do aquecedor do bastonete, com posições variando até 15cm em relação ao seu centro, o que foi considerado aceitável para o ensaio.

Com isso, no dia 16 de maio de 2006, uma nova instalação estava feita no CE-02, com espaçamento entre o bastonete e os furos mostrados na Tabela 4.21 abaixo, bem como a identificação de cada sonda medidora de temperatura:

Tabela 4.21 – Identificação e posicionamento das sondas medidoras de temperatura em relação ao bastonete térmico

| <b>Termopares</b> | <b>Canais do 'data logger'</b> | <b>Distância horizontal da sonda em relação ao bastonete</b> | <b>Posição vertical dos termopares inferiores (1A, 2A, 3A e 4A) em relação ao centro do aquecedor</b> |
|-------------------|--------------------------------|--|---|
| <b>2A e 2B</b>    | <b>02 e 07</b>                 | 34 cm  | 15 cm   |
| <b>4A e 4B</b>    | <b>00 e 05</b>                 | 42 cm  | 05 cm   |
| <b>1A e 1B</b>    | <b>03 e 08</b>                 | 60 cm  | 10 cm   |
| <b>3A e 3B</b>    | <b>01 e 06</b>                 | 70 cm  | 05 cm   |

Depois de conectados os cabos dos termopares ao 'data logger', conforme a Tabela 4.21 acima, e do bastonete ao controlador de temperatura, o novo sistema de dessorção térmica *in situ* estava apto a ser iniciado.

No dia 19 de maio, decidiu-se que o ensaio seria iniciado com 100°C, continuamente. Porém, mais ou menos 1 hora após ser ligado, o controlador de temperatura não registrava nenhuma alteração em seu display, marcando sempre 23°C, indicando, mais uma vez, que poderia estar ocorrendo algum problema com o bastonete.

E para completar, por imprudência, a verificação do seu funcionamento se deu quando ele ainda estava ligado, o que resultou em uma descarga elétrica em seu operador.

Depois de desligado o sistema elétrico, desmontou-se o bastonete, onde se verificou que ambos os terminais estavam rompidos.

Mais uma vez, o bastonete térmico deveria passar por manutenção.

#### 4.4.3.3. Terceiro experimento

Desta vez, decidiu-se por mudar o tipo de cartucho contendo a resistência elétrica do bastonete térmico, já que o atual estava causando muitos problemas durante os ensaios e, portanto, não se mostrava apto a realizá-los.

Este novo elemento deveria ter as mesmas especificações básicas de trabalho do anterior, ou seja, ser alimentado por 220 Volts e ter um faixa de temperatura que variasse entre zero e 1000°C. Além disso, deveria ser feito em Aço Inox 316L, para resistir ao calor, e ter dimensões adequadas ao diâmetro e comprimento interno do tubo inferior do bastonete (o que é perfurado ortogonalmente). Por outro lado, os desafios seriam a criação de uma conexão dupla no próprio cartucho que interligasse, simultaneamente, o tubo inferior perfurado e a haste do bastonete, além de um sistema de vedação melhor do que o anterior.

Então, resolveu-se utilizar um cartucho do tipo espiral, estrutural e morfológicamente mais resistente do que o anterior. No entanto, como se tratava de um produto comercial padronizado, ele deveria passar por algumas adaptações, conforme mencionado antes, para ser integrado às dimensões do bastonete térmico. Logo, conforme mencionado antes, pensou-se em um sistema duplo de rosca com dimensões adequadas à haste e ao tubo do aquecedor, para que estes elementos se tornassem uma estrutura solidária. Assim, já se eliminaria um dos problemas apresentados pelo cartucho anterior, cujos terminais eram pendurados e sustentados diretamente pelos cabos que seguiam até o controlador de temperatura, o que acabava forçando muito a solda entre eles.

Esta peça de adaptação, depois de projetada, foi fabricada no **LGMA/PUC-Rio**.

Porém, ainda ficaria faltando a vedação dos terminais situados acima da base do cartucho, de forma a evitar que a água ascendesse até eles ao entrar nos furos da parte inferior do bastonete. Logo, decidiu-se soldar um tarugo de metal na base deste novo cartucho. Mais ao centro deste elemento, foram feitos dois furos por onde passariam a tubulação de entrada de ar e o termopar do bastonete. A tubulação de ar foi diretamente soldada ao tarugo, de forma a evitar a passagem

da água por eventuais vazios entre ele e o tarugo. Já o outro furo foi feito com o mínimo diâmetro possível, de forma a permitir que apenas o termopar passasse por ele.

Logo, aparentemente não haveria meios da água chegar aos terminais da resistência elétrica através da parte inferior do bastonete. As únicas possíveis entradas seriam por meio da conexão entre a haste e o tubo inferior do bastonete, ou se a água entrasse pela sua parte superior, ou seja, pela flange.

Com relação ao rosqueamento dos dois elementos estruturais do bastonete à sua haste, resolveu-se utilizar uma fita do tipo “veda-rosca”. Já com relação à parte superior (flange), a solução foi mais simples e também rústica, pois se decidiu colocar apenas um saco plástico para cobri-la.

Logo, depois de testado inicialmente em laboratório, o bastonete térmico com o novo aquecedor estava pronto para ser utilizado.

Seguem as Figuras 4.72 a 4.80, seqüenciais, apresentando-o:



Figura 4.72 - Novo cartucho de resistência (vista superior)



Figura 4.73 – Novo cartucho de resistência (vista lateral)



Figura 4.74 – Detalhe inferior da base do cartucho fabricada no **LGMA**, com 02 furos



Figura 4.75 – Detalhe superior da base do cartucho fabricada no **LGMA**



Figura 4.76 – Cartucho conectado ao elemento rosca



Figura 4.77 – Detalhe da conexão entre o cartucho e o tubo inferior do bastonete



Figura 4.78 – Novo aquecedor do bastonete térmico



Figura 4.79 – Detalhe do novo aquecedor do bastonete térmico



Figura 4.80 – Elementos estruturais do bastonete térmico

Como se pôde observar, o comprimento total do bastonete térmico aumentou em 10 cm, devido a esta nova peça de ligação.

Com tudo pronto, o terceiro experimento no CE-02 teve início na manhã do dia 19 de junho de 2006, com as sondas medidoras de temperatura posicionadas nos mesmos locais do segundo experimento, conforme mostrou a Figura 4.71.

Desta vez decidiu-se que 400°C seriam aplicados ao solo continuamente.



Porém, 12 horas depois do início do ensaio, a temperatura do controlador ainda não havia ultrapassado 50°C.

Mais uma vez, desligou-se o sistema para verificação do que poderia estar ocorrendo. Ao abrir o bastonete, observou-se que o seu cartucho estava completamente danificado, conforme mostram as Figuras 4.81 a 4.84 abaixo:



Figura 4.81 – Cartucho de resistência danificado (1)



Figura 4.82 – Cartucho de resistência danificado (2)



Figura 4.83 – Detalhe da resistência saindo do cartucho através de uma abertura



Figura 4.84 – Aparência esbranquiçada do cartucho

De acordo com o fabricante, apesar deste tipo de cartucho ter sido feito em Aço Inox 316L, o lote que o originou não deveria ser de boa qualidade. Logo, quando houve o aquecimento, uma das dobras do invólucro se abriu, liberando a saída da resistência elétrica. O pó esbranquiçado também correspondia a uma reação química desta liga do aço ao ser submetida a temperaturas elevadas.

Para este terceiro experimento, devido ao seu pouco tempo, não foi necessário plotar nenhuma curva.

#### 4.4.3.4. Quarto Experimento

Após “garantias” por parte do fabricante de que um novo cartucho não apresentaria os mesmos problemas do anterior, foi solicitado um novo elemento com as mesmas características.

No dia 07 de julho de 2006, por volta das 16h30min, depois que o bastonete térmico contendo um novo cartucho já estava montado, e todos os demais componentes instalados e conectados na mesma posição do segundo experimento (Figura 4.85 abaixo), iniciou-se o quarto experimento no CE-02.



Figura 4.85 – Instalação dos componentes do novo SDTIS no CE-02

Para início de ensaio, foi considerada uma umidade semelhante à determinada para o ensaio anterior, ou seja, por volta de 20%.

Decidiu-se que, desta vez, seriam aplicados cerca de 150°C ao bastonete e conforme fosse o seu comportamento ao longo do tempo esta temperatura seria elevada aos poucos.

Até o dia 10 de julho, com 03 dias de ensaio, o controlador de temperatura apresentava em seu visor 150°C, o que condizia exatamente com o que estava lhe sendo solicitado.

Com isso, decidiu-se elevar esta temperatura para 300°C durante as 24 horas seguintes. Como o bastonete estava se comportando bem, no dia 11 de julho resolveu-se aumentar ainda mais a sua temperatura: 500°C.

Diferentemente dos ensaios anteriores, desta vez o bastonete térmico estava funcionando perfeitamente, de acordo com o que estava sendo mostrado no visor do controlador de temperatura.

Durante este tempo o '*data logger*' era monitorado visualmente todos os dias, a fim de se tentar notar a evolução da influência do calor nos pontos pré-determinados, de acordo com as temperaturas mostradas em cada canal.

Após 17 dias de experimento, e como as sondas medidoras de temperatura aparentavam uma certa estagnação em um determinado patamar, por volta de 60°C, decidiu-se elevar a temperatura do bastonete para 600°C.

Nos 04 dias seguintes, não se notou qualquer variação significativa ( $>10^{\circ}\text{C}$ ) nos canais da unidade de armazenamento de dados.

Porém, no dia 29 de julho de 2006, começou a chover forte na cidade do Rio de Janeiro e, conseqüentemente, no CE-02. Esta chuva permaneceu até o dia 31, quando foi necessário desligar o sistema, pois houve indicações de que os cabos condutores de energia do bastonete térmico haviam sofrido conseqüências do seu contato com a água, já que o visor do controlador de temperatura começou a apresentar temperaturas de 150°C, mais ou menos, quando a real deveria ser de 600°C.

De qualquer forma, o que se notou durante estes dias de chuva foi que o patamar das temperaturas medidas pelas sondas tinha sido elevado, comprovando mais uma vez que a presença de água no solo serve como um catalisador para incrementar o fluxo de calor.

Ou seja, durante os primeiros 22 dias de experimento, provavelmente muito antes disso, a aplicação de temperaturas entre 150 e 600°C naquele volume de solo fez com que praticamente toda a água presente em seus vazios fosse evaporada. A partir daí, independentemente da temperatura aplicada, o fluxo de calor seria de responsabilidade exclusiva do fenômeno da condução, por parte apenas do esqueleto sólido do solo (por meio do contato entre os grãos).

Assim, concluiu-se que, fisicamente, levando-se em consideração um volume de solo tendendo para o infinito, seria impossível que esta transmissão de calor chegasse aos pontos pré-determinados com a mesma intensidade do seu ponto inicial ou ponto de partida, mesmo para pontos muito próximos como os situados a 34 e 42 cm. Isto independentemente do período e da temperatura de aplicação de calor.

Com isso, estes pontos pré-determinados atingiram um patamar máximo, o qual não poderia mais ser ultrapassado significativamente, dadas as condições físicas atuais daquele volume de solo.

Porém, a partir do momento em que choveu e o solo se umedeceu, estas condições físicas se alteraram. Com isso, a água presente nos vazios do volume de solo passou a conduzir calor também. Logo, a tendência era que aquele patamar de temperatura observado anteriormente fosse elevado, o que acabou acontecendo realmente. Infelizmente, esta evolução não pôde ser observada durante um tempo maior, já que no dia 31 de julho foi preciso desligar o sistema por problemas com os cabos do bastonete.

A seguir, a Figura 4.86 apresenta um gráfico mostrando a evolução da temperatura em todas as curvas durante o experimento, onde se observa claramente o que foi explicado nos parágrafos anteriores.

Nas Figuras 4.87 a 4.90 seguintes, são mostrados os comportamentos de cada ponto individualizado, em função do tempo. Para cada curva, foi traçada, a mão, uma linha de tendência.

CE-02, de 06/07 a 31/07

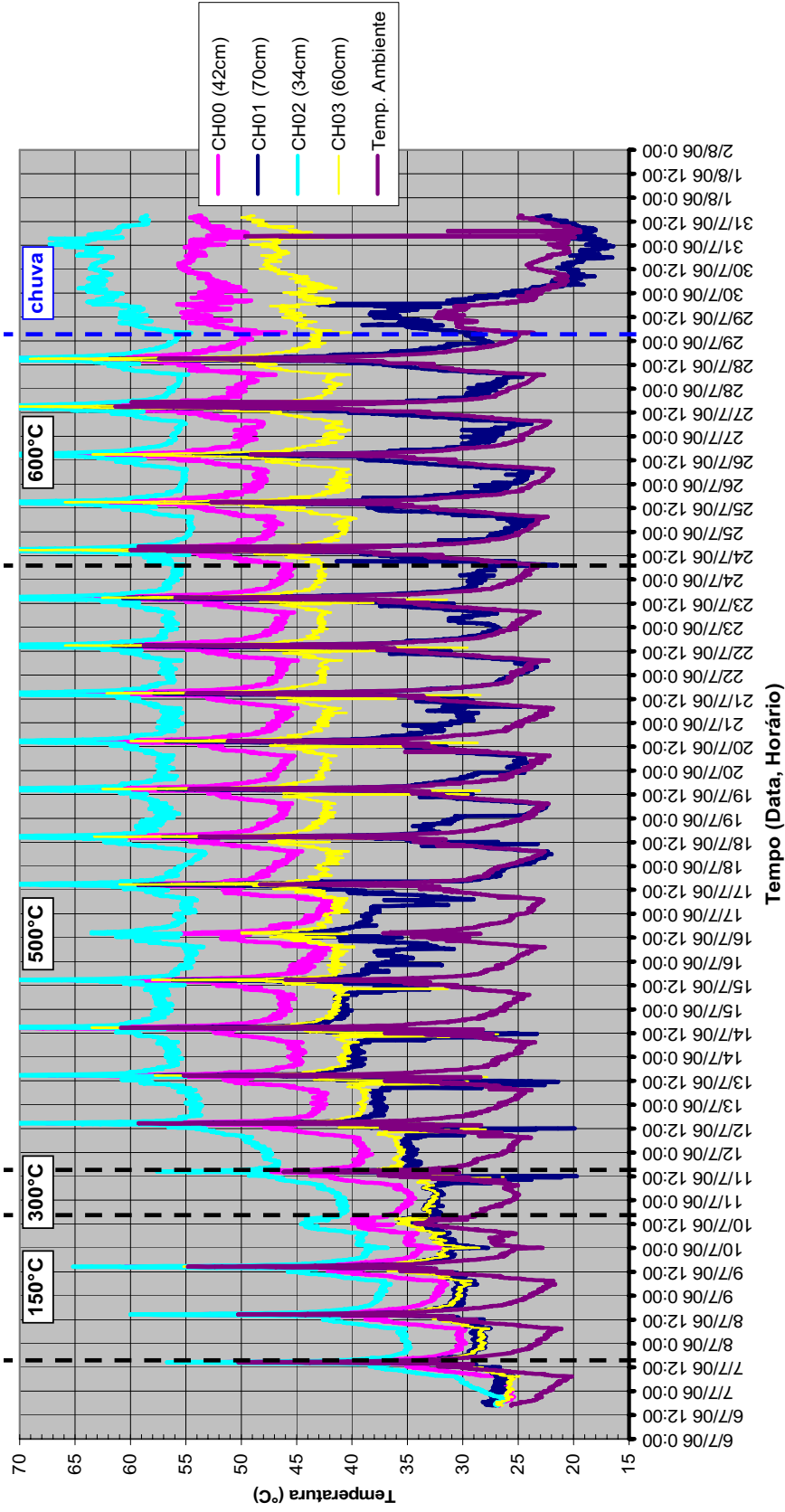


Figura 4.86 – Aplicação do bastonete térmico no CE-02, de 06/07/2006 a 31/07/2006

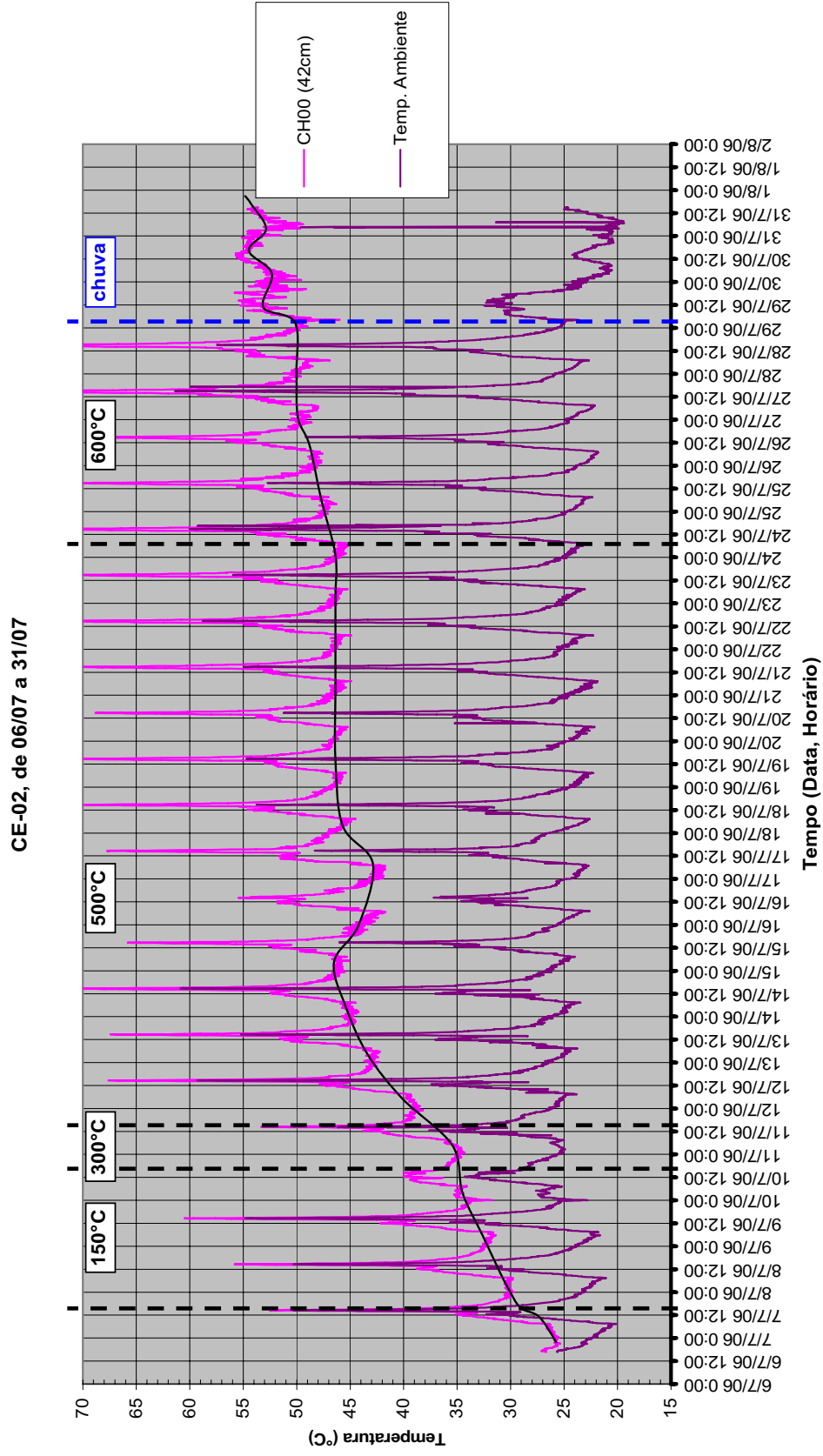


Figura 4.87 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 42 cm de distância

CE-02, de 06/07 a 31/07

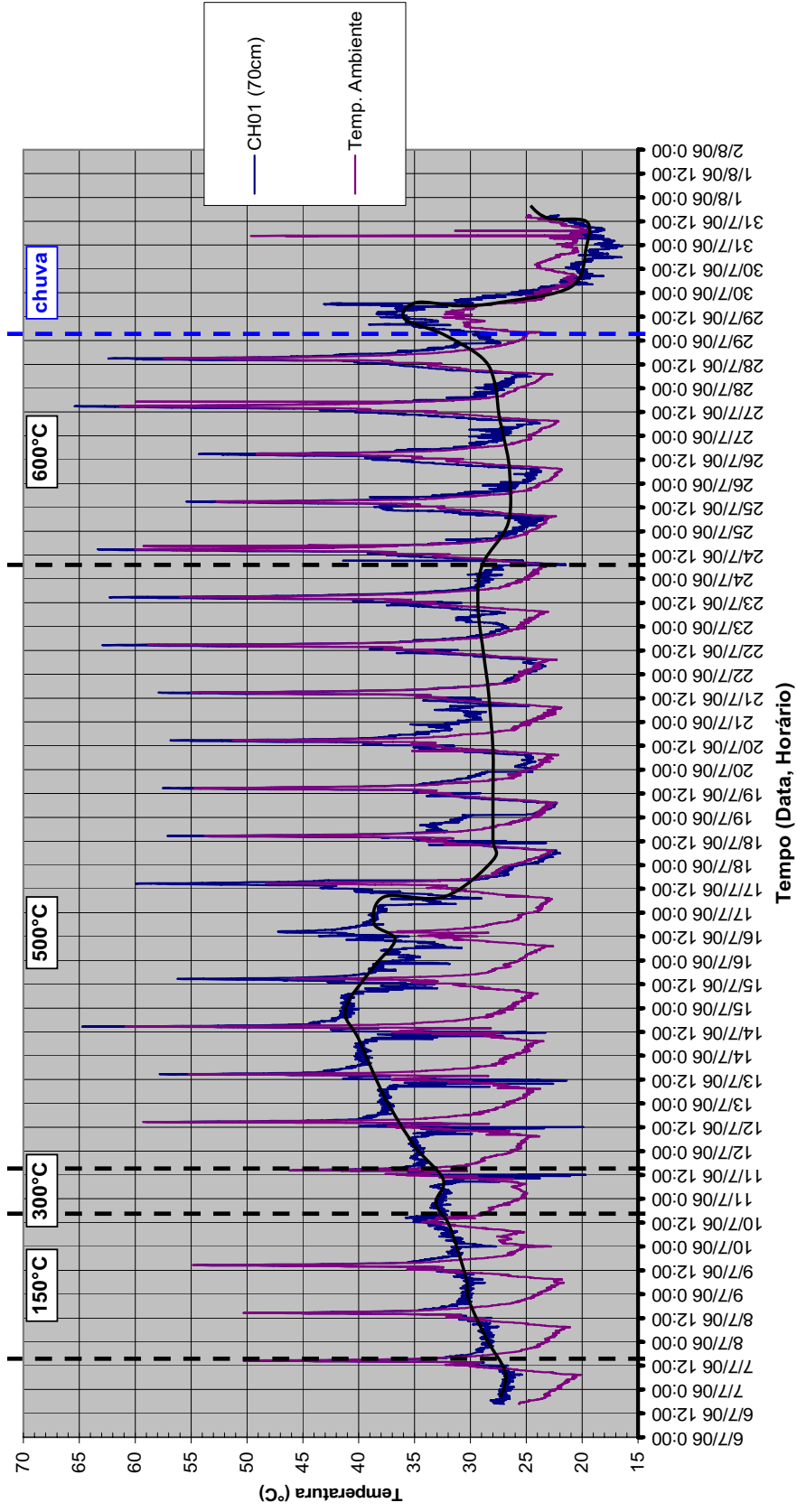


Figura 4.88 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 70 cm de distância

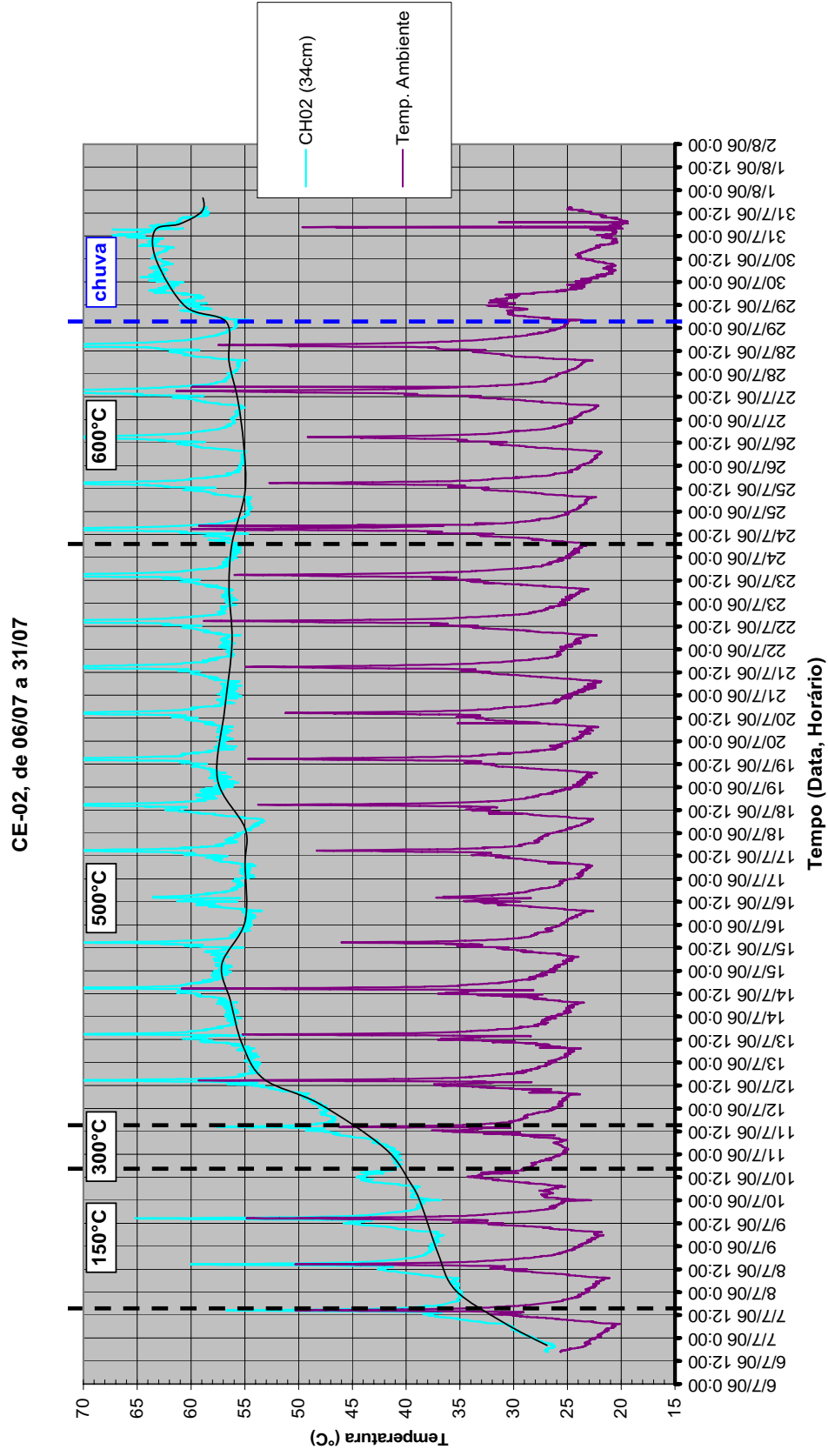


Figura 4.89 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 34 cm de distância



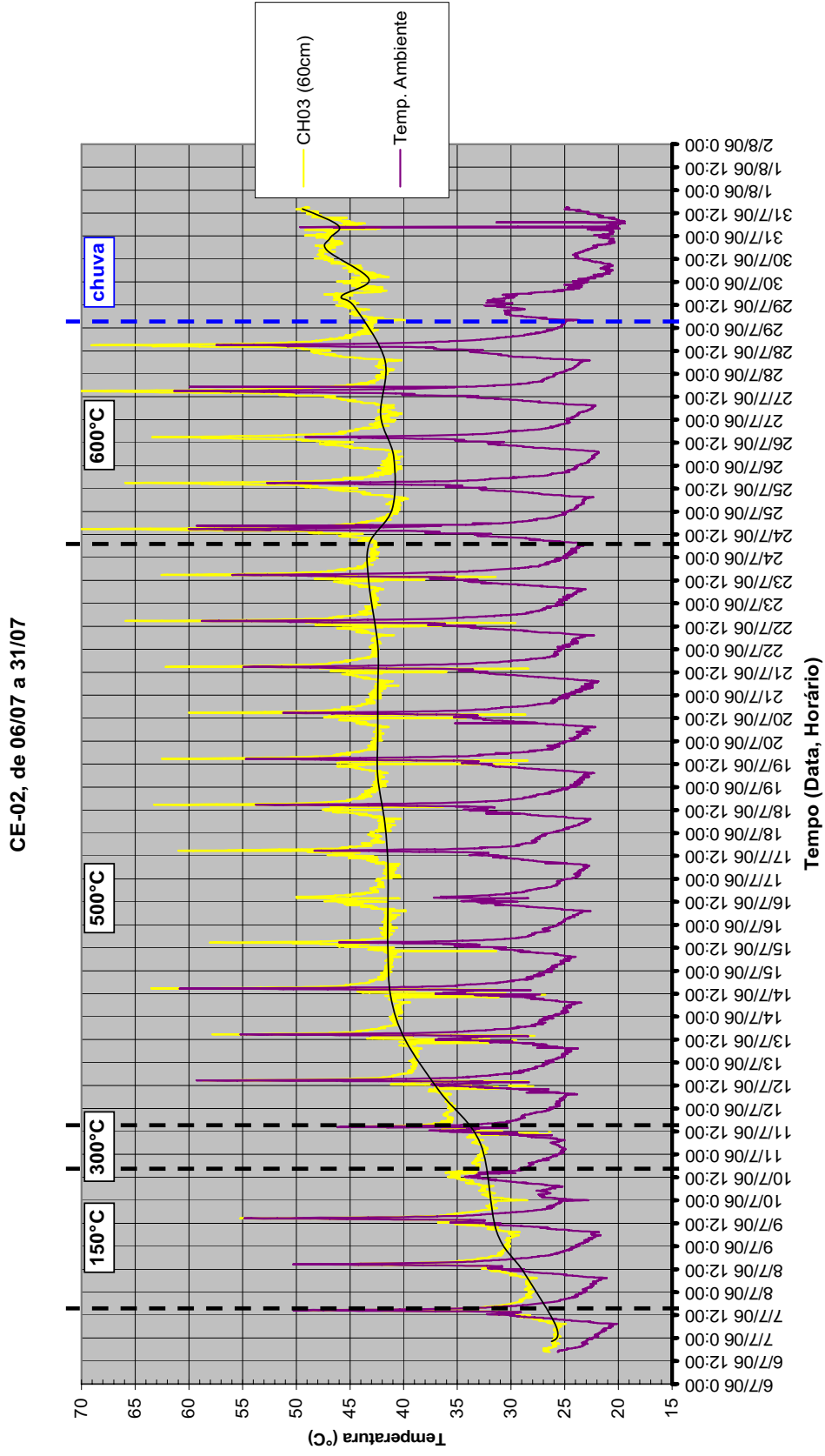


Figura 4.90 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 60 cm de distância

Em todas as curvas que representam os termopares inferiores fica claro um aumento de inclinação logo após a mudança de temperatura do bastonete, de 150 para 500°C. Como era de se esperar, esta mudança foi mais acentuada nos 02 pontos mais próximos ao aquecedor.

Depois, todas as curvas atingiram um patamar máximo, nos quais se mantiveram praticamente constantes, apresentando pequenas variações.

Quando a temperatura do bastonete passou para 600°C, observou-se uma suave tendência a aumentar este patamar, com as curvas se tornando levemente crescentes. Nas curvas a 42 e 60 cm, esta mudança foi mais perceptível.

Após a chuva, apesar dos dados aferidos se apresentarem um pouco confusos, as temperaturas mostraram uma tendência em aumentar, fazendo com que cada um dos pontos pré-determinados medisse a máxima temperatura global. No ponto mais próximo ao bastonete (34 cm), ela chegou a 59,1°C.

A única exceção a toda esta explanação se refere ao ponto situado a 70 cm de distância do bastonete térmico. Estranhamente, na manhã do dia 15 de julho a curva apresentou um decréscimo significativo, passando então a acompanhar o patamar da 'temperatura externa'. Uma explicação para isso é que o termopar perdeu o contato com a parede do furo. Logo, as suas variações de temperatura passaram a ser impostas majoritariamente pelas variações da temperatura ambiente seja via condução através da própria sonda, seja via radiação solar.

Por fim, a temperatura externa se manteve entre 25 e 30°C, com picos registrados por volta das 15 horas, quando a incidência do sol no CE-02 era máxima.

A seguir, é apresentada a Tabela 4.22 contendo os valores máximos observado em cada um dos pontos distanciados do bastonete térmico. Assim como nos experimentos realizados no CE-01, os pontos escolhidos não foram, necessariamente, os picos em cada curva, uma vez que os cabos elétricos dos termopares poderiam apresentar interferências eletromagnéticas ou perdas. Logo, os pontos escolhidos fizeram parte das linhas de tendência adotadas.

Eles foram divididos em duas fases, sendo a primeira relativa à parte crescente e intermediária da curva e a segunda representando a sua fase final, quando a temperatura do bastonete térmico já era de 600°C e havia chovido no CE-02.

Tabela 4.22 – Resultados do quarto experimento no CE-02

| Quarto Experimento<br>(06 a 31 de julho) |                     |                                |
|--|---------------------|--------------------------------|
| Ponto                                    | 1ª Fase (até 500°C) | 2ª Fase (até 600°C<br>+ chuva) |
| 2A (34 cm)                               | 58,2°C              | 64,4°C                         |
| 4A (42 cm)                               | 46,6°C              | 54,7°C                         |
| 1A (60 cm)                               | 43,5°C              | 49,2°C                         |
| 3A (70 cm)                               | 41,6°C              | -                              |

Ao se comparar as duas fases deste ‘quarto experimento’ com os resultados obtidos no CE-01 (Tabela 4.4), sobretudo com os dados obtidos com o seu ‘quinto experimento’, que foi o mais representativo, observa-se que:

1. Mesmo a 500°C e com mais tempo de ensaio (quase 30 dias), as temperaturas máximas dos pontos mais próximos ao bastonete no CE-02 (34 e 42 cm) foram inferiores às obtidas em pontos equivalentes no CE-01 (30 e 40 cm), cujo bastonete se encontrava a 400°C.
2. Quando esta temperatura chegou a 600°C no CE-01, e com os aumentos da umidade e do grau de saturação do solo provocados pela chuva, apenas o segundo ponto (42 cm) suplantou o seu equivalente no CE-01. Porém, o ponto mais próximo (34 cm) ficou praticamente igual ao seu correspondente. Não se sabe se, caso não houvesse chovido, isto iria acontecer.
3. Com relação aos demais pontos, ao compará-los com os seus equivalentes no CE-01, ocorreu exatamente o inverso. As temperaturas máximas observadas tanto na 1ª, quanto na 2ª Fase, foram sempre maiores do que as do CE-01.

Isto mostra que:

1. No solo areno-argiloso (CE-01), o calor se manteve mais próximo ao bastonete térmico, já no solo areno-siltoso (CE-02) este calor se propagou com maior intensidade.
2. Quanto maiores o grau de saturação e o teor de umidade, mais intensa será a propagação de calor no solo.

3. Para solos não saturados, sem barreiras / limites físicos (ou seja, tendendo para o infinito), e com apenas um bastonete térmico, é impossível que pontos, por mais próximos que estejam, cheguem à mesma temperatura aplicada.
4. Para um solo com baixos valores de grau de saturação e teor de umidade, a energia gasta para se aquecer pontos vizinhos situados a determinadas distâncias do bastonete deverá ser muito alta. E mesmo assim, as perdas dissipadas serão muito grandes.

#### 4.4.3.5.

#### **Considerações Finais sobre os experimentos do CE-02**

Após este último experimento, tendo em vista o fato de que todos os prazos do trabalho e dissertação do mestrado estavam por vencer, decidiu-se finalizar a temporada de ensaios de campo. Felizmente, com este último ensaio, que durou quase 30 dias, foi possível consolidar algumas conclusões, dentre as quais a que o bastonete térmico desenvolvido já está funcionando corretamente.

Fica claro, porém, que o ideal seria que todos os experimentos tivessem ido até o final, tal como este. No entanto, mesmo com os que não deram certo, também foi possível se tirarem algumas conclusões, principalmente acerca dos pontos que deveriam ser corrigidos para os ensaios seguintes.

#### 4.4.4.

#### **Amostragem de bloco no CE-02**

O espaço existente no CE-02 não comportava uma escavação de forma a se extrair do solo um bloco indeformado com as mesmas dimensões que o bloco retirado no CE-01 e no nível de profundidade sob o qual se encontrava o aquecedor do bastonete térmico, ou seja, entre 0,80 e 1,20 metros. Para isso, era bem possível que as fundações do **LGMA** ficassem expostas, além de grande parte do calçamento da **PUC-Rio** ter que ser destruído. E, além disso, seria necessário mobilizar uma grande operação para esta atividade, inclusive com maquinário adequado.

Infelizmente, não havia mais tempo hábil para realizá-la dentro desta dissertação. Com isso, ficaram comprometidos os ensaios para determinação das propriedades térmicas e de microbiologia do solo do CE-02.

#### **4.5. Ensaio de Laboratório com o solo do CE-02**

Os ensaios de laboratório com o solo do Campo Experimental 02 consistiram somente nas caracterizações físicas das amostras amolgadas, extraídas durante as campanhas de sondagens. Conforme mencionado anteriormente, não foi possível realizar os ensaios com amostras indeformadas, uma vez que não se conseguiu extrair um bloco de solo indeformado do local dos ensaios.

##### **4.5.1. Caracterizações**

Assim como realizado com o solo do CE-01, os ensaios de caracterização foram realizados com amostras obtidas de 0,5 em 0,5m a partir da campanha de sondagens no CE-02 e compreenderam a determinação da granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação), dos limites de liquidez – LL e de plasticidade – LP, e da densidade relativa dos grãos –  $G_{ds}$ .

As rotinas empregadas seguiram, basicamente, as metodologias preconizadas pelas **Normas Brasileiras – NBR**, listadas a seguir:

- NBR 7181/84 (Análise granulométrica);
- NBR 6508/84 (Densidade dos grãos);
- NBR 6459/84 (Limite de liquidez);
- NBR 7180/84 (Limite de plasticidade).

Os resultados dos ensaios de caracterização encontram-se resumidos na Tabela 4.23, a seguir. O índice de plasticidade – IP corresponde à diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. As porcentagens de pedregulho, areia, silte e argila indicadas correspondem à classificação definida pela **ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas**. A classificação dos solos é baseada no **SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos**.

No entanto, como as sondagens foram muito próximas uma das outras, e os materiais extraídos eram tátil-visualmente muito semelhantes, decidiu-se utilizar apenas a S-03 e a S-04, cuja distância era de pouco mais de 1,0 metro, sendo a maior entre todas elas.

Tabela 4.23 – Resumo dos Resultados dos Ensaio de Caracterização

| Sond. | Prof. (m) | Limites de Atterberg (%) |      |     | G <sub>ds</sub> | Granulometria (%) |       |       |        | SUCS |
|-------|-----------|--------------------------|------|-----|-----------------|-------------------|-------|-------|--------|------|
|       |           | LL                       | LP   | IP  |                 | Pedregulho        | Areia | Silte | Argila |      |
| S-03  | 0 – 0,5   | 24,3                     | 20,6 | 3,7 | 2,68            | 11,0              | 72,1  | 9,5   | 7,4    | SM   |
|       | 0,5 – 1,0 | n/d                      | n/d  | n/d | 2,70            | 10,3              | 71,8  | 11,7  | 6,2    | SM   |
|       | 1,0 – 1,5 | 22,0                     | n/d  | n/d | 2,71            | 11,9              | 66,7  | 6,5   | 14,9   | SM   |
| S-04  | 0 – 0,5   | 22,7                     | 20,9 | 1,8 | 2,72            | 7,4               | 68,8  | 12,8  | 11,0   | SM   |
|       | 0,5 – 1,0 | 22,3                     | n/d  | n/d | 2,70            | 8,9               | 75,0  | 9,8   | 6,3    | SM   |
|       | 1,0 – 1,5 | n/d                      | n/d  | n/d | 2,65            | 8,3               | 78,8  | 8,1   | 4,8    | SM   |

Com relação aos resultados obtidos, observa-se que a densidade relativa dos grãos é similar entre todas as amostras, se encontrando sempre por volta de 2,70.

Os índices de plasticidade, quando possíveis de serem determinados, se encontraram em níveis muito baixos, indicando que o material é pouco plástico, possuindo baixa porcentagem de finos. Em alguns casos, conforme observado na tabela acima, não foi possível se determinar os limites (n/d).

As Figuras 4.91 e 4.92, mostrando as mais importantes curvas de distribuição granulométrica obtidas, estão apresentadas a seguir. Devido ao posicionamento do bastonete, cuja base se encontrava na cota 1,20m, estas curvas estão representadas pelos dois últimos extratos do solo, ou seja, de 0,5 a 1,0m e de 1,0 a 1,5m.

Demais curvas granulométricas, individualizadas, estão incluídas no Anexo I, ao final do presente trabalho.

Na comparação das duas curvas sob um mesmo nível de profundidade, observa-se que, entre 0,5 e 1,0m os materiais são praticamente iguais. Já no outro patamar, o furo 03 se mostra com uma maior concentração de finos (silte e argila) do que o furo 04, apesar das duas quantidades serem muito baixas.

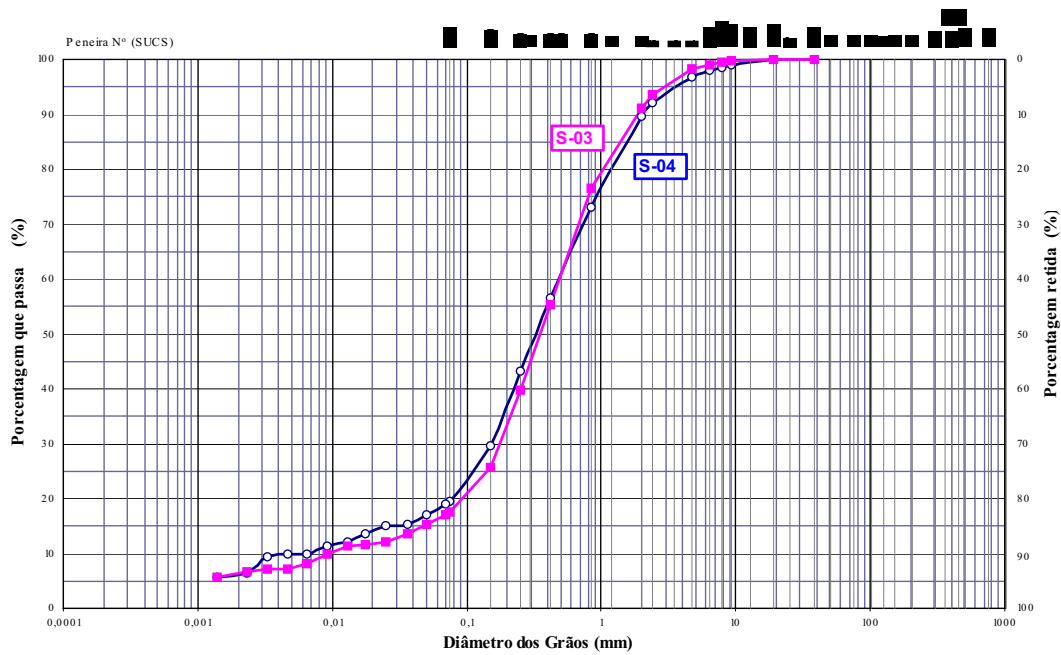


Figura 4.91 – Curvas granulométricas das sondagens 03 e 04, sob profundidade de 0,5 a 1,0m

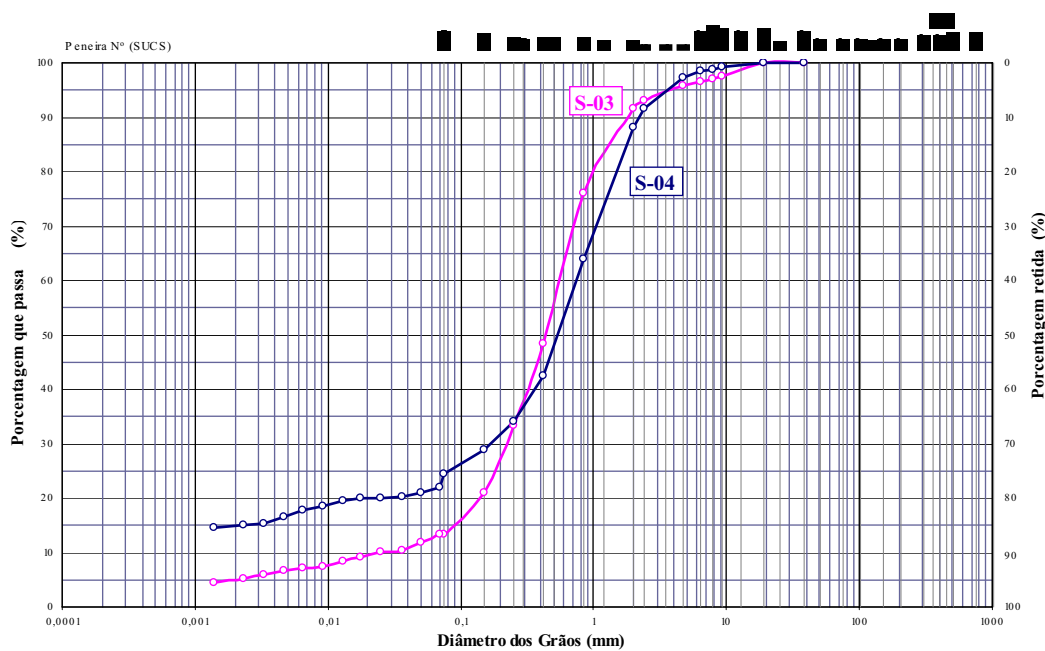


Figura 4.92 – Curvas granulométricas das sondagens 03 e 04, sob profundidade de 1,0 a 1,5m

De acordo com o **SUCS**, a classificação de todos os materiais é correspondente à nomenclatura **SM**, o que significa uma areia-siltosa. Isto ainda pelo fato do solo ser sedimentar, tal como o solo do CE-01. Porém, este outro era areno-argiloso, o que pode explicar alguns fatores como as temperaturas máximas obtidas no CE-01 e no CE-02.

## 5 ESTUDOS EM LABORATÓRIO SOBRE A INFLUÊNCIA DO CALOR NA MICROBIOTA DO SOLO

### 5.1. Introdução

Os ensaios relacionados ao estudo da microbiota foram realizados com amostras de solo extraídas diretamente do CE-01 e consistiram em:

1. Determinação do teor de umidade;
2. Determinação do teor de matéria orgânica;
3. Contagem de bactérias cultiváveis e viáveis;
4. Determinação das atividades metabólicas;
5. Simulação da dessorção térmica em laboratório;
6. Tentativas de recuperação do solo após a aplicação de calor.

Estes ensaios, realizados no **Laboratório de Microbiologia**, anexo ao **Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio**, contaram com o fundamental apoio da bolsista microbióloga **Anna Carolina Magdaleno**, sob supervisão da professora **Denise Maria Mano Pessôa**.

No dia 23 de janeiro de 2006, amostras naturais de solo do CE-01 foram coletadas sob profundidades de 20 e 40 cm a partir de anéis de ponta biselada cravados. Estes anéis, por sua vez, foram acondicionadas em frascos previamente esterilizados para, em seguida, serem tampados adequadamente de forma a sofrerem o mínimo de contato possível com o meio externo durante o seu transporte até o laboratório. Estas amostras foram ensaiadas de acordo com os itens 1 a 4.

Já as sub-amostras retiradas do bloco de solo indeformado, extraído do CE-01, estavam sob a faixa de 50 a 80 cm de profundidade. Porém, como havia material suficiente, além dos itens 1 a 4 também foram feitas simulações da aplicação da



dessorção térmica a partir da utilização de uma Mufla de Ball. Logo, puderam-se comparar os resultados antes e após a aplicação de calor.

Por fim, foram realizadas algumas tentativas em se recuperar este solo, sob o ponto de vista da sua aptidão à existência de novos seres vivos, a partir de combinações de adição de água, nutrientes inorgânicos e orgânicos.

Estes ensaios e seus respectivos resultados e comentários estão mostrados a seguir.

## **5.2. Procedimentos adotados**

A seguir, serão apresentados os materiais e métodos utilizados para cada um dos ensaios.

### **5.2.1. Determinação do Teor de Umidade**

- Três amostras deformadas são acondicionadas em frascos destampados e deixadas por 24 horas em estufa a 110°C;
- Compara-se a massa de solo antes e depois e, com isso, determina-se a massa de água contida no solo e a sua massa seca (as pesagens são realizadas em balança com precisão de 0,1g);
- O teor de umidade será a média aritmética das três divisões entre massa de água e massa seca das amostras.

### **5.2.2. Determinação do Teor de Matéria Orgânica**

- Três amostras de solo seco são acondicionadas em frascos destampados e deixadas por 4 horas em uma mufla de Ball a 400°C.
- Compara-se a massa de solo seco antes e depois e, com isso, determina-se a massa orgânica ausente nas amostras (as pesagens são realizadas em balança com precisão de 0,1g);

- O teor de matéria orgânica será a média aritmética destas três determinações.

### 5.2.3.

#### **Contagem de Microrganismos Viáveis e Cultiváveis**

Chamada de UFC – Unidade Formadora de Colônias, a técnica utilizada foi a de derramamento em profundidade ou “*Pour Plate*”, segundo Brock et al (1994).

- Uma amostra de solo (01 grama) é suspensa em água estéril e diluída sucessivamente (diluições de 10 vezes);
- Uma alíquota de 0,1 mL de cada diluição é colocada em uma placa de *petri* estéril e vazia;
- Sobre esta placa é derramado um meio sólido (TSA 10%), previamente fundido e mantido sob uma temperatura de aproximadamente 56°C, com o auxílio de um fogo a gás;
- São feitas triplicatas para cada diluição;
- Após uma semana de incubação sob temperatura ambiente, contam-se as colônias de microrganismos com o auxílio de uma lupa acoplada a um transluminador.
- Somente são aproveitadas como resultado as placas que contêm entre 30 e 300 colônias. As demais são descartadas;
- Todas pesagens são realizadas em balança com precisão de 0,1g.

### 5.2.4.

#### **Atividade Microbiana Total**

A atividade microbiana total foi determinada por meio da hidrólise de Diacetato de Fluoresceína (FDA), como proposto por Adam & Duncan (2001). O seu princípio preza que este diacetato, inicialmente incolor, seja hidrolisado por enzimas livres do material liberando então a fluoresceína que, por sua vez, é colorida. Este produto final absorve fortemente um comprimento de onda visível (490 nanômetros) que pode ser medido por meio de espectrofotometria.

Seu procedimento descreve que:

- Pesam-se 2 gramas de solo peneirado em *erlenmeyers* com capacidade de 50 mL;
- São acrescentados 15 mL de “solução tampão” fosfato 60nm e, exceto nos “brancos” das amostras, 200µL de “solução estoque” de diacetato de fluoresceína (FDA) 1.000µg/mL;
- O conjunto é incubado em agitação orbital a 100 rotações por minuto, por 20 minutos a 30°C;
- Após a incubação, são acrescentados 15mL de solução Clorofórmio/Metanol (2:1) para que a reação seja interrompida;
- A seguir, amostras são centrifugadas a 2.000 rotações por minuto durante 3 minutos;
- O sobrenadante é filtrado em papel Whatmann n°02, a partir do qual mede-se a sua absorbância em espectrofotômetro a 490 nanômetros.
- Para o cálculo da concentração de fluoresceína em cada uma das amostras, é feita uma curva padrão por meio da diluição de uma “solução estoque” de fluoresceína 2.000 µg/mL em “solução tampão” fosfato 60 nanômetros. Esta curva é linear, do tipo  $y = ax + b$ . Logo, determina-se o FDA;
- Todas as pesagens são realizadas em balança com precisão de 0,1g.

#### 5.2.5.

#### **Simulações da Dessorção Térmica em Laboratório**

- Amostras indeformadas pesando cerca de 500 gramas e sub-amostras menores, sob umidade natural, são acondicionadas em frascos destampados e colocadas em uma mufla de Ball, onde são submetidas a 400°C por 24 horas.
- Pesam-nas antes e após a aplicação do calor;
- Após os ensaios elas são imediatamente levadas para os ensaios de microbiologia.

#### 5.2.6.

#### **Recuperação do Solo**

Após serem retiradas da mufla de Ball, e verificada quase nulidade em seus números de microrganismos e respectivas atividades metabólicas, dois tipos de

tratamento foram realizados, como tentativas de se melhorar a aptidão destas amostras de solo a novos seres vivos:

#### **5.2.6.1. Adição de água**

De acordo com estudos anteriores, Mano (2006) observou que a quantidade ótima de água destilada a ser adicionada às amostras de solo corresponde a 20% do seu teor de umidade.

#### **5.2.6.2. Adição de nutrientes inorgânicos**

Os nutrientes inorgânicos a serem introduzidos nas amostras de solo, sob as mesmas proporções, são os N-P-K (nitrogênio, fósforo e potássio), sob a forma de 2,26 g/kg de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  e 0,21 g/kg de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , segundo Evans et al (2004). As soluções são preparadas e esterilizadas em autoclave.

#### **5.2.6.3. Adição de nutrientes orgânicos**

O nutriente orgânico introduzido nas amostras de solo, após o 134º dia, corresponde à glicose.

### **5.3. Resultados e Comentários**

Para as amostras coletadas em janeiro de 2006, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 5.1 – Resultados das amostras de solo superficiais

| <b>Tipo</b>    | <b>Prof. (cm)</b> | <b>Teor de Umidade (%)</b> | <b>Teor de Matéria Orgânica (%)</b> | <b>UFC (nº microrganismos/ grama de solo seco)</b> | <b>FDA (µg fluoresceína/grama de solo seco)</b> |
|----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|---|
| <b>Solo #1</b> | 20                | 16,52                      | n/d                                 | $4,21 \times 10^6$                                 | 11,181  |
| <b>Solo #2</b> | 40                | 15,65                      | n/d                                 | $23,10 \times 10^6$                                | 5,020   |

Considera-se que estes sejam os dados naturais do solo do CE-01, indicando uma baixa concentração de microrganismos e uma baixa atividade metabólica. Isto pode ser, principalmente, pelo fato deste solo mais superficial ser típico de aterro e, portanto, com maior concentração de material inerte. Além disso, sua umidade é baixa, o que também dificulta a sobrevivência de seres vivos no local.

Para as sub-amostras extraídas do bloco de solo indeformado, não se têm os dados imediatamente após a aplicação de 400°C pela mufla. Porém, antes delas serem aquecidas, foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 5.2 – Resultados de sub-amostra do bloco de solo antes de ser levada à mufla

| Tipo  | Prof. (cm) | Teor de Umidade (%) | Teor de Matéria Orgânica (%) | UFC (nº microrganismos/ grama de solo seco) | FDA (µg fluoresceína/grama de solo seco) |
|-------|------------|---------------------|------------------------------|---|--|
| Bloco | 50-80      | 14,89               | 1,10                         | n/d   | n/d                                      |

Tanto o UFC, quanto o FDA não foram determinados para esta sub-amostra. Porém, para efeitos de comparação, podem ser considerados os dados do Solo #2, devido a sua maior proximidade com a faixa de solo de onde foi extraído o bloco (entre 50 e 80 cm) no CE-01.

Por outro lado, conforme se observou ao longo do Capítulo 2 do presente trabalho, tem-se o fato de que, quanto maior a profundidade do solo, menor é a presença de microrganismos, o que indica que, possivelmente, estas quantidade e atividade metabólica sejam ainda mais baixas.

Após as amostras terem sido deixadas por 24 horas na mufla, sob 400°C, considerou-se que os seus UFCs e FDAs eram nulos ou muito próximos de zero (abaixo dos limites de sensibilidade de detecção). Logo, iniciaram-se as tentativas de se recuperá-las introduzindo-se água e nutrientes inorgânicos (N-P-K), conforme mostra a Tabela 5.2 a seguir.

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

| Tipo de recuperação            | Nº dias após a queima | Teor de Umidade (%) | Teor de Matéria Orgânica (%) | UFC (nº microrganismos/ grama de solo seco) | FDA (µg fluoresceína/grama de solo seco) |
|--------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|---|--|
| 20% w                          | 01                    | 13,52               | n/d                          | 0,00367x10 <sup>6</sup>                     | 0,88                                     |
|                                | 08                    | 13,79               |                              | n/d   | 0,38                                     |
|                                | 19                    | 12,48               |                              | 3,44x10 <sup>6</sup>                        | 0,94                                     |
|                                | 33                    | 13,33               |                              | 3,73x10 <sup>6</sup>                        | 1,09                                     |
|                                | 119                   | 12,81               |                              | 4,22x10 <sup>6</sup>                        | 0,35                                     |
|                                | 134                   | n/d                 |                              | n/d   | 0,83                                     |
| 20% w + NPK                    | 01                    | 15,12               |                              | 0,024x10 <sup>6</sup>                       | n/d                                      |
|                                | 08                    | 15,42               |                              | n/d   | 0,78                                     |
|                                | 19                    | 14,21               |                              | 0,167x10 <sup>6</sup>                       | 0,98                                     |
|                                | 33                    | 13,97               |                              | 3,38x10 <sup>6</sup>                        | 1,49                                     |
|                                | 119                   | 13,82               |                              | 0,855x10 <sup>6</sup>                       | 0,23                                     |
|                                | 134                   | n/d                 |                              | n/d   | 2,77                                     |
| 20% w + NPK                    | 01                    | 14,41               |                              | n/d   | 2,04                                     |
|                                | 08                    | 13,95               |                              | n/d   | 0,73                                     |
|                                | 19                    | 13,70               |                              | 10,1x10 <sup>6</sup>                        | 1,00                                     |
|                                | 33                    | 13,70               |                              | n/d   | 1,20                                     |
|                                | 119                   | 12,82               |                              | 1,91x10 <sup>6</sup>                        | 0,35                                     |
|                                | 134                   | n/d                 |                              | n/d   | 2,73                                     |
| Valores médios de (20% w +NPK) | 01                    | 14,76               |                              | 0,024x10 <sup>6</sup>                       | 2,08                                     |
|                                | 08                    | 14,69               |                              | n/d   | 0,76                                     |
|                                | 19                    | 13,96               |                              | 0,167x10 <sup>6</sup>                       | 0,99                                     |
|                                | 33                    | 13,97               |                              | 3,38x10 <sup>6</sup>                        | 1,35                                     |
|                                | 119                   | 14,34               |                              | 1,38x10 <sup>6</sup>                        | 0,29                                     |
|                                | 134                   | n/d                 |                              | n/d   | 2,75                                     |

A seguir, foram plotados gráficos relacionando as determinações acima e o tempo, os quais estão apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2 a seguir.

Recuperação das Unidades Formadoras de Colônia

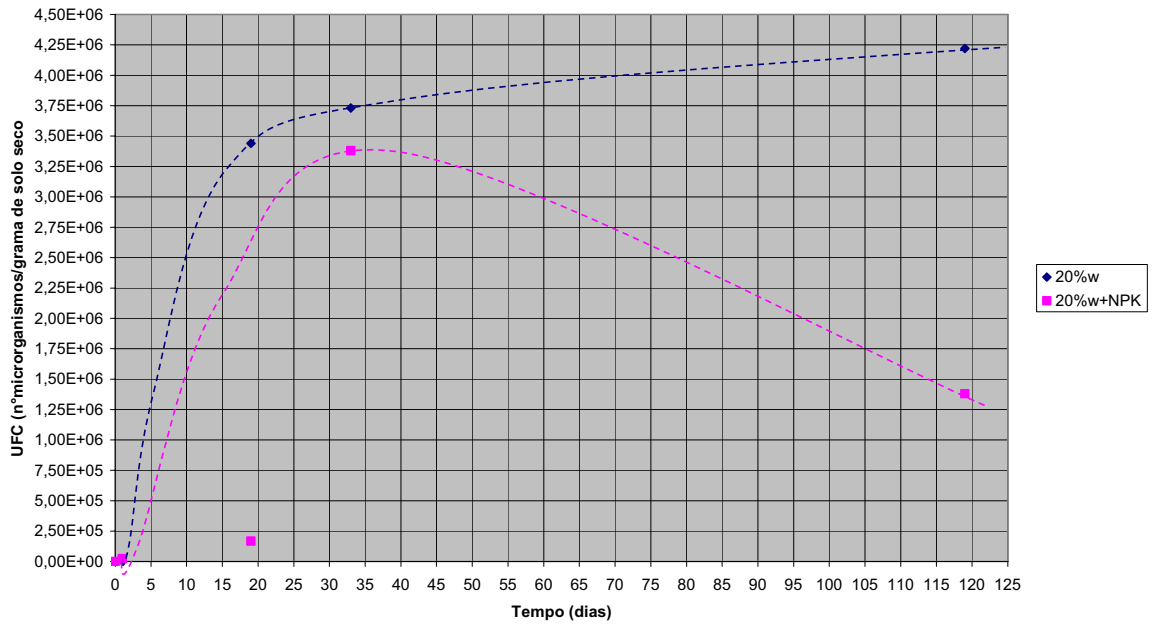


Figura 5.1 – Gráfico UFC versus tempo

Diacetato de Fluoresceína (FDA)

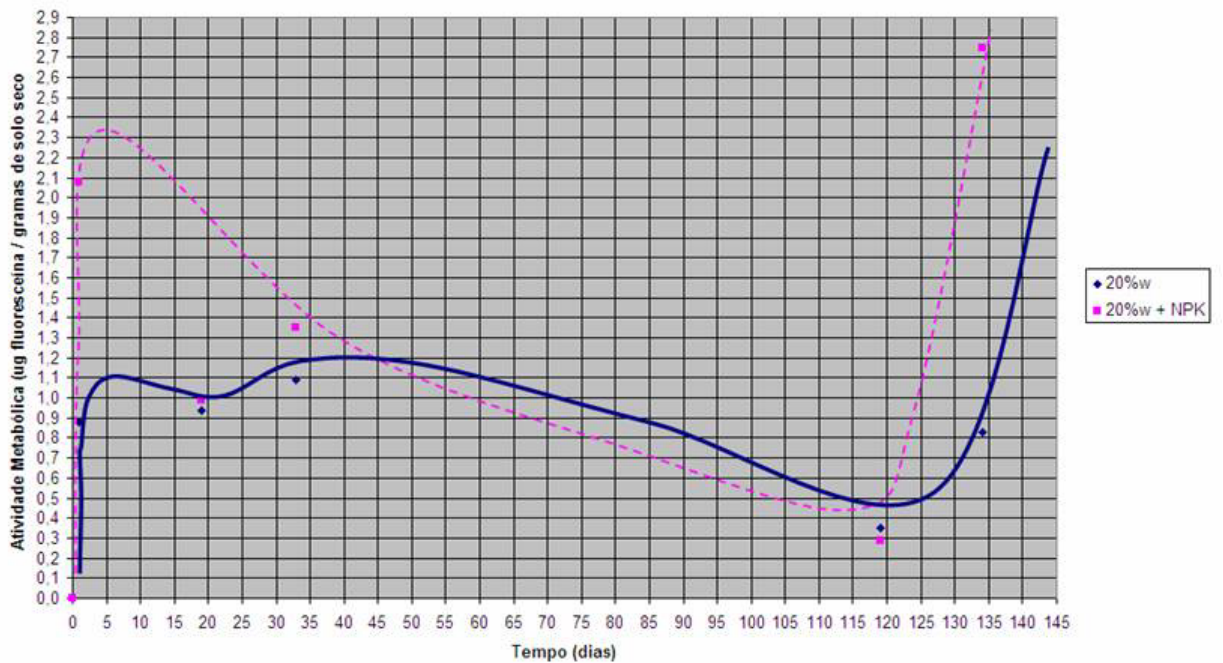


Figura 5.2 – Gráfico FDA versus tempo

Os gráficos indicam tendências de comportamento da microbiota nas amostras de solo. O primeiro indica que, apenas com água, o número de microrganismos tende a crescer ao longo do tempo, diferentemente do meio de cultura que contém água e NPK que, após mais de quatro semanas, tende a diminuir. Já as atividades metabólicas de ambos os meios decrescem após certo tempo, sendo que, quando só há água, essa atividade se mantém por mais tempo, indicando uma correspondência com o gráfico anterior. Porém, após a adição de nutrientes orgânicos (após o 134º dia), observou-se uma tendência em se recuperarem as atividades metabólicas do solo.

Alguns dados entre as datas marcadas não puderam ser determinados. Já os dados correspondentes aos 08 dias sofreram contaminação e, portanto, tiveram que ser descartados.

Apesar disso, ainda foi possível se obterem algumas conclusões acerca dos resultados apresentados.

1. De acordo com os valores de UFC, ocorre a revitalização do solo em aproximadamente 03 semanas e, após isso, uma tendência à estabilização;
2. De acordo com os resultados de FDA, inicialmente ocorre uma recuperação da atividade metabólica. Porém, com o passar do tempo, ocorre uma perda gradual desta atividade, o que pode ser explicado pela falta de matéria orgânica no solo, apesar dos microrganismos permanecerem viáveis no solo.
3. Após a injeção de glicose (nutrientes orgânicos), os níveis de FDA do solo se aproximaram muito dos observados no solo original.

Para próximas atividades, sugere-se que:

1. Teste de recuperação com nutrientes orgânicos (palha, restos vegetais, melaço, compostos orgânicos ou solo não tratado);
2. Teste de recuperação com combinações entre duas ou mais soluções, entre água, nutrientes inorgânicos e nutrientes orgânicos.



## 6 CONCLUSÕES

Como conclusões, inicialmente pode-se afirmar que a principal delas foi atingida: o novo sistema de dessorção térmica *in situ*, após as modificações implementadas (principalmente durante os ensaios deste trabalho), passou a funcionar satisfatoriamente.

O bastonete térmico, apesar dos problemas apresentados e resolvidos em grande parte, funcionou muito bem durante os 24 dias do último ensaio no CE-02, indicando que ele pode ser utilizado em outros ensaios de campo, inclusive em casos práticos de remediação de solos. Seu novo modelo lhe permite ser introduzido no solo em até 3,4 metros de profundidade, com possibilidade de aumentar este limite ainda mais desde que lhe sejam adquiridas novas hastes.

As sondas medidoras de temperatura, apesar de comportarem-se bem durante os ensaios, apresentaram condução de calor quando atingidas diretamente pelos raios solares ou pelo calor do próprio bastonete, indicando que os seus termopares podem sofrer influências nas aferições durante estes momentos. A solução para isso é o isolamento dos termopares com um material que transmita menos calor do que o aço. Sob o modelo atual, elas podem ser inseridas em até 3,0 metros de profundidade, embora também haja a possibilidade de se aumentar este limite.

Este sistema de dessorção térmica *in situ* necessita de uma nova fonte de energia elétrica portátil e que possa funcionar continuamente, para poder ser levado a campo. Isto porque o gerador utilizado não suportou a demanda energética contínua dos ensaios realizados, além de ter se tornado relativamente caro e difícil de operar.

Os demais componentes do sistema de dessorção térmica *in situ* utilizados (controlador de temperatura, unidade de aquisição e armazenamento de dados, bomba/compressor de ar) funcionaram satisfatoriamente.

Com relação aos ensaios de campo para aplicação da dessorção térmica, conclui-se que:

1. O solo areno-argiloso do CE-01 reteve mais calor em seus pontos mais próximos ao bastonete térmico, enquanto o solo areno-siltoso do CE-02 fez com que a influência do bastonete chegasse com maior intensidade em pontos mais distantes, o que é explicado pela condutividade térmica de ambos os materiais.
2. A umidade e o grau de saturação do solo são fundamentais para a transferência de calor. Quanto maiores estes índices, mais eficiente será a transmissão de calor no solo. Caso estes índices sejam baixos, o calor se perderá com maior facilidade, reduzindo esta eficiência.
3. Grandes volumes de solo ou solos sem limites físicos ou isolamentos térmicos (como o mini-forno do LGMA/PUC-Rio utilizado por Baptista, 2004), ou seja, tendendo para o infinito, nunca serão bons condutores de calor no caso da aplicação de apenas um bastonete térmico, mesmo em pontos muito próximos a ele. Nestes meios, a energia se perde com muita facilidade.

Com relação à influência da aplicação do bastonete nos solos do CE-01 e CE-02, pode-se concluir que, como as temperaturas em pontos externos ao aquecedor não chegaram a valores altos (maiores do que 100°C) durante os ensaios, as suas estruturas foram mantidas incólumes, principalmente com relação aos argilo-minerais destes locais. Só o que pode ter havido foi uma perda de água adsorvida por evaporação.

Com relação às simulações da dessorção térmica em laboratório para verificação da influência na microbiota, concluiu-se que, após 24 horas sob 400°C, a concentração de microrganismos presentes no solo extraído do CE-01 fica abaixo dos limites de sensibilidade de detecção.

Durante as tentativas de recuperação deste solo em função da aptidão à existência de novos seres vivos concluiu-se que, apenas adicionando-se 20% de teor de umidade, já se observa uma tendência de recuperação de UFC – Unidades Formadoras de Colônia em aproximadamente 03 semanas, e de atividade metabólica quase que instantaneamente. Após algum tempo (menos

de 130 dias), esta concentração de seres vivos aparenta se manter estável, enquanto a atividade metabólica tende a decrescer significativamente, possivelmente devido à falta de matéria orgânica.

No caso de se adicionarem ao solo 20% de teor de umidade e nutrientes inorgânicos (nitrogênio, fósforo e potássio), há uma tendência indicando que a UFC se recupere com menos intensidade e mais lentamente. Por outro lado, a atividade metabólica se apresenta muito mais alta do que no caso anterior, apesar de decrescer após alguns dias (também devido à falta de nutrientes orgânicos).

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

São apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1. Aplicação da dessorção térmica em campo utilizando-se dois ou mais bastonetes iguais a este.
2. Utilização deste novo sistema de dessorção térmica *in situ* para se tentar remediar solos contaminados por compostos orgânicos.
3. Análise mais detalhada da influência da dessorção térmica na estrutura do solo.
4. Análise mais detalhada da recuperação do solo em função da aptidão à existência de novos seres vivos após a aplicação da dessorção térmica, onde se incluem: adição de matéria orgânica de fácil degradação e adição de nutrientes orgânicos (*i.e.* palha, restos vegetais, compostos, solo não tratado e etc).
5. Análises numéricas com o objetivo de se tentar simular o fluxo de calor no solo a partir de bastonetes térmicos.

## BIBLIOGRAFIA

ADAM, G. & DUNCAN, H. Development of a Sensitive and Rapid Method for Measurement of Total Microbial Activity Using Fluorescein Diacetate (FDA) in Range of Soils. *Soil Biology & Biochemistry*. 2001. pp 943-951.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. Relatório Anual. Versão eletrônica: [http://www.anp.gov.br/conheca/relatorio\\_anual.asp](http://www.anp.gov.br/conheca/relatorio_anual.asp) .

ALEXANDER, M. Introduction to Soil Microbiology. 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley & Sons Inc., 1977. 467 p.

ANTUNES, F. S. Comunicação pessoal. 2005. Professor Franklin dos Santos Antunes, Geólogo Livre-Docente pela UFRJ. Especialista em intemperismo de rochas metamórficas, perfis de alteração, propriedades físico-químicas do solo, interpretação de mapas pedológicos para fins geotécnicos, dentre outros assuntos. Atualmente, professor do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro ([franklin@civ.puc-rio.br](mailto:franklin@civ.puc-rio.br)).

ARARUNA JR, J. T. Comunicação pessoal. 2006. Professor José Tavares Araruna Júnior, Doutor pela Newcastle University em 1995. Especialista em geotecnia ambiental, remediação de solos contaminados e ensaios de laboratório ([araruna@civ.puc-rio](mailto:araruna@civ.puc-rio)).

BAKER, R. S., KUHLMAN, M. A Description of the Mechanisms of a In Situ Thermal Destruction (ISTD) Reactions. 2<sup>nd</sup> International Conference on Oxidation and Reduction Technologies for Soil and Groundwater, Toronto, Ontario, Canada. 2002.

BAKER, R. S. In Situ Thermal Dessorption: Remediation of Contaminated Soil by Thermal Conduction and Vacuum. In Situ Thermal Conference – Technical Seminar Boston, MA, June, 2000. 17 p.

BAKER, R. S., BIRSCHENK, J. M. (TerraTherm Inc.). Publicação TerraTherm. 2002. 5 p.

BAKER, R. S., LACHANCE, J., KRESGE, M. W., BUKOWSKI, R. J., GALLIGAN, J. P., PARKER, K. & DUTEAU, C. M. (TERRATHERM, INC.), KUHLMAN, M. (MK TECH SOLUTIONS, INC.), WHITE, E. H. In Situ Thermal Destruction (ISTD) of MGP Waste in a Former Gasholder: Design and Installation. By TERRATHERM, 2004. 9 p.

BAPTISTA, L. J., Aplicação do Bastonete Térmico no Processo de Dessorção Térmica para Remediação In Situ de Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004. 206 p.

BICALHO, K. V. Dissolução de Gasolina em Presença de Água e Etanol. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 1997.

BIERSCHENK, J. M., BAKER, R. S., BUKOWSKI, R. J., PARKER, K., YOUNG, R. (TERRATHERM, INC.), KING, J., LANDLER, T. (SOUTHERN CALIFORNIA EDISON, ROSEMEAD, CA, USA) & SHEPPARD, D. (LOPEZ & ASSOCIATES ENGINEERS, LA PUENTE, CA, USA). Full-scale 1<sup>st</sup> Phase of ISTD Remediation At Alhambra, California Wood Treatment Site. Publicação eletrônica: <http://www.terratherm.com/resources/techpapers.htm>. 2004. 9 p.

BROCK, T.D., MADIGAN, M.T., MARTINKO, J. M., PARKER, J. Biology of Microorganisms. 7<sup>th</sup> Edition. Prentice Hall, 1994.

CONLEY, D. M. (Haley & Aldrich of New York), HANSEN, K. S. (Groundo Technology, Inc.), STEGEMEIER, G. L. (GLS Engineer Inc.), VINEGAR, H. J. (Shell E&P Technology Company), FOSSATI, F. R. (Shell Oil Company), CARL, F. G. (Shell Technology Ventures), CLOUGH, H. F. (Hart Crowser, Inc.). In Situ Desorption of Refined Petroleum Hydrocarbons from Saturated Soil. 2000. 8 p.

CATALLO, W. J., PORTIER, R. J. Water Sciences Technology. Oxford, Mar/1992. V. 25, N. 3, pp. 229-237.

CONSTITUIÇÃO FEDERAL DO BRASIL, 1988. Art. 225, §1º, IV.

CUMMINGS, J., Thermal NAPL Remediation. In Situ Thermal Conference – Technical Seminar Boston, MA, June, 2000.

de CAMPOS, T. M. P. Comunicação pessoal. 2006. Tácio Mauro Pereira de CAMPOS, Doutor pelo Imperial College em 1984, especialista em solos residuais não saturados, estabilidade de encostas, disposição de resíduos, transporte de contaminantes, ensaios de laboratório e de campo.

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. QMCWEB, 1999. Exemplar n° 4. Versão eletrônica: <http://www.qmc.ufsc.br/quimica/index.html>.

DETTMER, K. A. Discussion of the Effects of Thermal Remediation Treatments on Microbial Degradation Processes. National Network of Environmental Management Studies Fellow. 2002. pp. 25.

DICIONÁRIO HOUAISS da Língua Portuguesa. Versão eletrônica: <http://www.dicionariohouaiss.com.br>.

DUARTE, A. P. L. Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

DUARTE, A. P. L., de CAMPOS, T. M. P., ARARUNA JR., J. T. Determinação e Avaliação das Propriedades Térmicas de Solos Tropicais. XIII COBRANSEG. 2006. Volume 01, pp. 125 – 130.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Publicações eletrônicas: <http://www.epa.com>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Off-Gas Treatment Technologies for Soil Vapor Extraction Systems: State of the Practice. Março, 2006. 129 p.

EVANS, F. F., ROSADO, A. S., SEBÁSTIAN, G. V., CASELLA, R. MACHADO, P. L., HOLMSTRON, O. A., KJELLEBERG, S., VAN ELSAS, J. D., SELDIN, L. Impact of Oil Contamination and Biostimulation on the diversity of Indigenous Bacterial Communities in Soil Microcosms. FEMS Microbiology Ecology. 2004. pp 295 – 305.

FUNDAÇÃO GEO-RIO. Alerta Rio. Relatório de chuvas acumuladas. Dados de 2005 e 2006. Versão eletrônica: <http://www.rio.rj.gov.br/alertario/>

GODOY, C., Souza, E. A., PAULA E SILVA, E. M. Tensões Residuais em Conjugados Processados por Asperção Térmica e Tratados Termicamente. Revista Matéria. Versão eletrônica: (<http://www.materia.coppe.ufrj.br/mirror/index.html> )

HANSEN, K. S., CONLEY, D. M. (TerraTherm Environmental Services Inc.), VINEGAR, H. J., COLES, J. M., MENOTTI, J. L. (Shell Exploration & Production Technology Company), STEGEMEIER, G. L. (GLS Engineering, Inc). In Situ Therma Desorption of Coal Tar. IGT/GRI International Symposium on Environmental Biotechnologies and Site Remediation Technologies. Orlando, Florida. 1998. 22 p.

HEATH, W. Thermally Stimulated Degradation of Contaminants as an Emerging Application for Six Phase Heating™. Publicação eletrônica: <http://www.cesiweb.com/studies.htm>. 2001. 12 p.

JOHANSEN, O. Thermal Conductivity of Soils. PhD Thesis. Norway, USA. Corps of Engineers. ADA044002. 1975.

JORGE, C. G., Estudo da Influência da Temperatura Ótima de Dessorção Térmica na Remediação de Solos Contaminados. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 1999.

LEE, J. K., PARK, D., KIM, B. U., DONG, J. I., LEE, S. Remediation of Petroleum-Contaminated Soils by Fluidized Thermal Desorption. Waste Management 18. 1998. pp 503-507.



LEI FEDERAL N° 6.938 de 1981. Política Nacional de Meio Ambiente.

LEI FEDERAL N° 9.605 de 1998. Lei dos Crimes Ambientais.

MANNI, A., MASSACCI, P., PIGA, L., SERRANTI, S. Screening and Thermal Desorption for Remediation of a Sediment Polluted by the Mercury of a Chlor-Alkaly Plant. *Soil & Sediment Contamination*, 13. 2004. pp 391-404.

MANO, D. M. M. Comunicação pessoal. 2006. Professora Denise Maria Mano Pessoa, Doutora em Microbiologia pela UFRJ,. Especialista em microbiologia ambiental, bio-degradação, bio-remediação, engenharia ambiental, dentre outros assuntos. Atualmente, professora do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. ([dmano@civ.puc-rio.br](mailto:dmano@civ.puc-rio.br)).

MERINO, J. PINA, J., ERRAZU, A. F., BUCALÁ, V. Fundamental Stdy of Thermal Treatment of Soil. *Soil and Sediment Contaminant* 12. 2003. pp 417-441.

MITCHELL, J. K. *Fundamentals of Soil Behavior*. 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1993. pp 228-292.

MOREIRA, F. M. S., SIQUEIRA, J. O. *Microbiobogia e Bioquímica do Solo*. Editora UFLA. 2002

NORRIS, G., AL-DHAHIR, Z., BIRNSTINGL, J., PLANT, S. J., CUI, S., MAYELL, P. A Case Study of the Management and Remediation of Soil Contaminated with Polychlorinated Byphenyls. *Engineering Geology* 53. 1999. pp. 177-185.

NUCLEO INOX. Coletânea de Informações Técnicas – Aço Inoxidável. Comparison of Physical Properties of Different Materials. Versão Eletrônica <http://www.nucleoinox.org.br/>

PIRES, P. J. M., Desenvolvimento de um Sistema de Dessorção Térmica In Situ para Remediação de Materiais Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004. 189 p.

PORTES, V. L. O., Aplicação da Dessorção Térmica na Remediação dos Resíduos da Limpeza de Praias Atingidas por Derrames de Óleo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

RABE, C., SAYÃO, A. S. F. J., NUNES, A. L. L. S. Estudo Experimental do Efeito da Temperatura em Solos. Revista Solos e Rochas. Vol. 25. N°01. Jan-abr 2003. pp 69-86.

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Ed. Manole Ltda. 2004. pp 233-240.

RESOLUÇÃO CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente N° 01 de 1986.

RESOLUÇÃO CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente N° 09 de 1987.

RESOLUÇÃO CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente N° 237, de 1997.

ROMEIRO, S. B. B. Química na Siderurgia. Área de Educação Química do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 39 p.

SHIMIZU, T., SHIGENO, Y., YABE, S. & AOKI, M., Study on Effects of Soil Vapor Extraction with Soil Heating in Low Permeable Ground. IV ICEG, Proceedings, 2002. pp. 126-131.

de SOUZA PINTO, C. Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina de Textos. 2000. pp 16-20.

SRACEK, O. Aplicações de Modelagem Geoquímica no Estudo do Transporte de Contaminantes em Meios Geológicos. Curso promovido pelo Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2005.

SRACEK, O. Comunicação pessoal. 2005.

STEGEMEIER, G. L., VINEGAR, H.J. Hazardous & Radiactive Waste Treatment Technologies Handbook, Ch. 4.6-1, Ed. Chang H., 2001. 22 p.

TERRATHERM, INC®. Publicações eletrônicas:  
<http://www.terratherm.com/resources/techpapers.htm> e  
<http://www.terratherm.com/projects/photos.htm> .2006

TERRATHERM, INC®. Statement of Qualifications for Soil Remediation Technology In-Situ Thermal Desorption. 2005. 22 p

VIANA, A. F., VARGAS Jr., E. A., de CAMPOS, T. M. P., ARARUNA Jr., J. T. Modelagem Física do Transporte de Gasolina Pura e da sua Mistura com Etanol em Meios Porosos Não-Saturados. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO2003. CD-ROM.

VIANA, A. F. O Uso de Ferramentas de Gestão Ambiental na Solução da Problemática da Contaminação de Solos e Águas Subterrâneas Proveniente de Postos de Combustível no Brasil. Monografia para MBA em Gestão Ambiental. Fundação Getúlio Vargas do Rio de Janeiro, 2004. 78 p.

WALCACER, F. & GRAÇA COUTO, O. Legislação Ambiental (Noções de Direito Ambiental). Fundação Getúlio Vargas do Rio de Janeiro, 2003. 80 p.

WOOD, P. A. Remediation Methods for Contaminated Sites In: Contaminated Land and its Reclamations. Thomas Telford. London, 1997. pp 47-71.

## ANEXO I

Neste anexo, encontram-se as curvas granulométricas das amostras deformadas (Figuras A.I.1 a A.I.18), obtidas a partir das sondagens 01, 02 e 03 (S-01, S-02 e S-03), realizadas no campo experimental da **EMBRAPA Solos** (CE-01), e das amostras provenientes das dependências externas do **LGMA / PUC-Rio** (CE-02).

Os ensaios, que foram realizados no **Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente – LGMA** da **Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio** conforme as normas brasileiras, consistiram em:

1. Análise granulométrica conjunta;
2. Curva granulométrica;
3. Limites de consistência, ou de Atterberg;
4. Densidade dos grãos.

Suas respectivas planilhas encontram-se disponíveis em meio eletrônico e podem ser fornecidas a qualquer momento.

### Curva Granulométrica

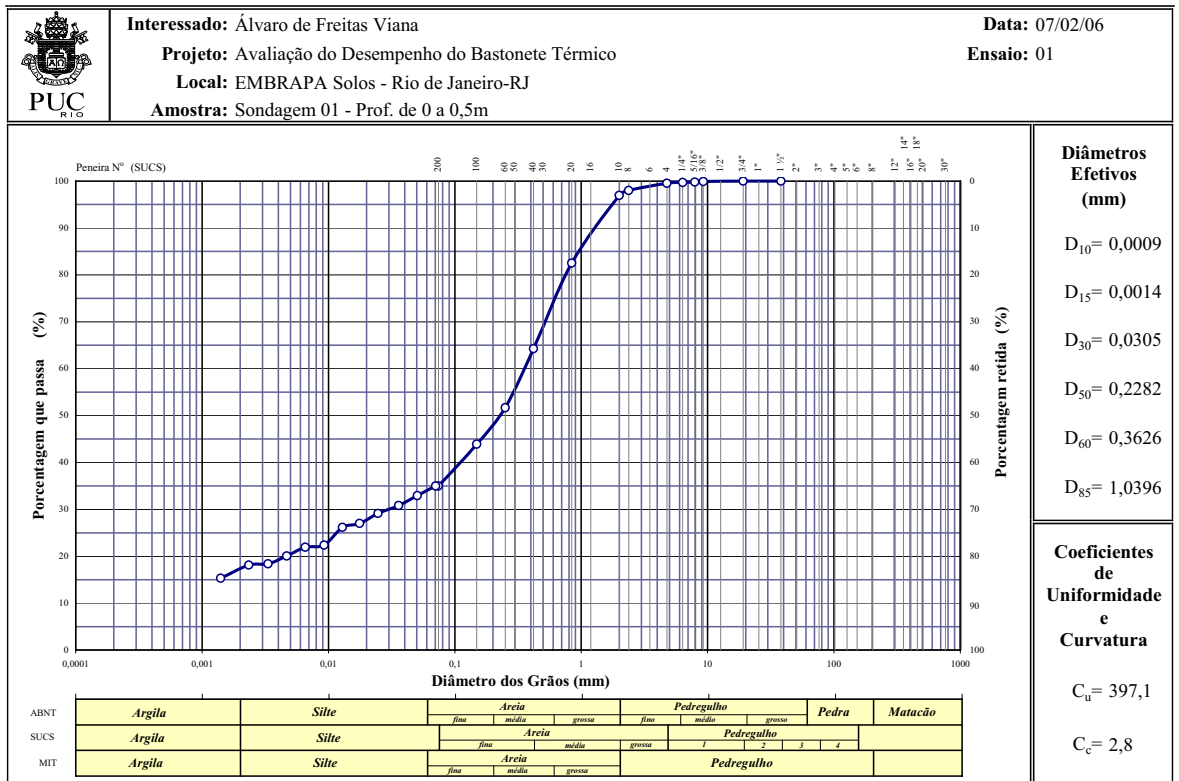


Figura A.I.1 – Sondagem 01, de 0 a 0,5m

### Curva Granulométrica

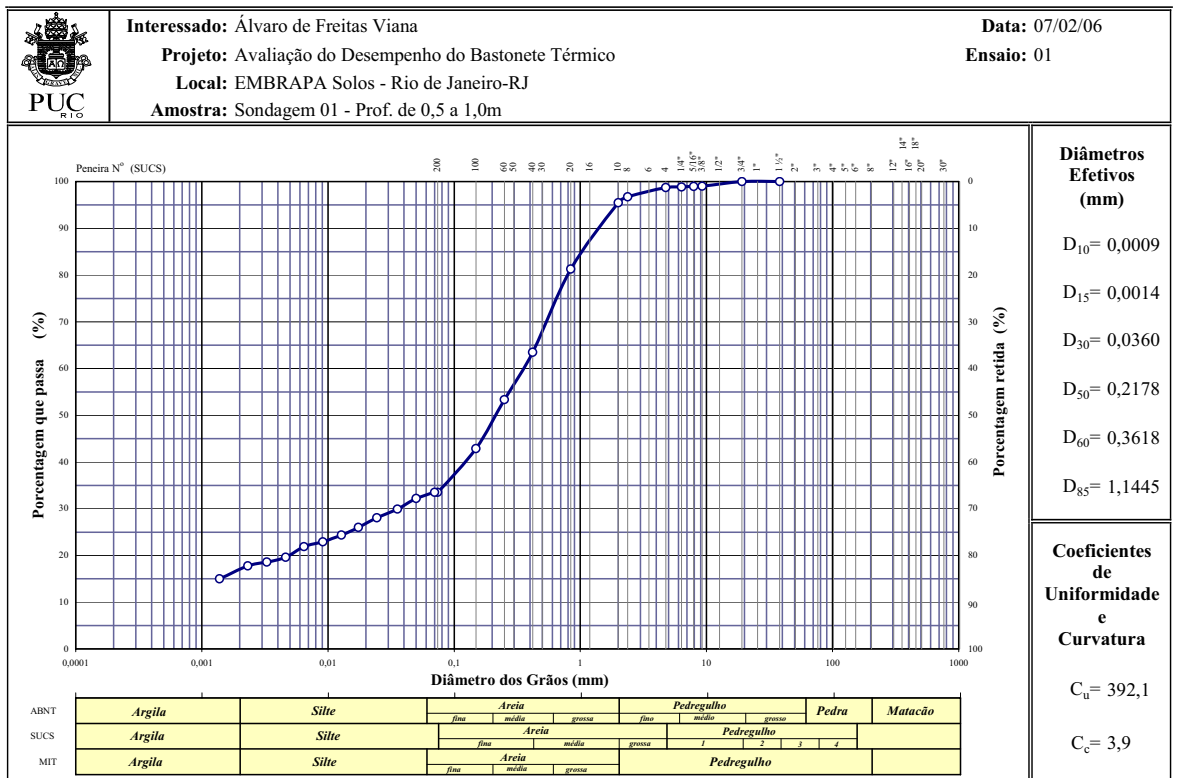


Figura A.I.2 – Sondagem 01, de 0,5 a 1,0m

### Curva Granulométrica

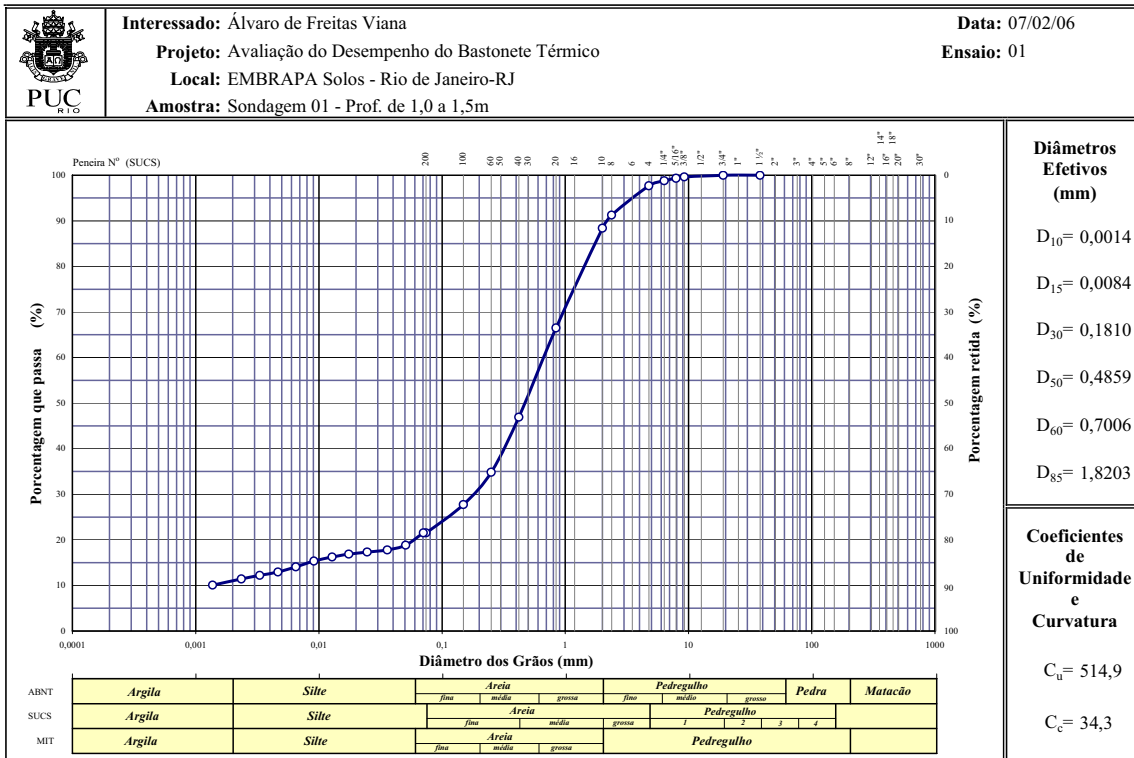


Figura A.I.3 – Sondagem 01, de 1,0 a 1,5m

### Curva Granulométrica

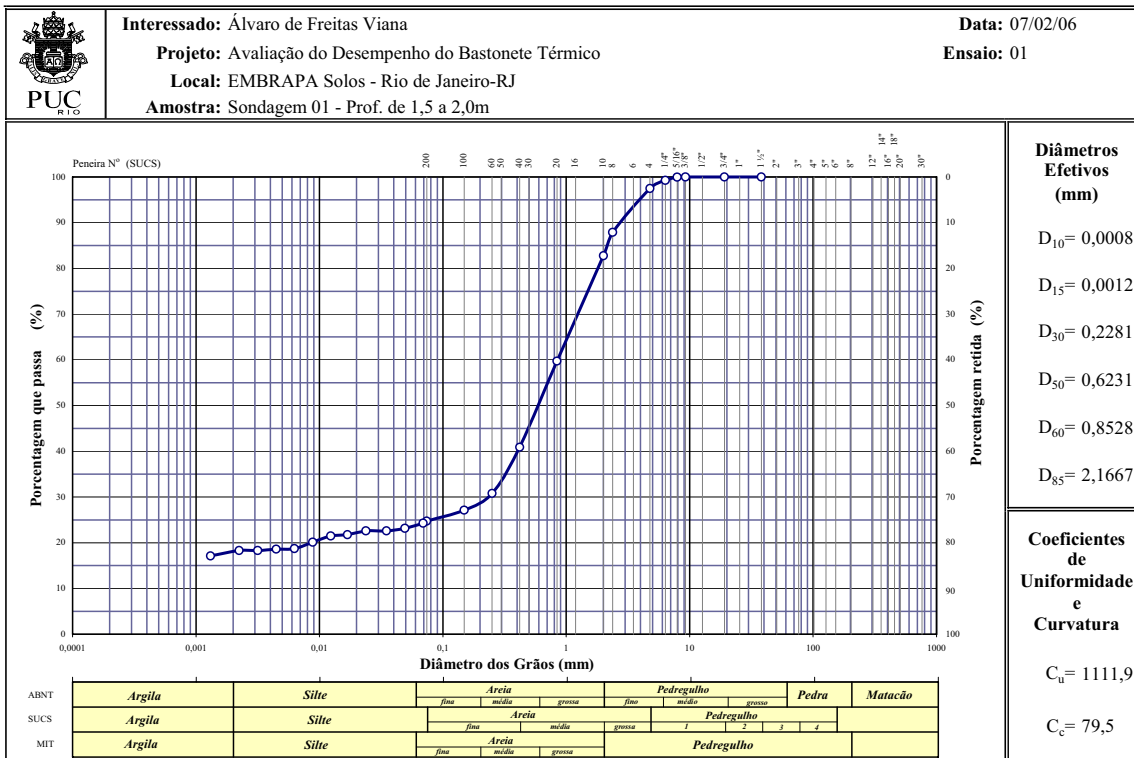


Figura A.I.4 – Sondagem 01, de 1,5 a 2,0m

### Curva Granulométrica

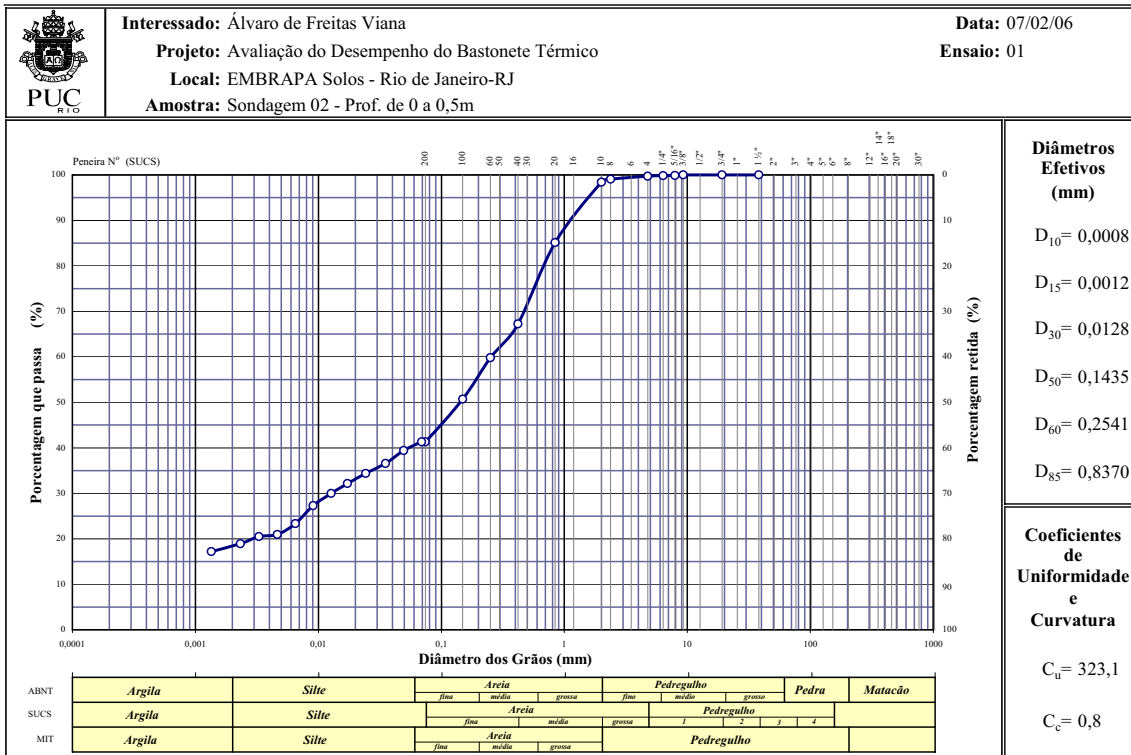


Figura A.I.5 – Sondagem 02, de 0 a 0,5m

### Curva Granulométrica

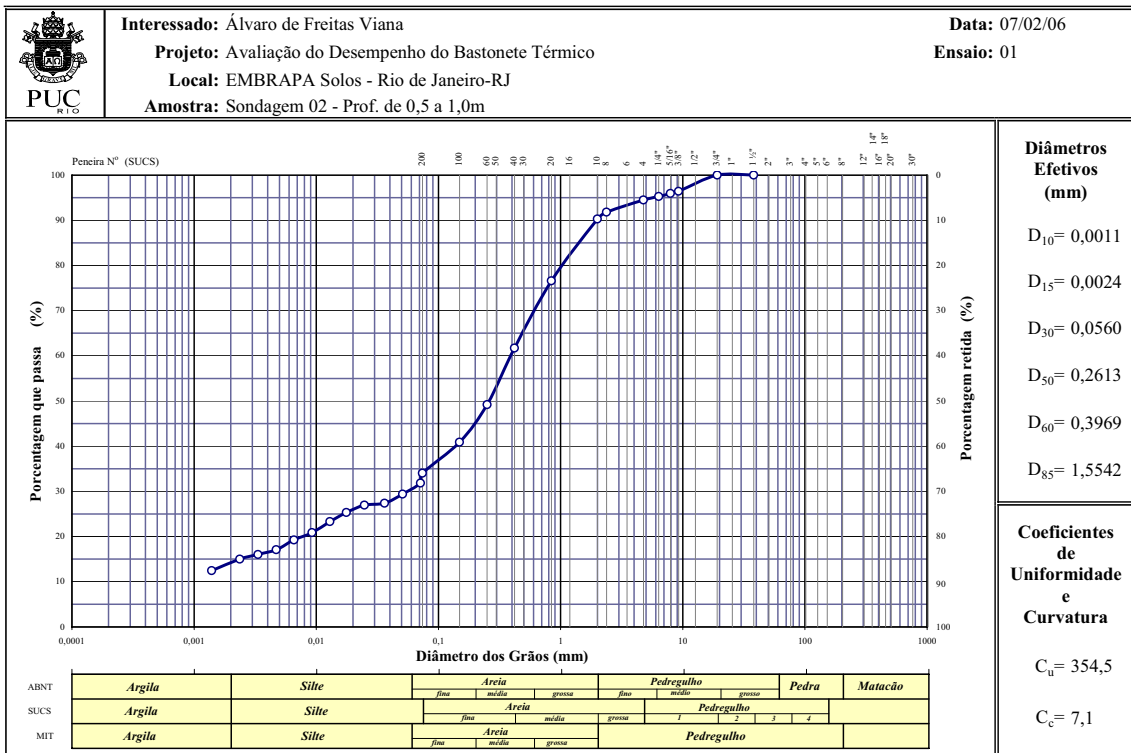


Figura A.I.6 – Sondagem 02, de 0,5 a 1,0m

### Curva Granulométrica

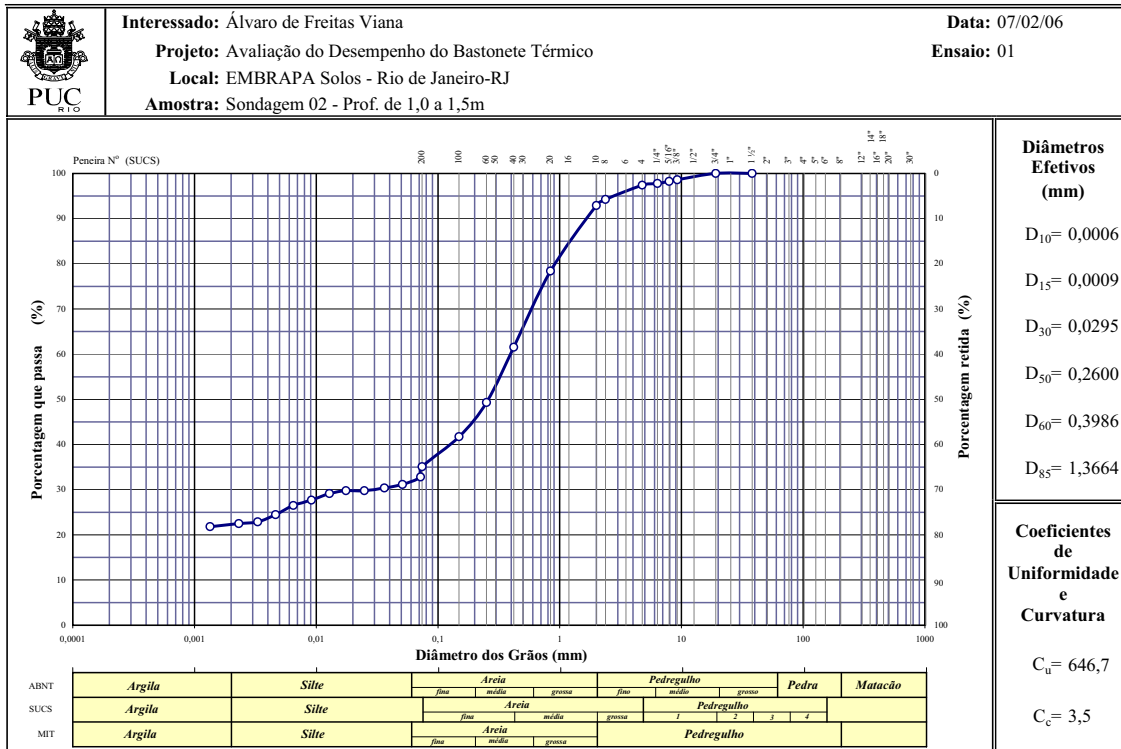


Figura A.I.7 – Sondagem 02, de 1,0 a 1,5m

### Curva Granulométrica

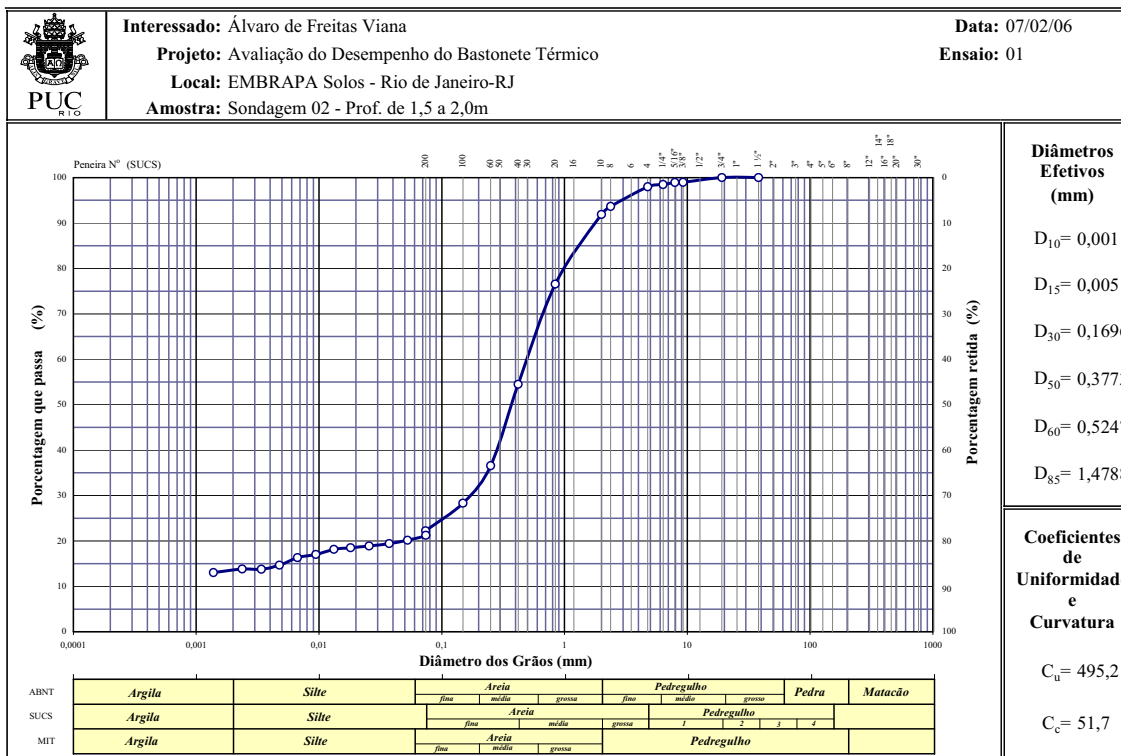


Figura A.I.8 – Sondagem 02, de 1,5 a 2,0m



### Curva Granulométrica

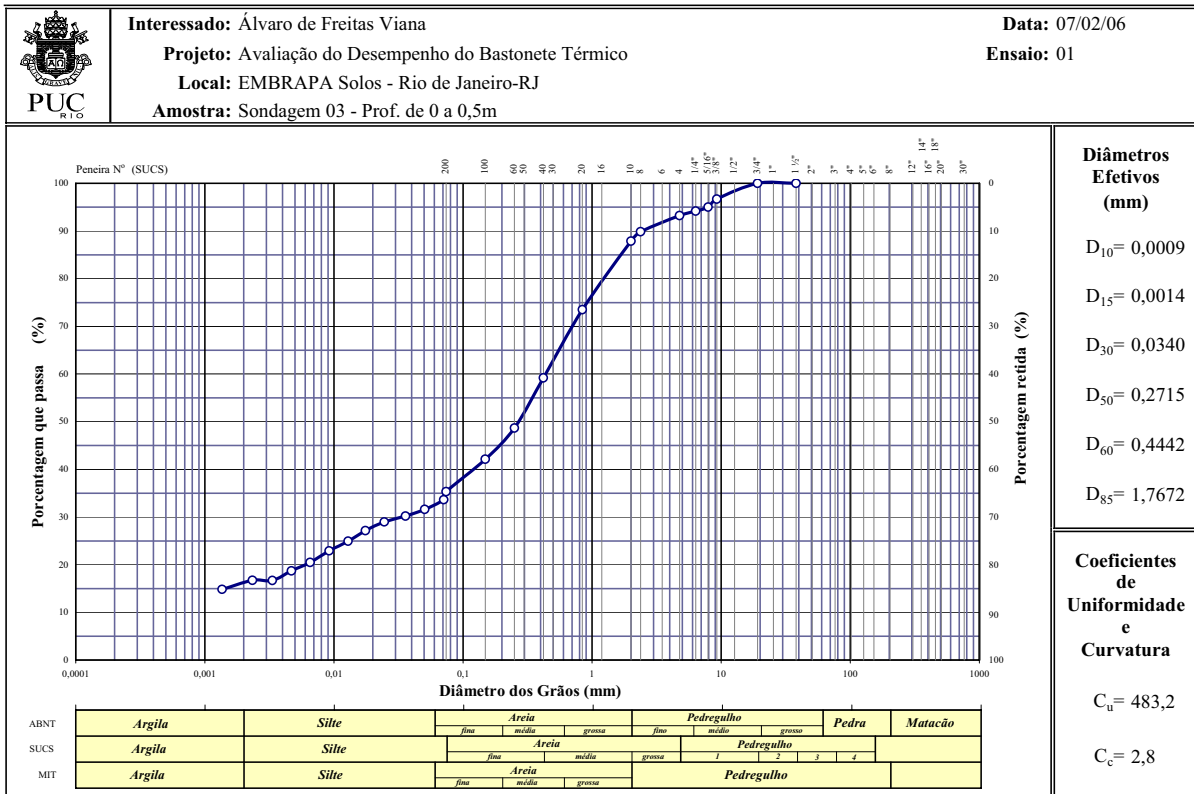


Figura A.I.9 – Sondagem 03, de 0 a 0,5m

### Curva Granulométrica

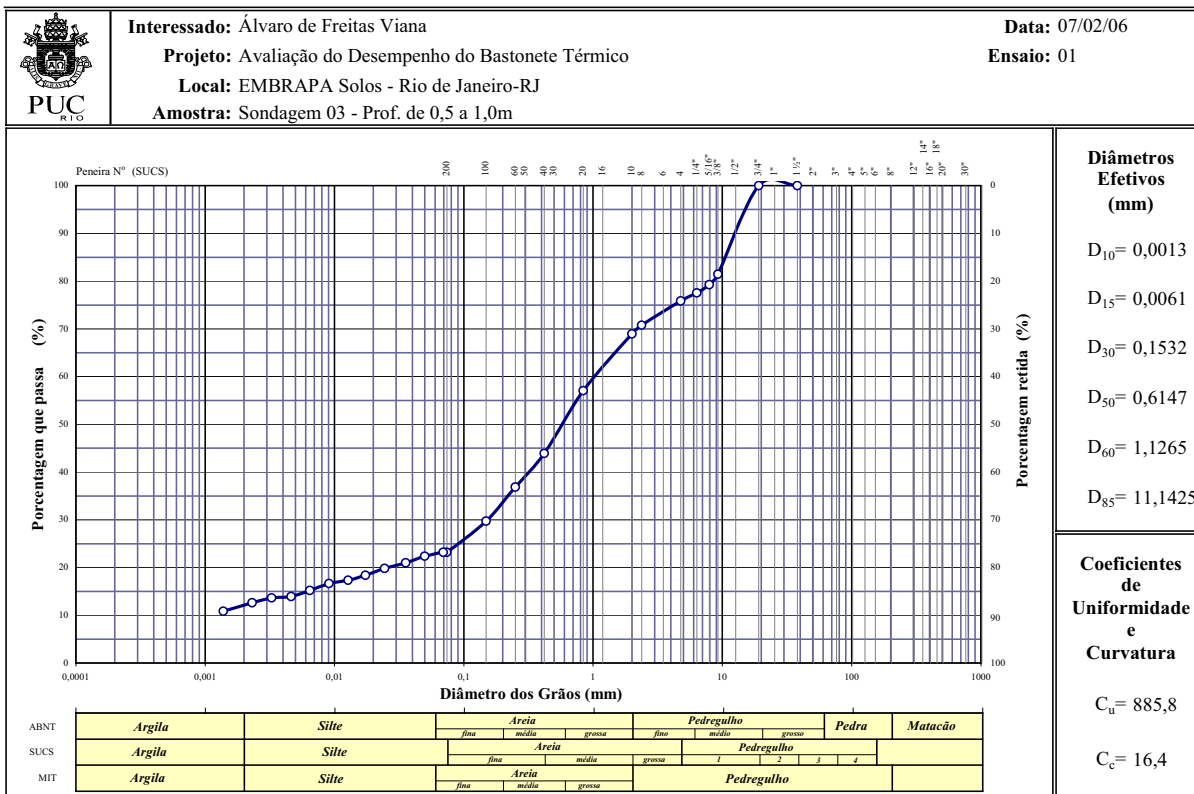


Figura A.I.10 – Sondagem 03, de 0,5 a 1,0m

### Curva Granulométrica

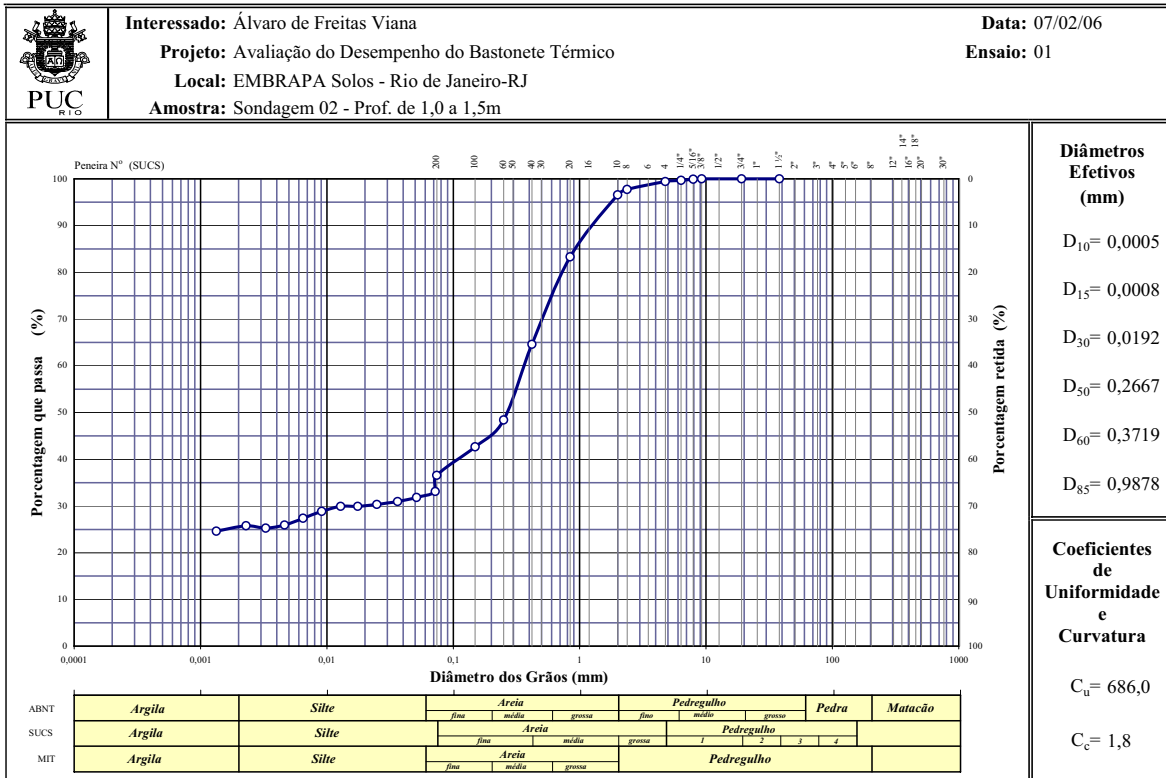


Figura A.I.11 – Sondagem 02, de 1,0 a 1,5m

### Curva Granulométrica

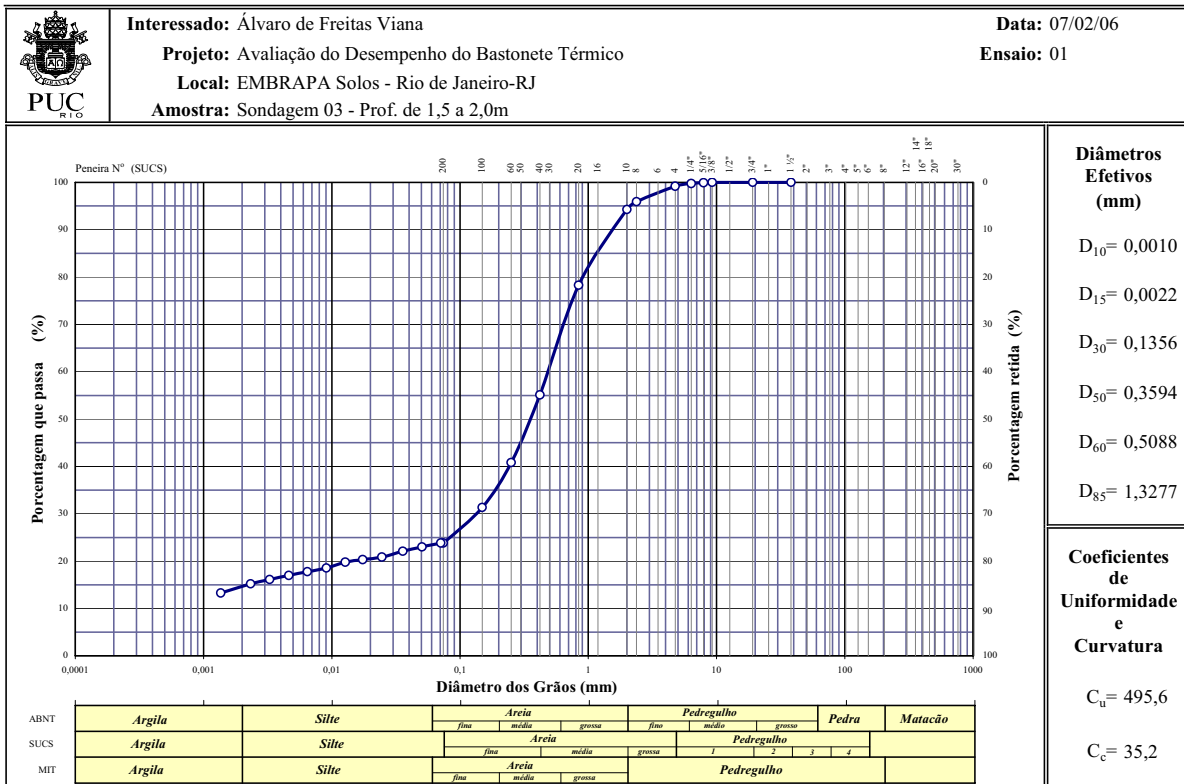


Figura A.I.12 – Sondagem 03, de 1,5 a 2,0m

### Curva Granulométrica

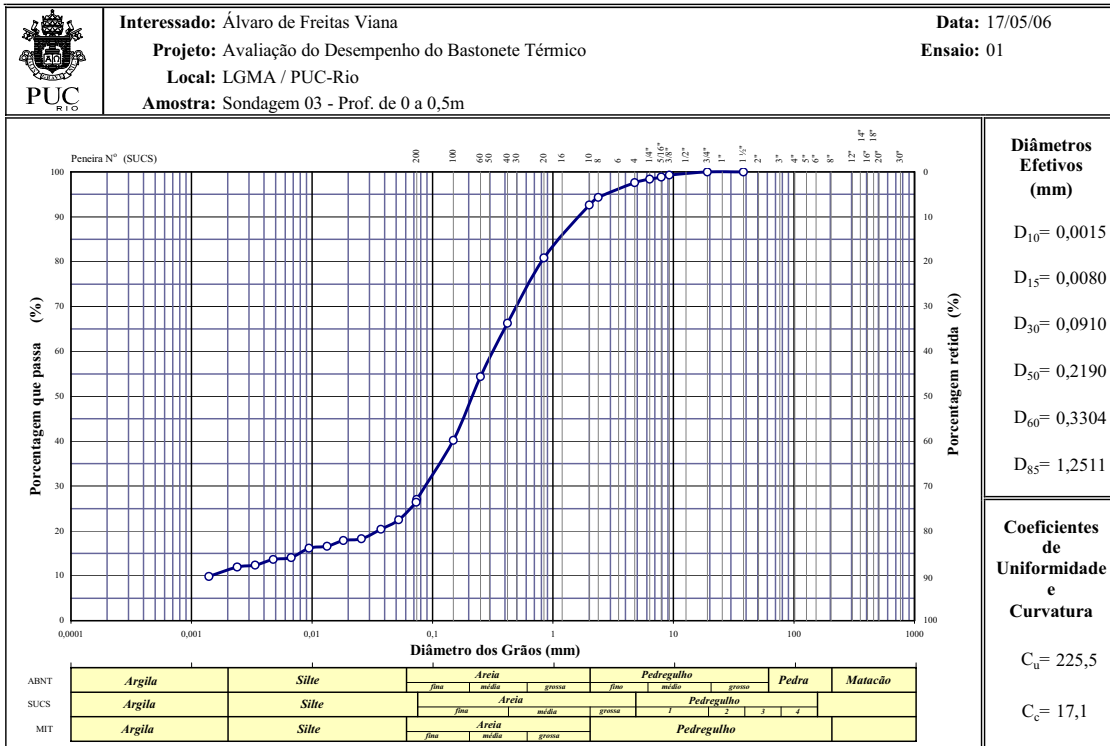


Figura A.I.13 – Sondagem 03, de 0 a 0,5m

### Curva Granulométrica

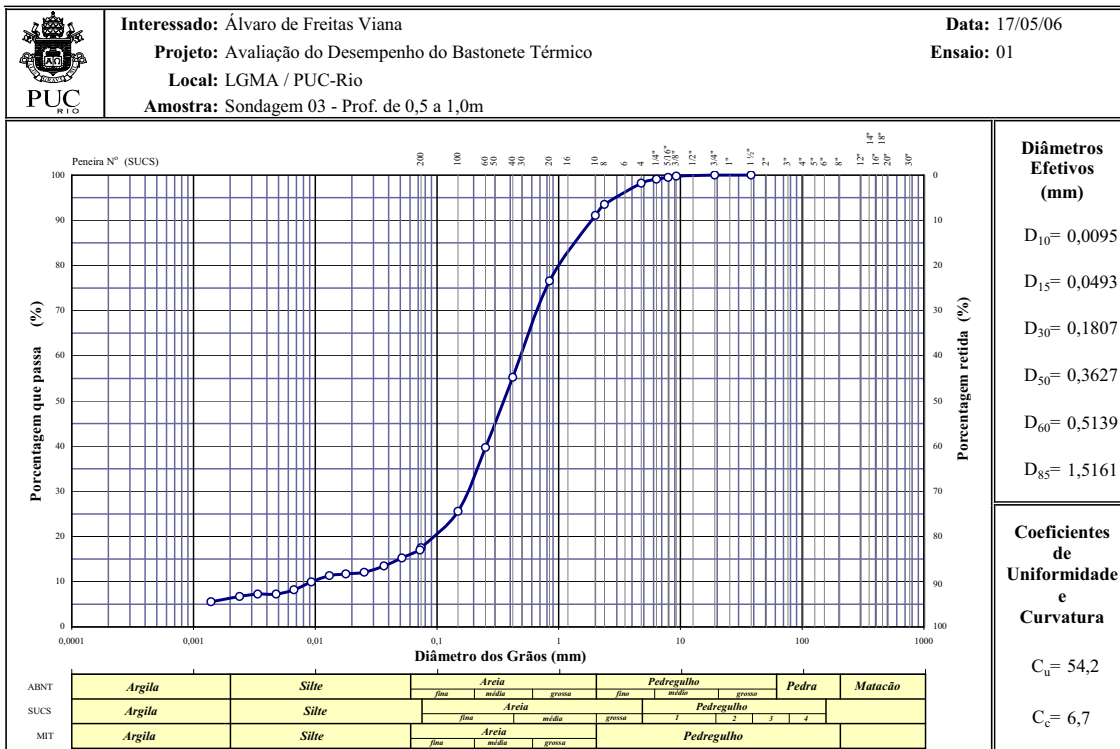


Figura A.I.14 – Sondagem 03, de 0,5 a 1,0m

### Curva Granulométrica

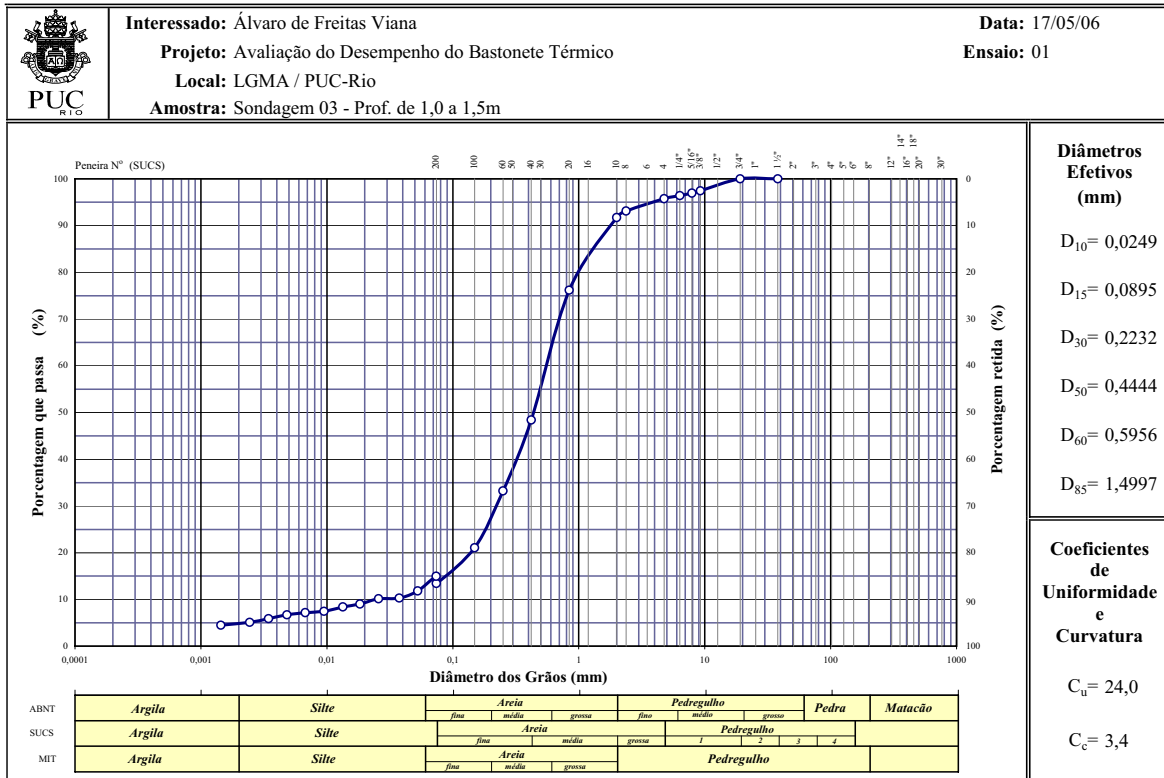


Figura A.I.15 – Sondagem 03, de 1,0 a 1,5m

### Curva Granulométrica

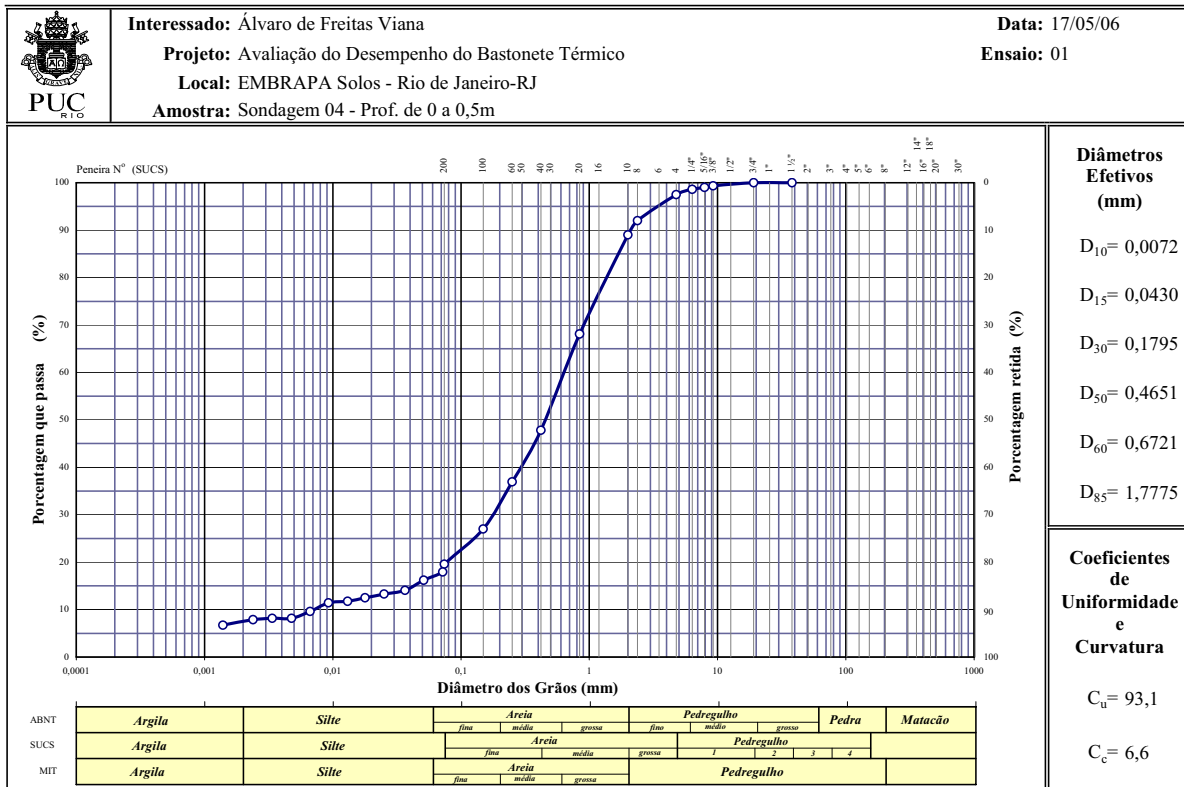


Figura A.I.16 – Sondagem 04, de 0 a 0,5m

### Curva Granulométrica

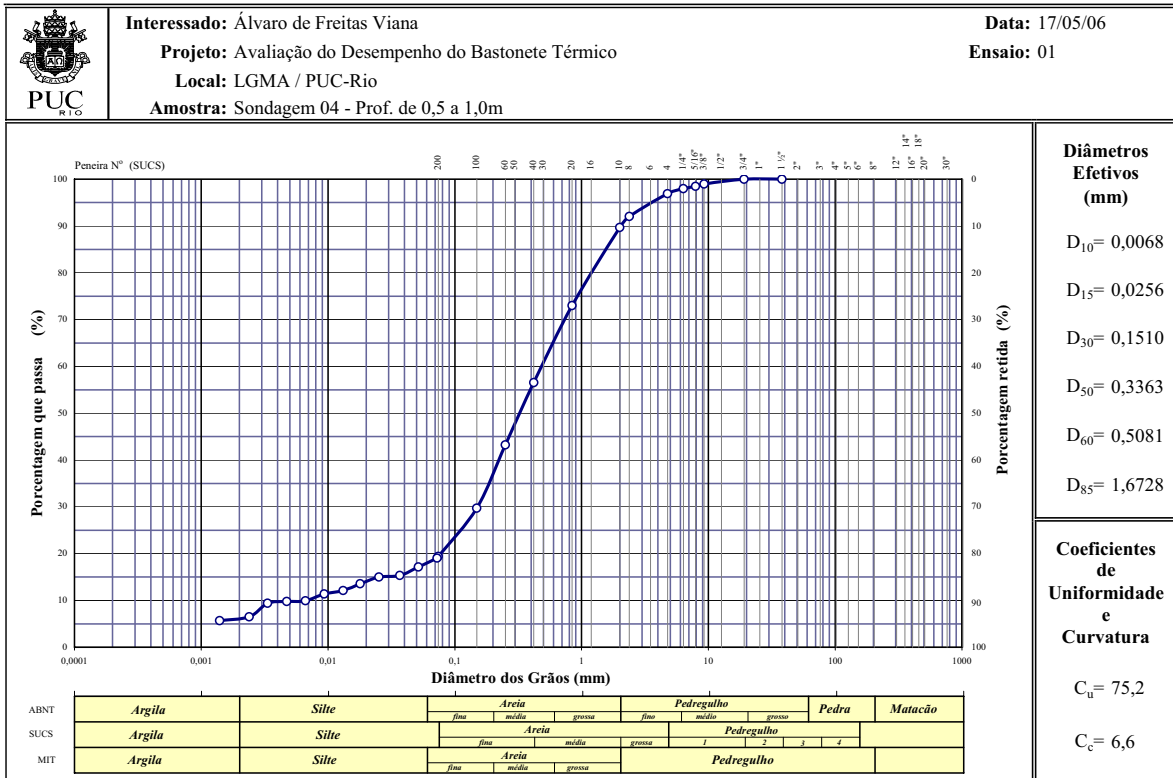


Figura A.I.17 – Sondagem 04, de 0,5 a 1,0m

### Curva Granulométrica

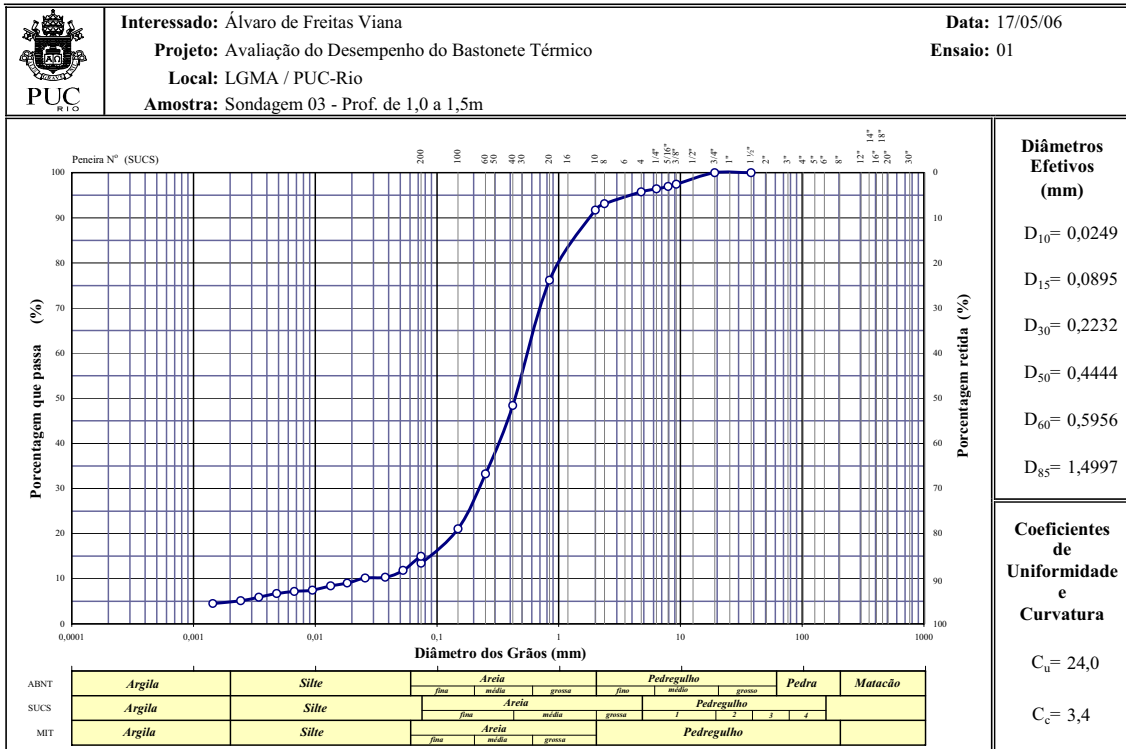


Figura A.I.18 – Sondagem 03, de 1,0 a 1,5m

## ANEXO II

A seguir, são mostrados os gráficos individualizados dos termopares inferiores junto à temperatura externa *versus* tempo, correspondentes à aplicação do bastonete térmico no CE-01 (Figuras A.II.1 a A.II.12).

As planilhas com os dados obtidos e armazenados pelo '*data logger*' encontram-se disponíveis em meio eletrônico e podem ser fornecidos assim que solicitados.

CE-01, de 23-01 a 24-01

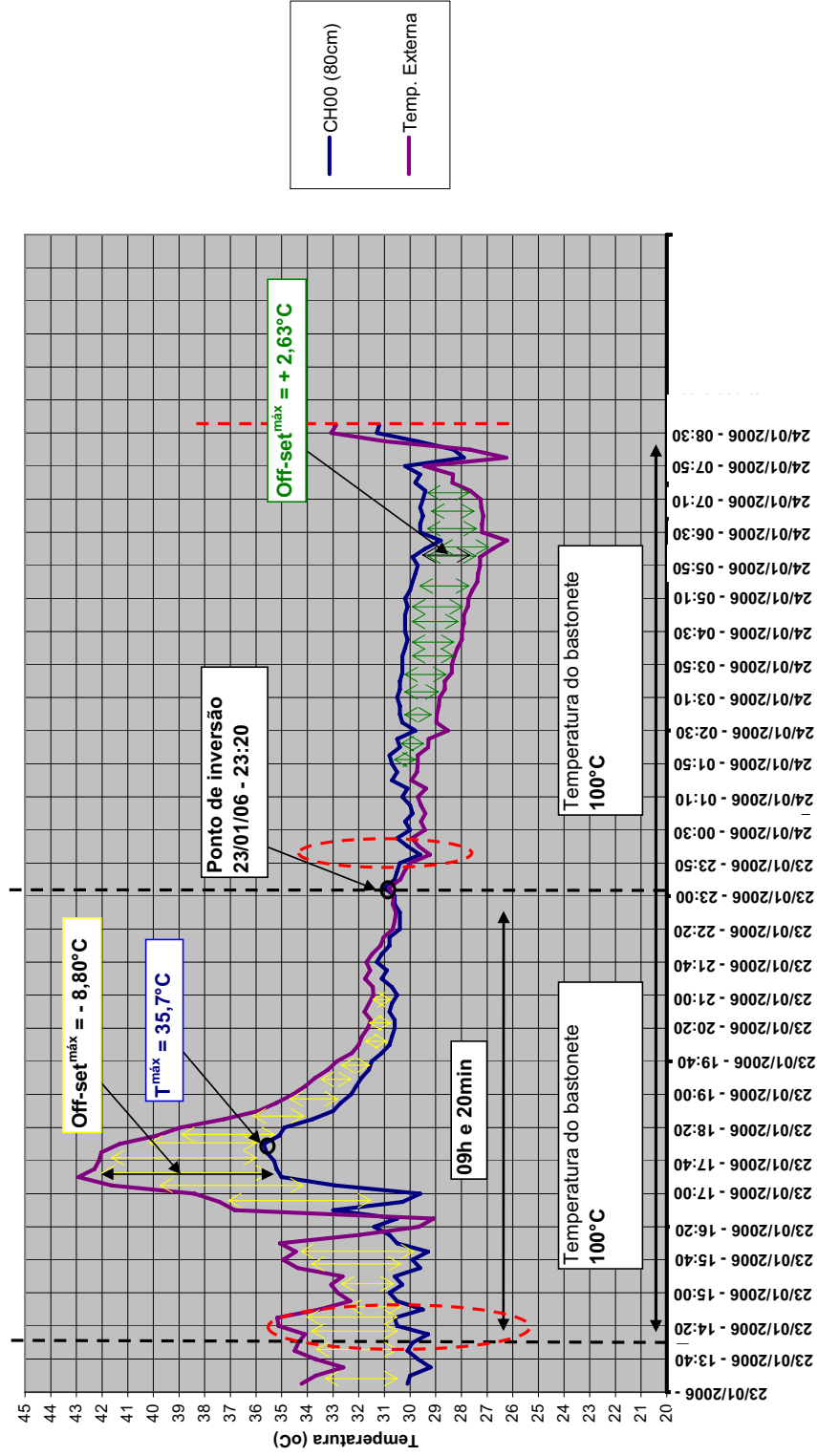


Figura A.II.1 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 00

CE-01, de 23-01 a 24-01

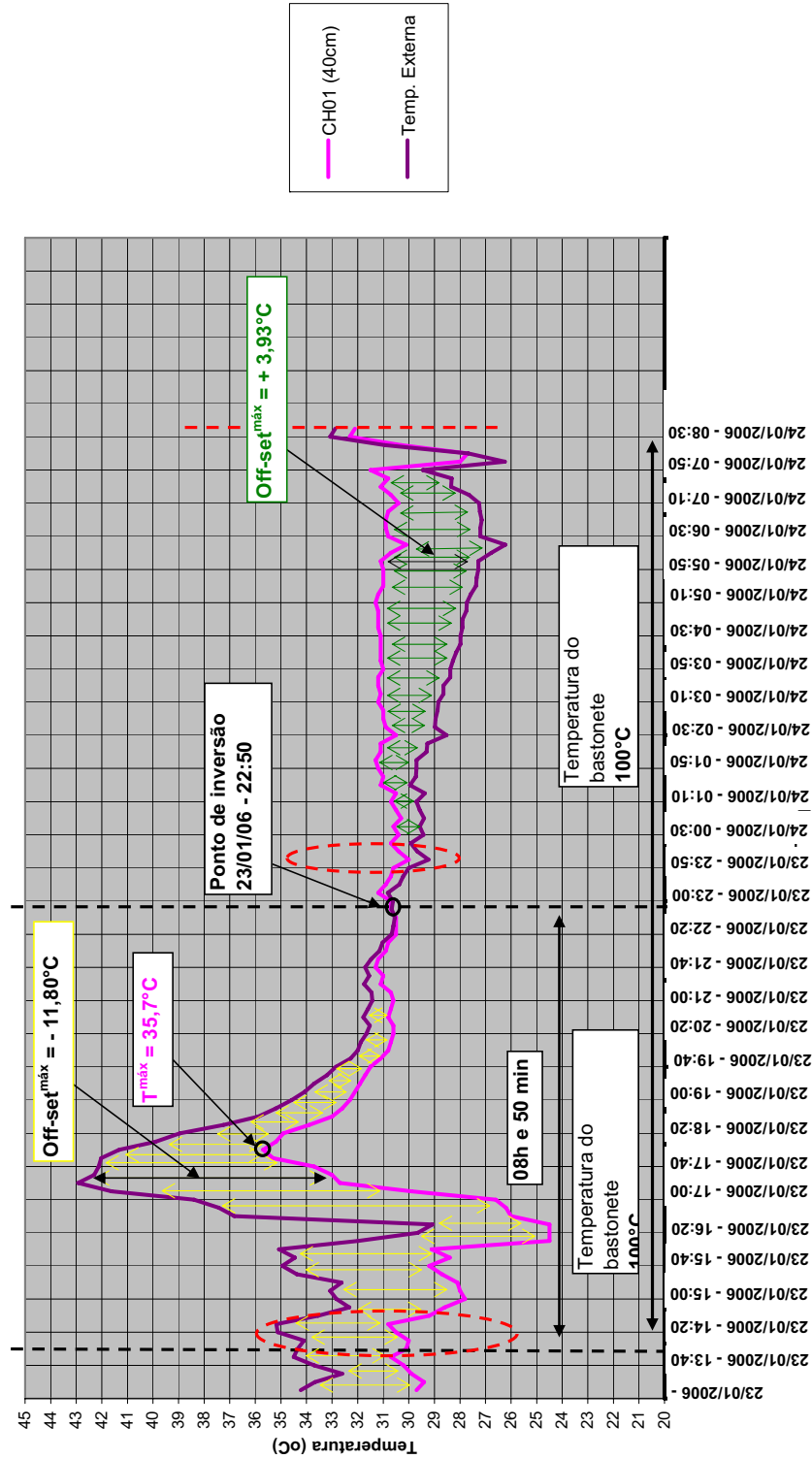


Figura A.II.2 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 01



CE-01, de 23-01 a 24-01

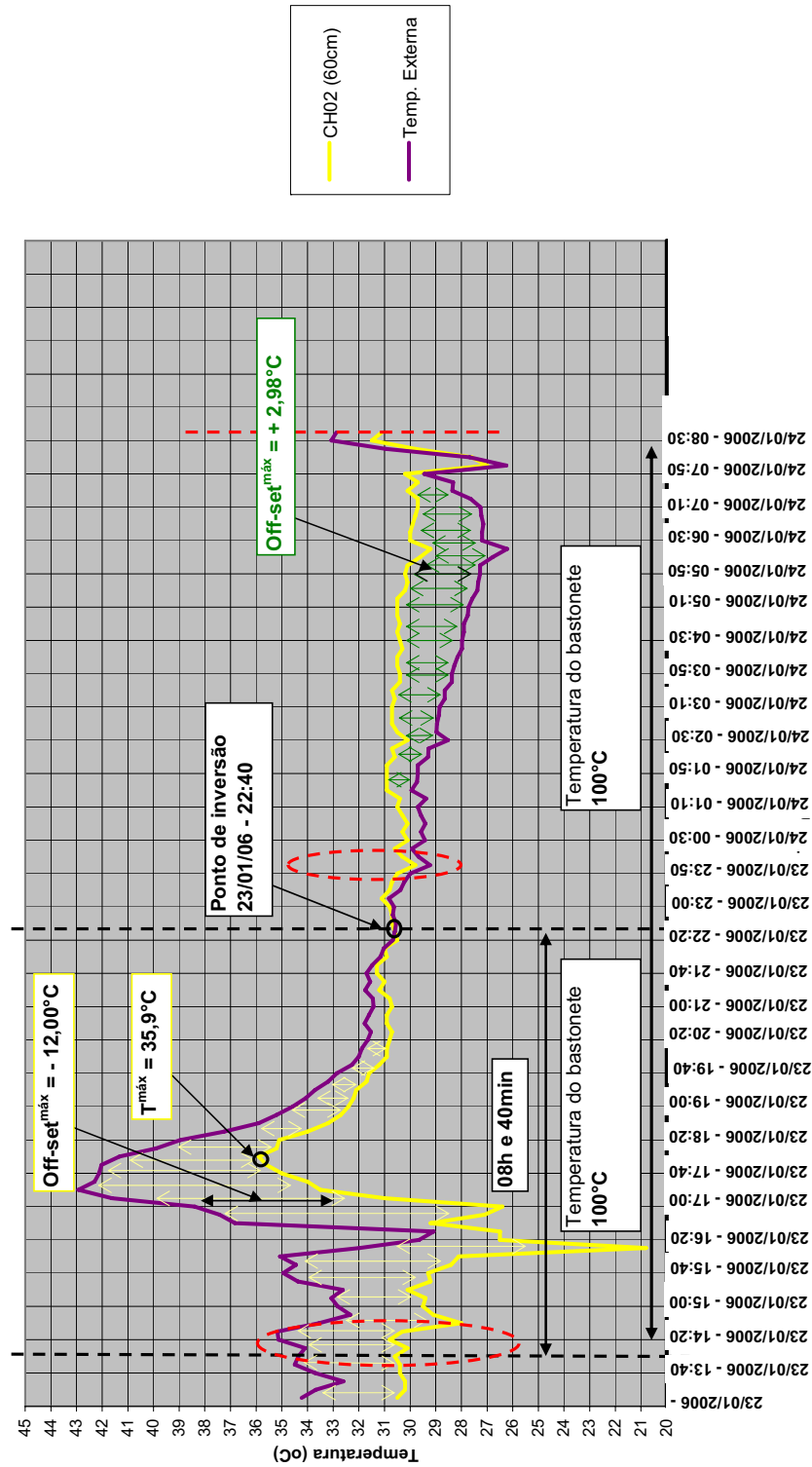


Figura A.II.3 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 02

CE-01, de 23-01 a 24-01

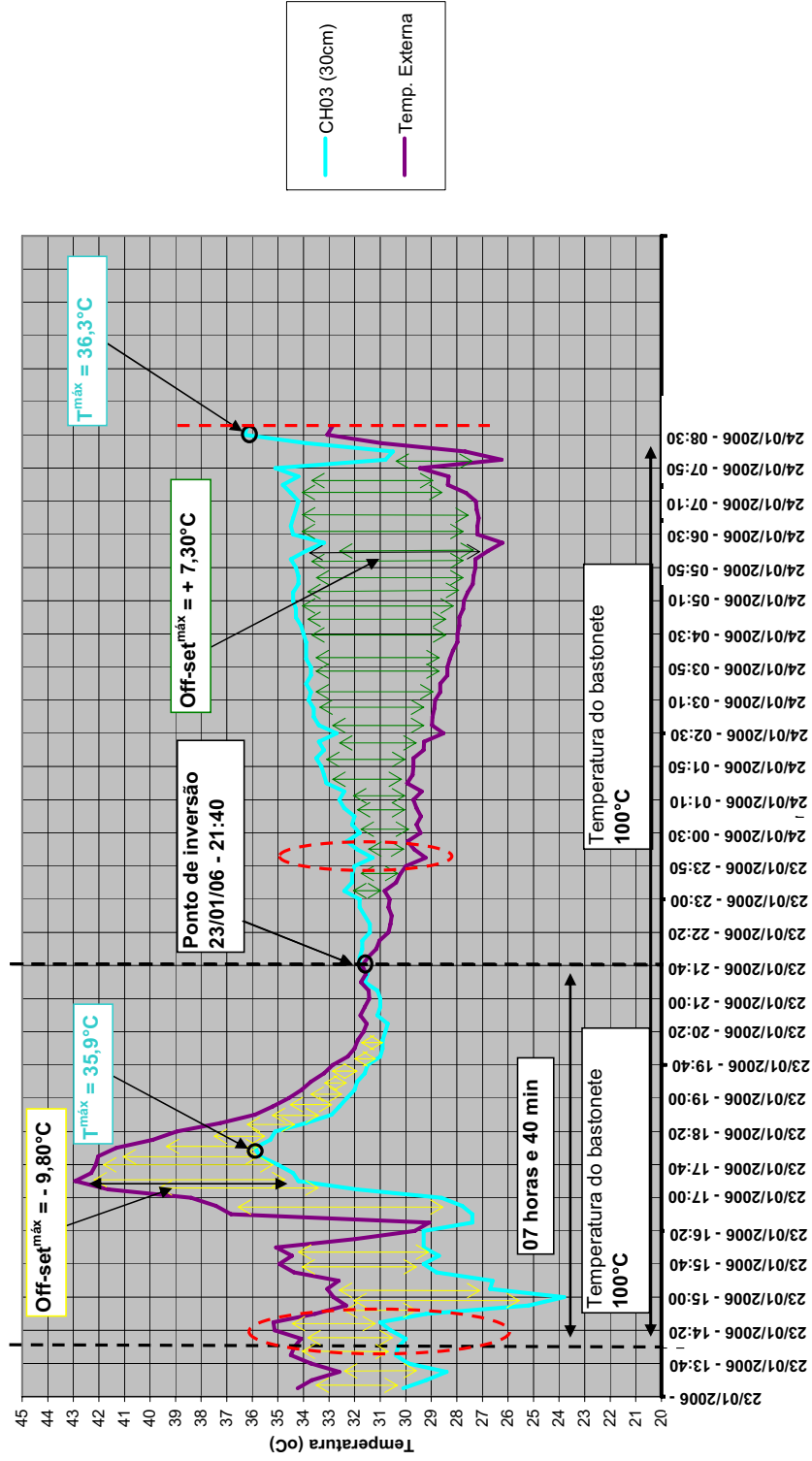


Figura A.II.4 – CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006, Canal 03

CE-01, de 25-01 a 27-01

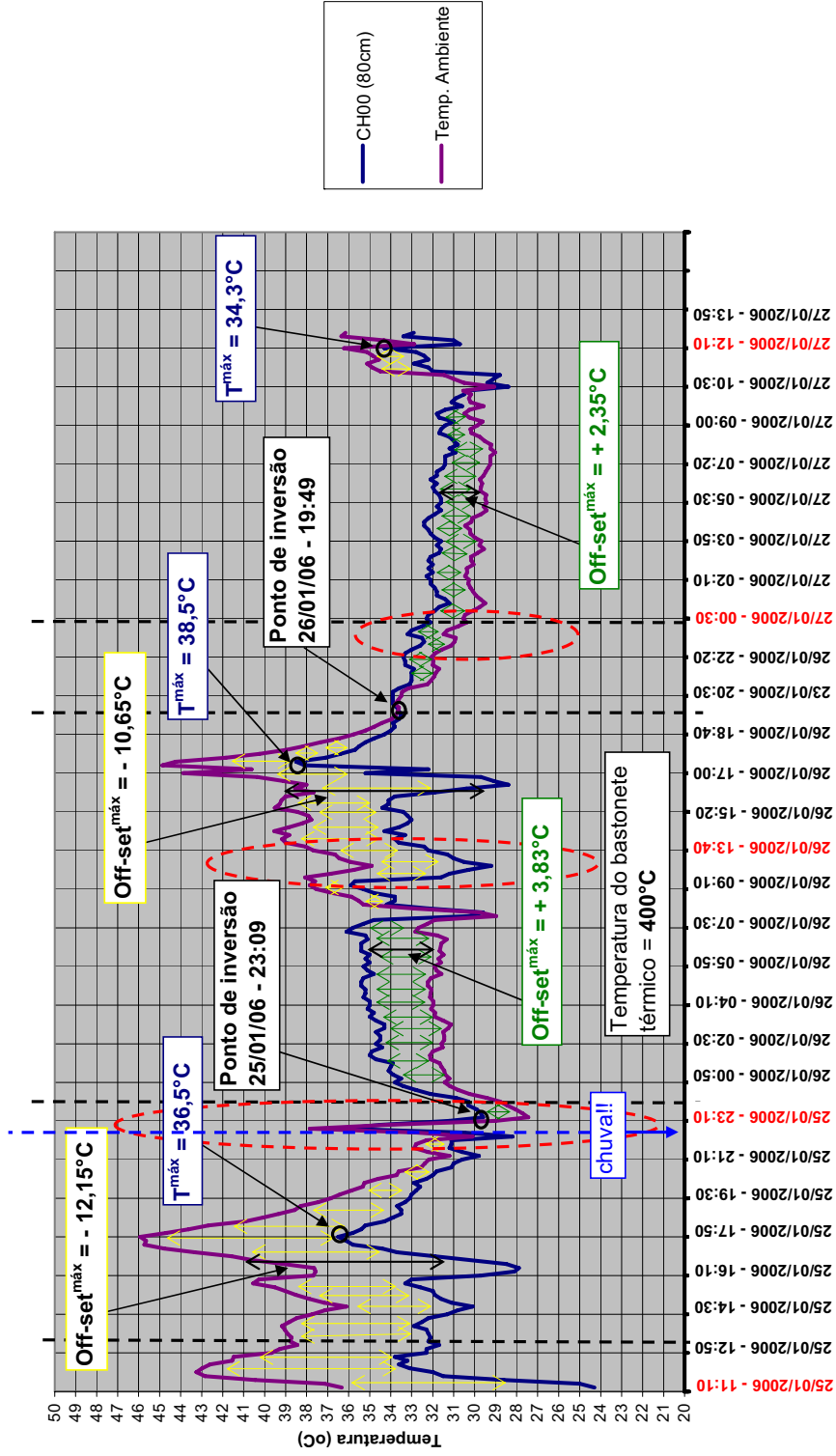


Figura A.II.5 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 00

CE-01, de 25-01 a 27-01

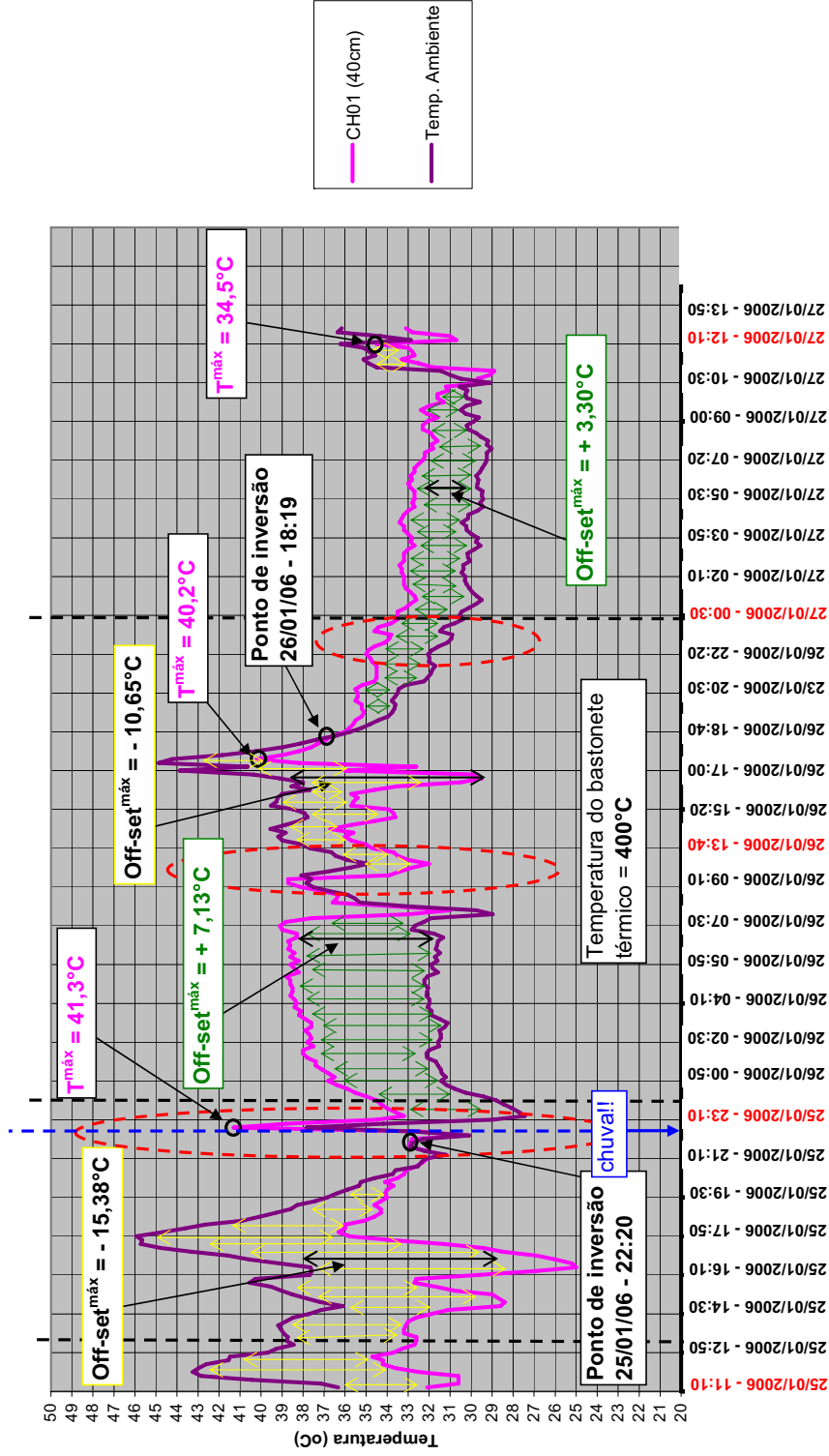


Figura A.II.6 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 01

CE-01, de 25-01 a 27-01

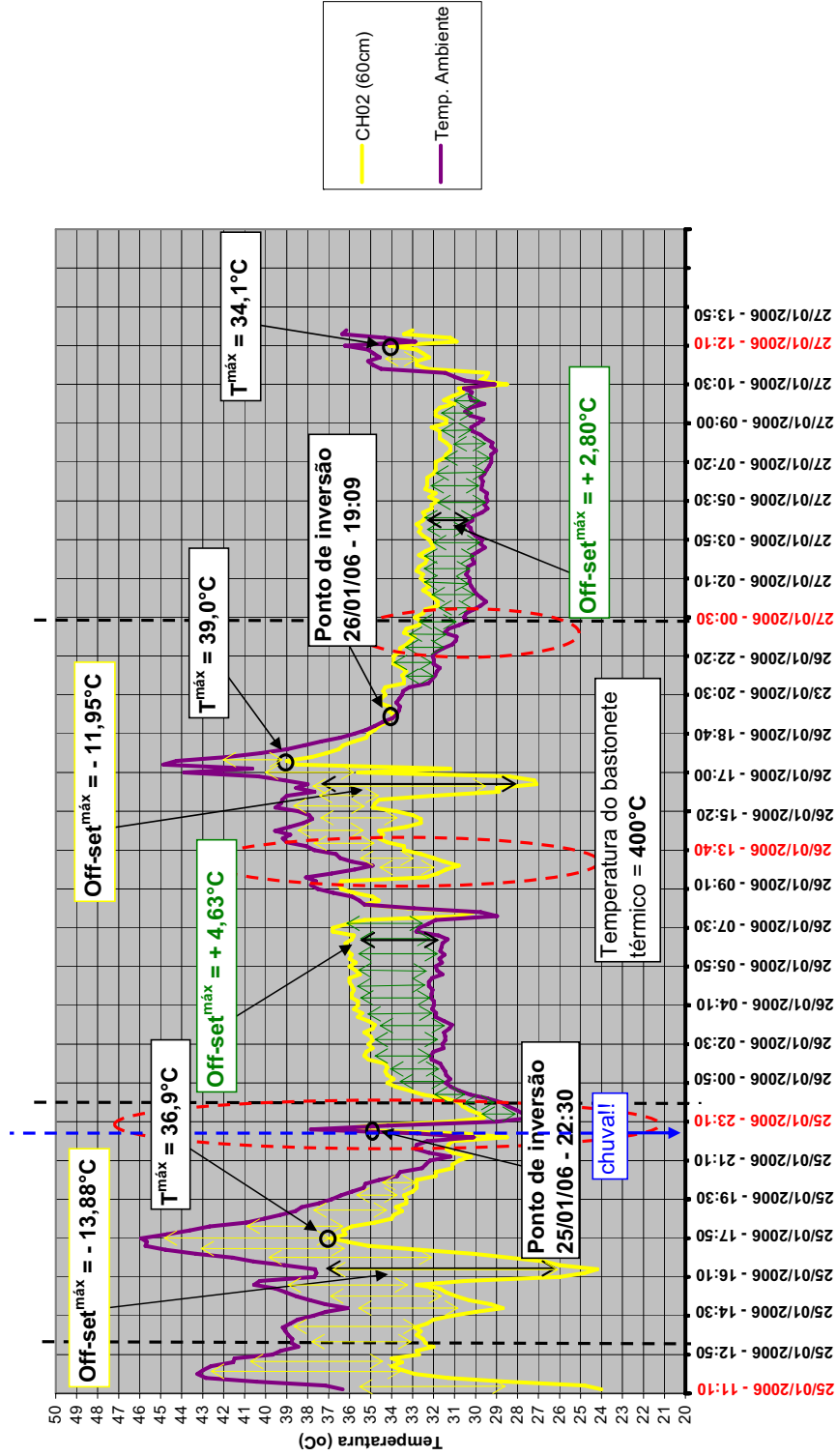


Figura A.II.7 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 02

CE-01, de 25-01 a 27-01

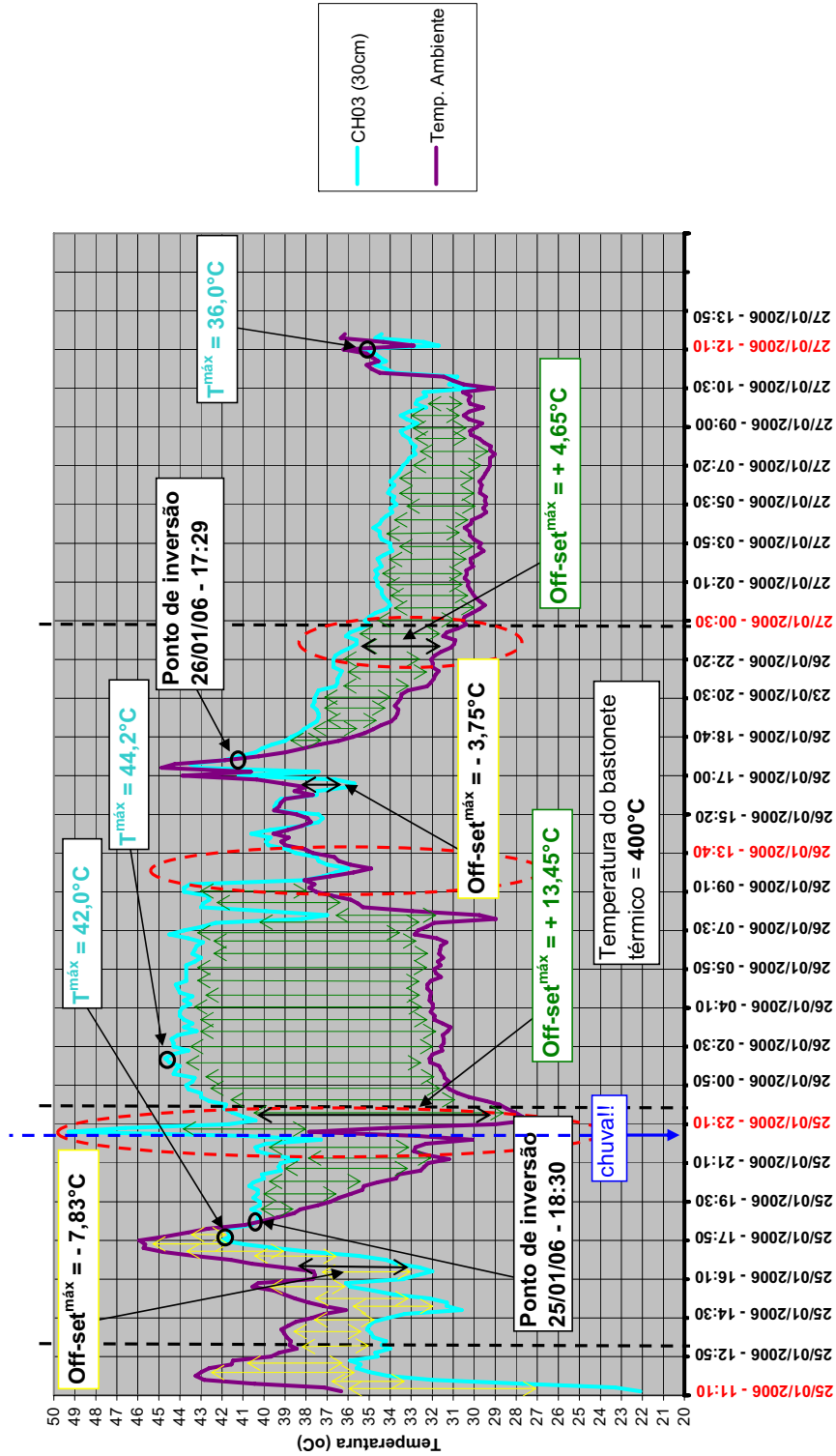


Figura A.II.8 – CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006, Canal 03

CE-01, de 03/02 a 05/02

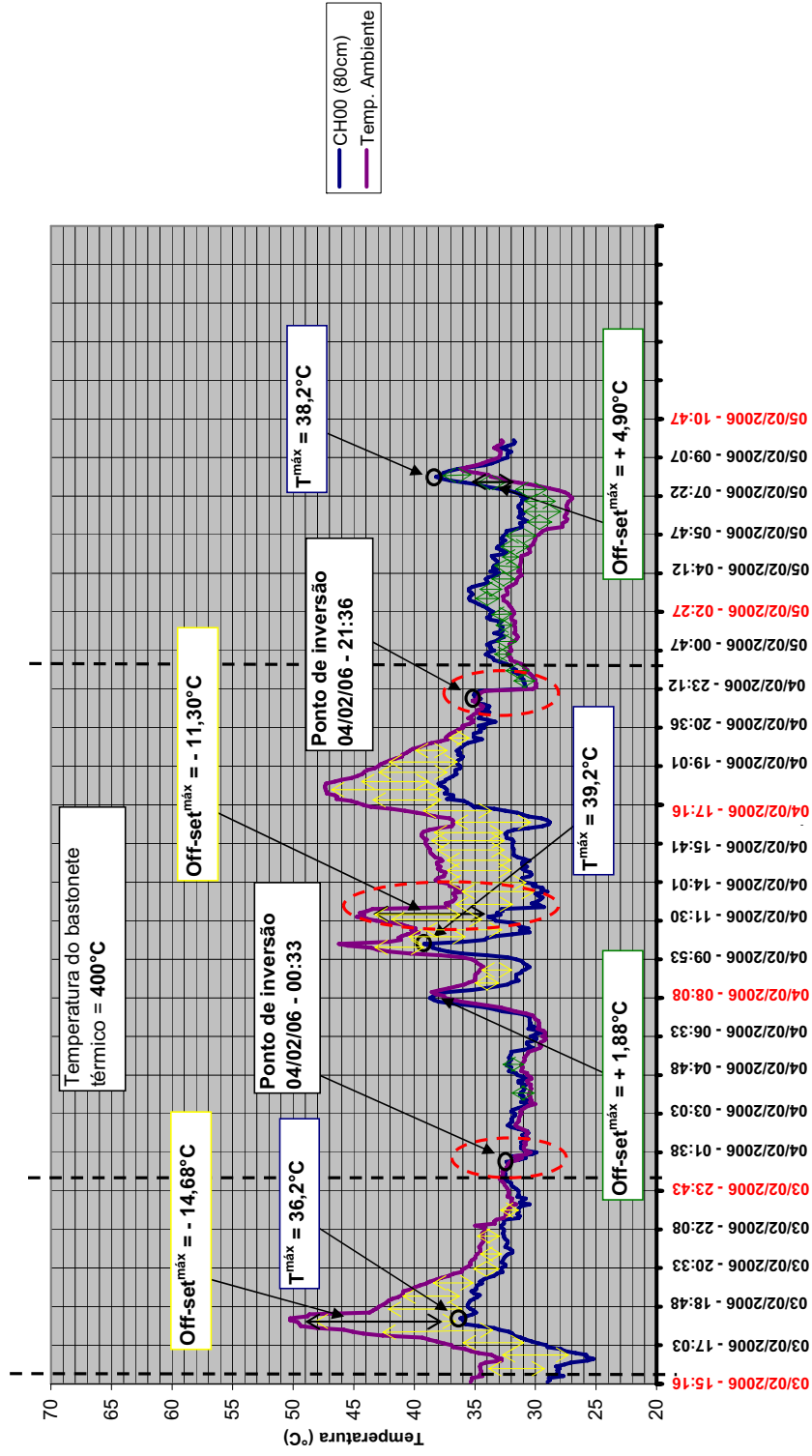


Figura A.II.9 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 00

CE-01, de 03/02 a 05/02

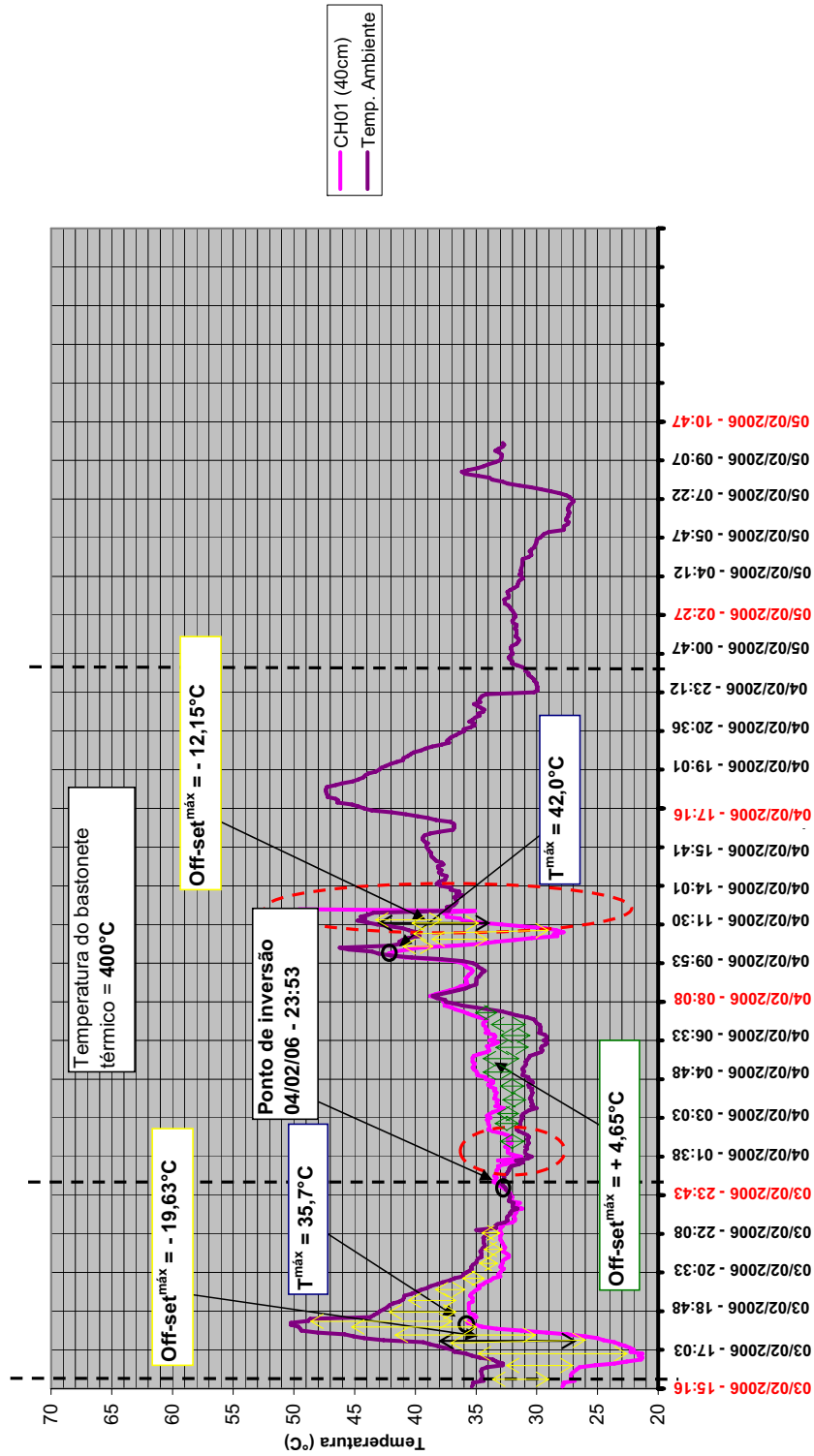


Figura A.II.10 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 01



CE-01, de 03/02 a 05/02

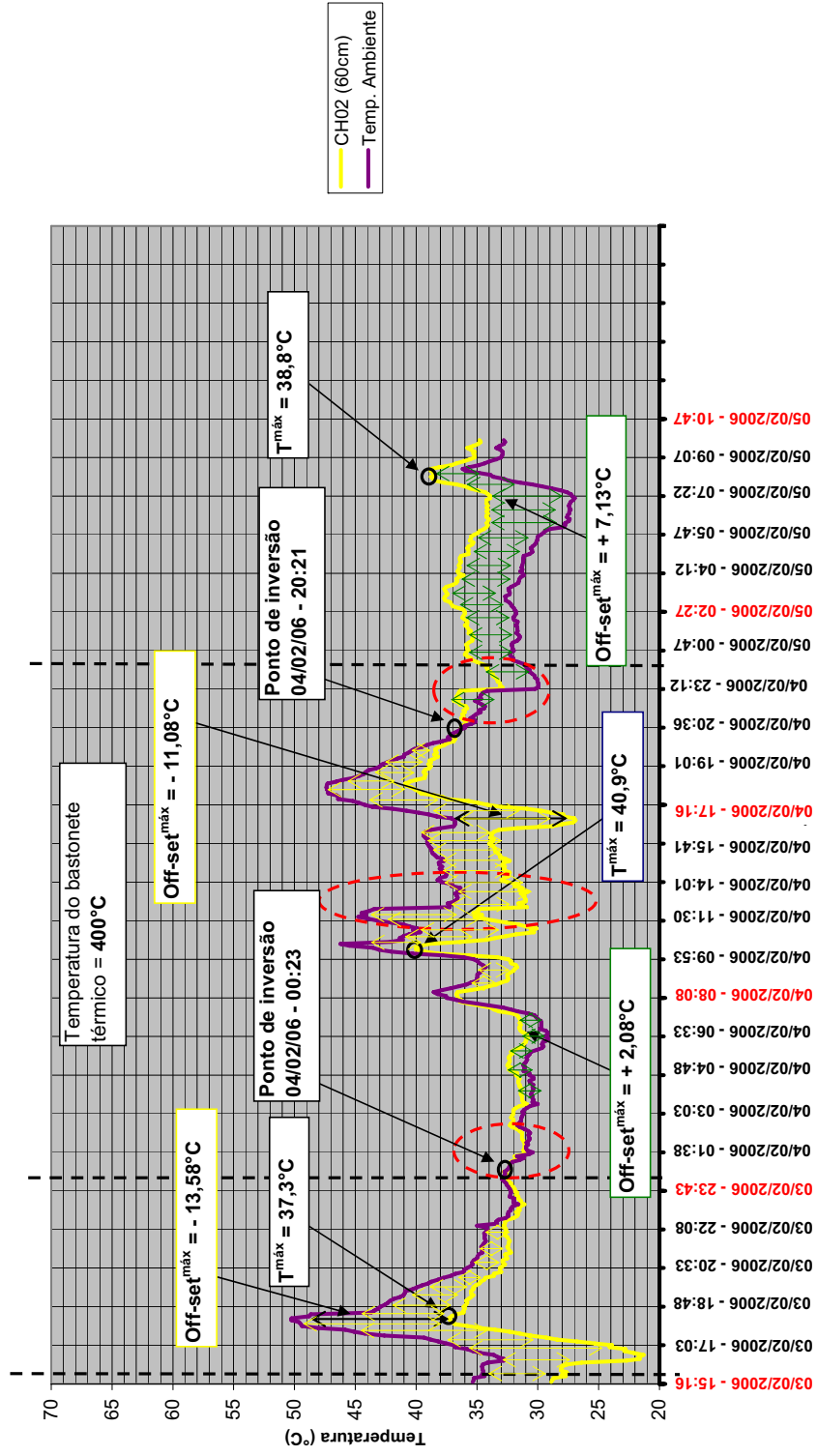


Figura A.II.11 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 02

CE-01, de 03/02 a 05/02

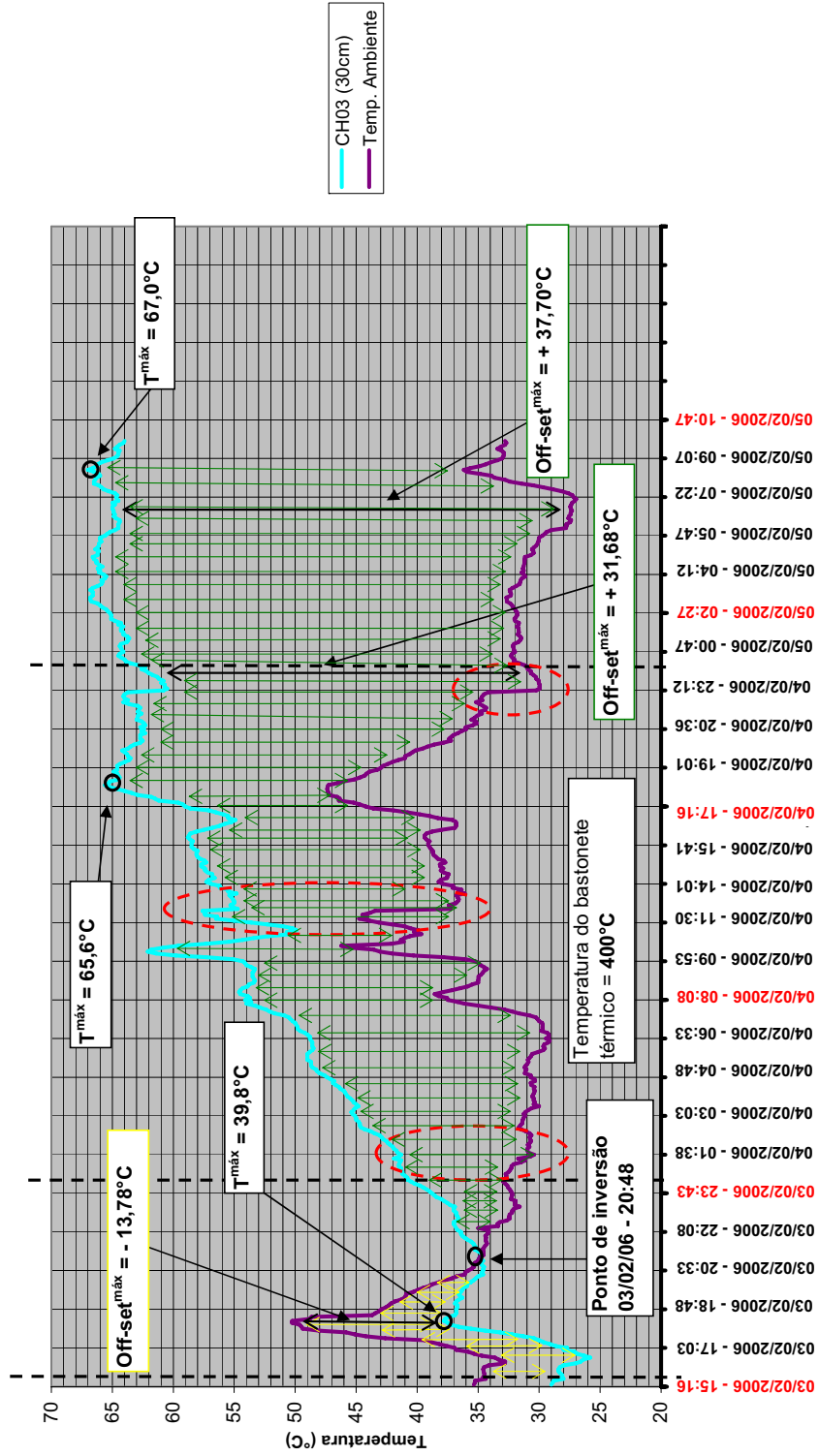


Figura A.II.12 – CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006, Canal 03

## **ANEXO III**

A seguir, são mostrados os gráficos correspondentes aos ensaios de difração de raios-x, realizados com os materiais provenientes do CE-01 (Figuras A.III.1 a A.III.5).

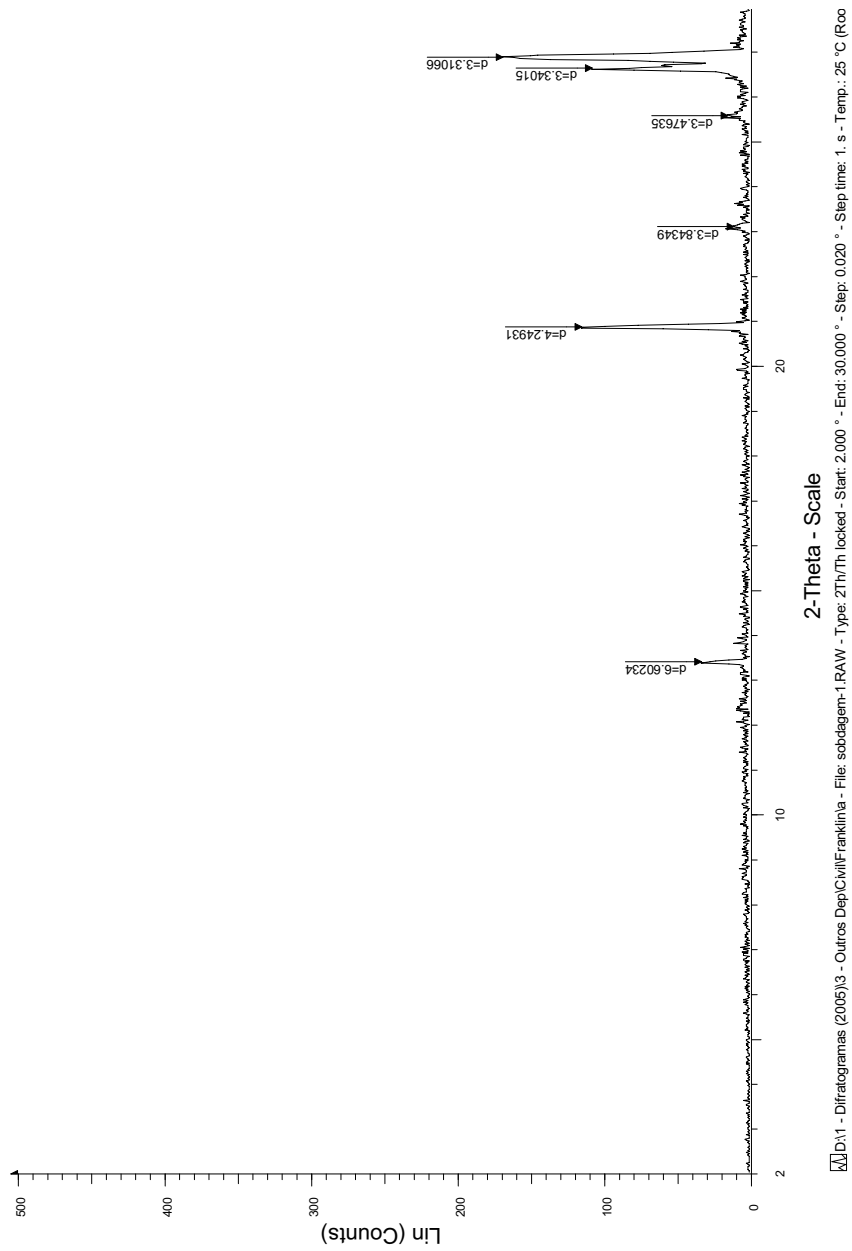


Figura A.III.1 – Difractograma S-01, de 0,5 a 1,0m

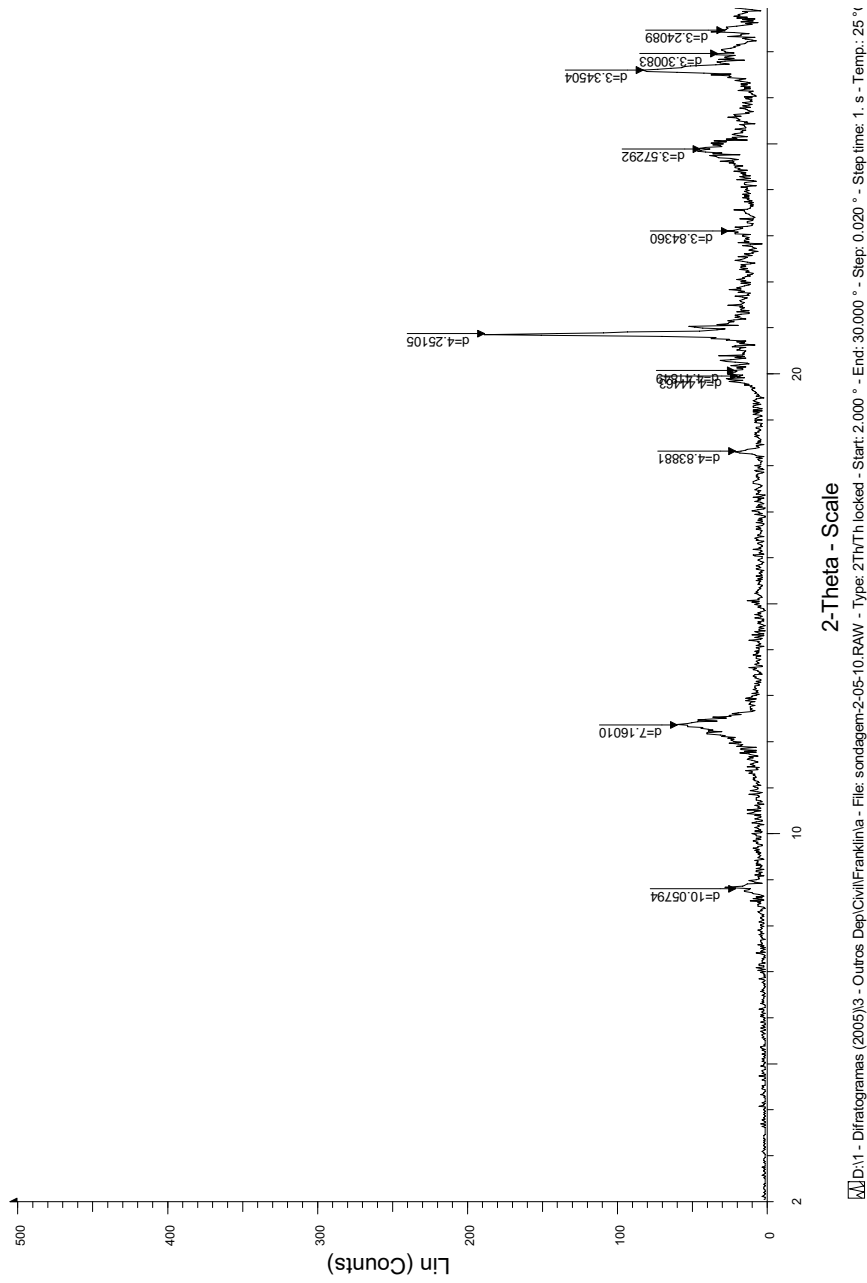


Figura A.III.2 – Difractograma S-02, de 0,5 a 1,0m

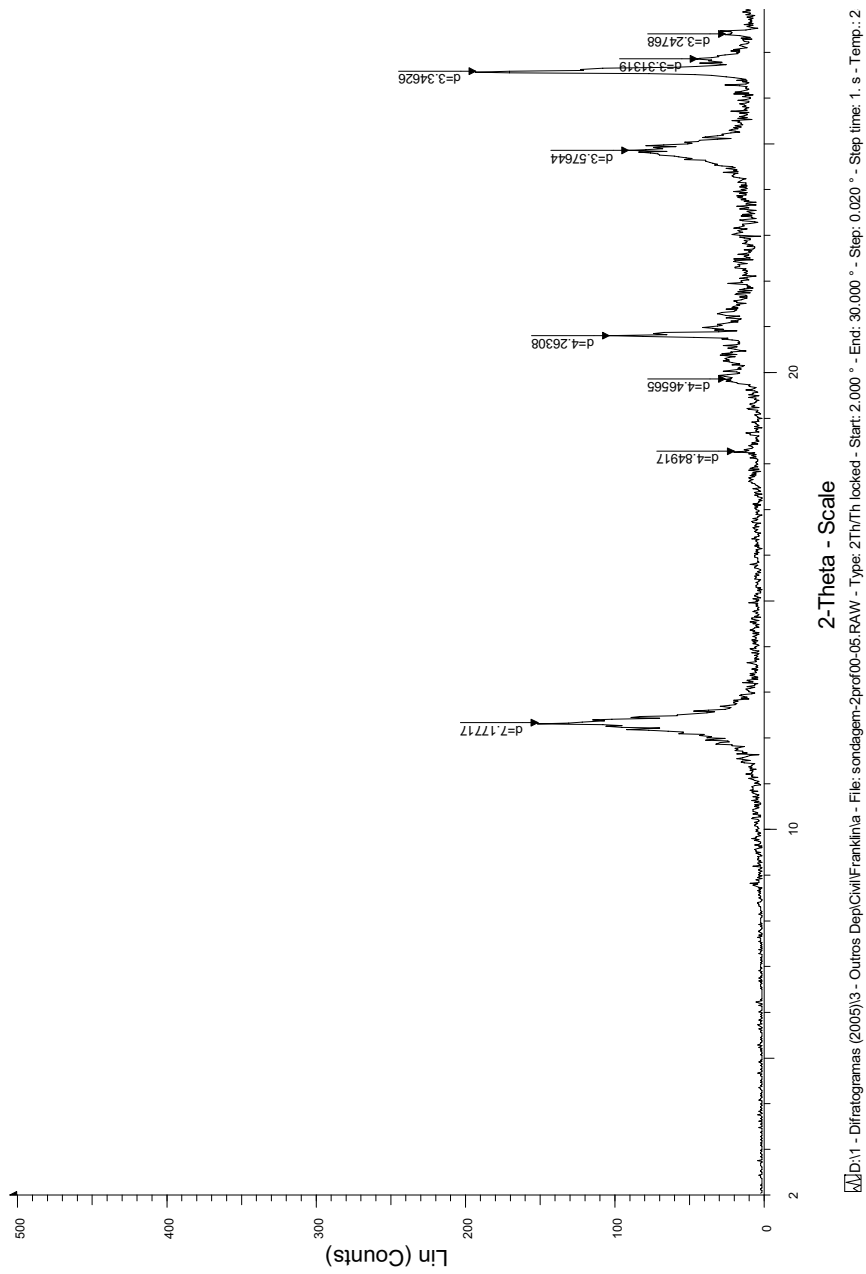


Figura A.III.3 – Difratoograma S-02, de 0,0 a 0,5m

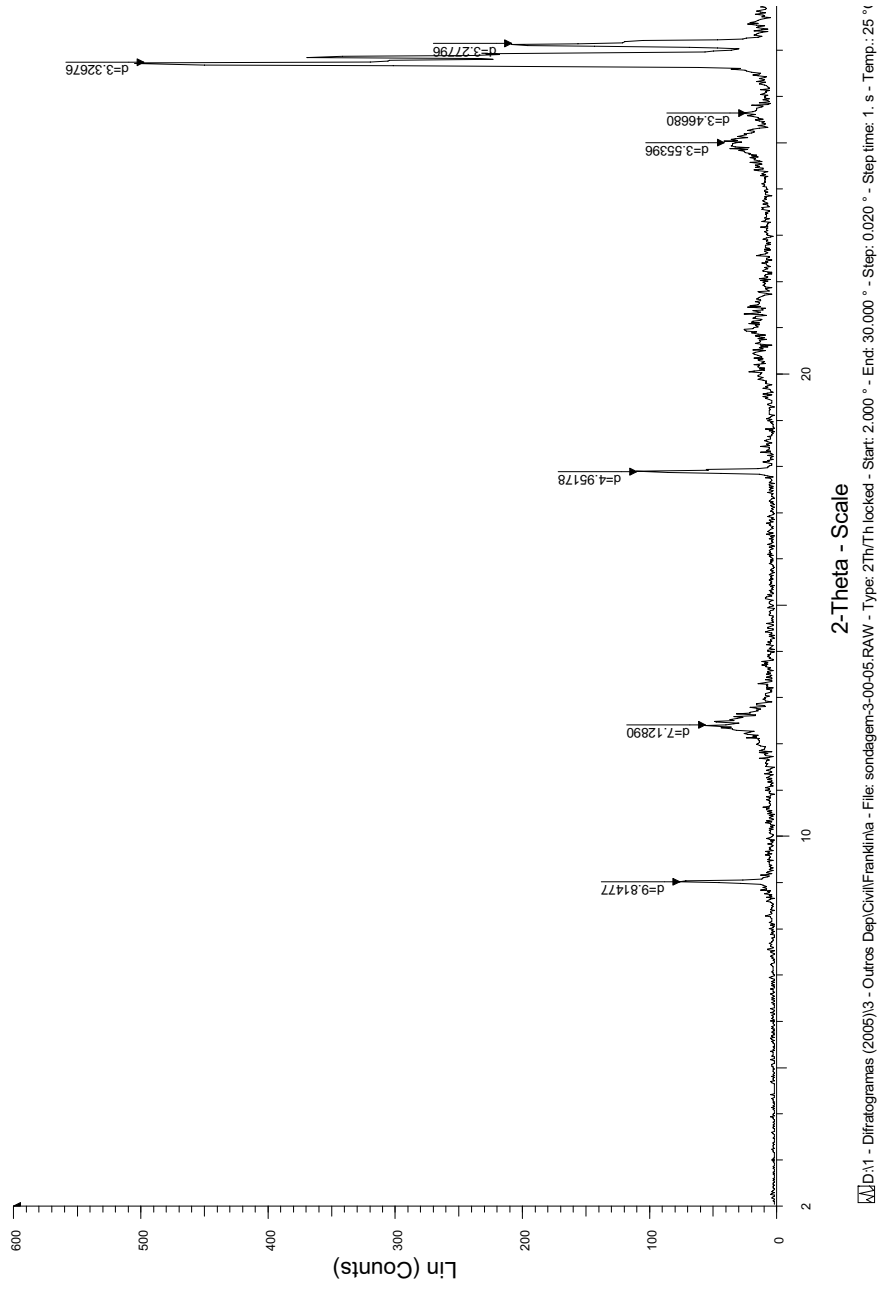


Figura A.III.4 – Difractograma S-03, de 0 a 0,5m

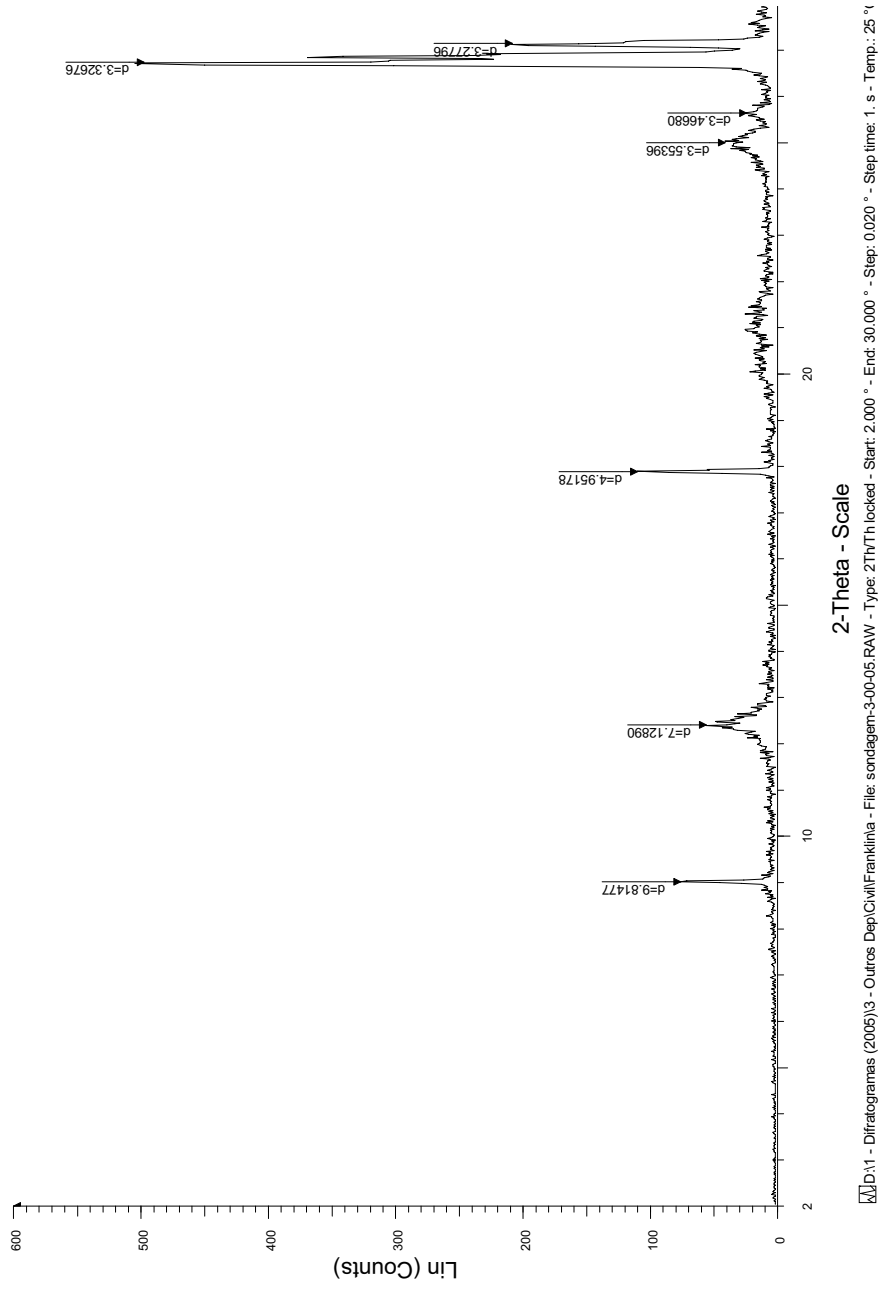


Figura A.III.5 – Difractograma S-03, de 0 a 0,5m