

## 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

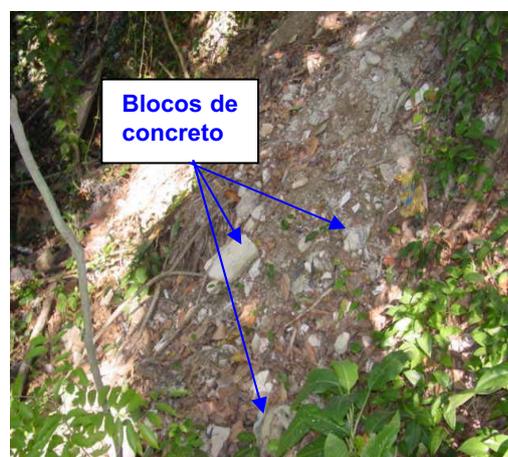


Figura 4.6 – Mais entulhos (blocos de concreto) visíveis no talude do local

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

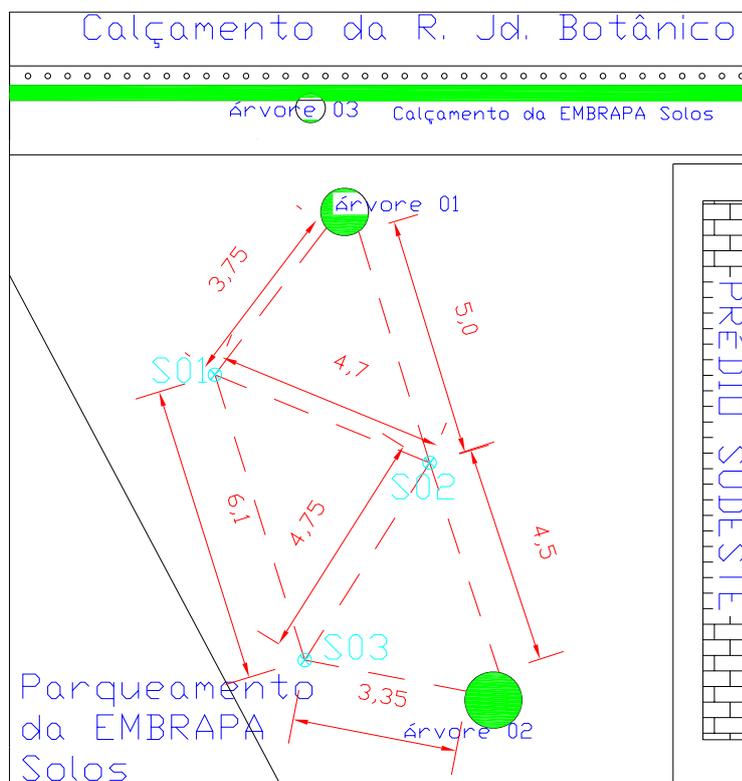


Figura 4.15 – Planta baixa do CE-01, com locação das sondagens S-01, S-02 e S-03 (distâncias em metros)

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 solocimento<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.

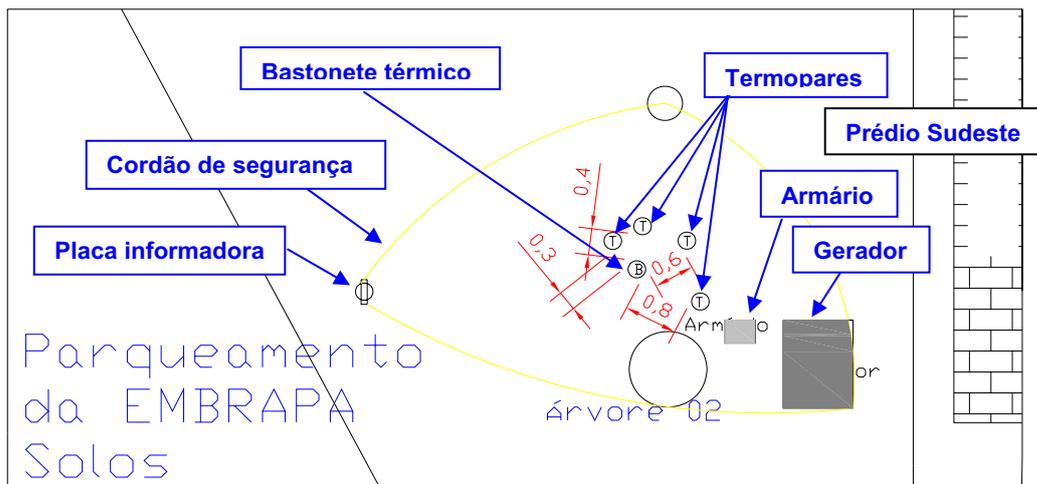


Figura 4.18 – Localização do bastonete térmico, termopares, armário, gerador, placa informadora sobre o experimento e cordão de segurança (cotas em metros)

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

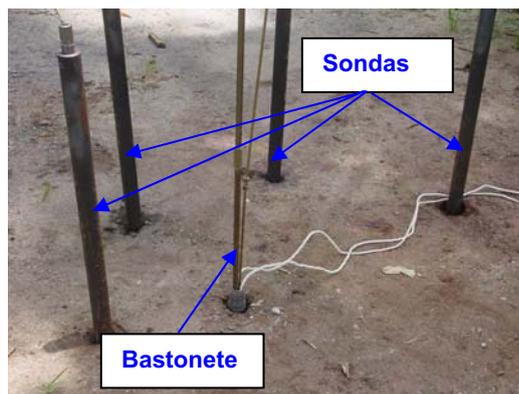


Figura 4.22 – Instalação do bastonete térmico e das sondas

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.

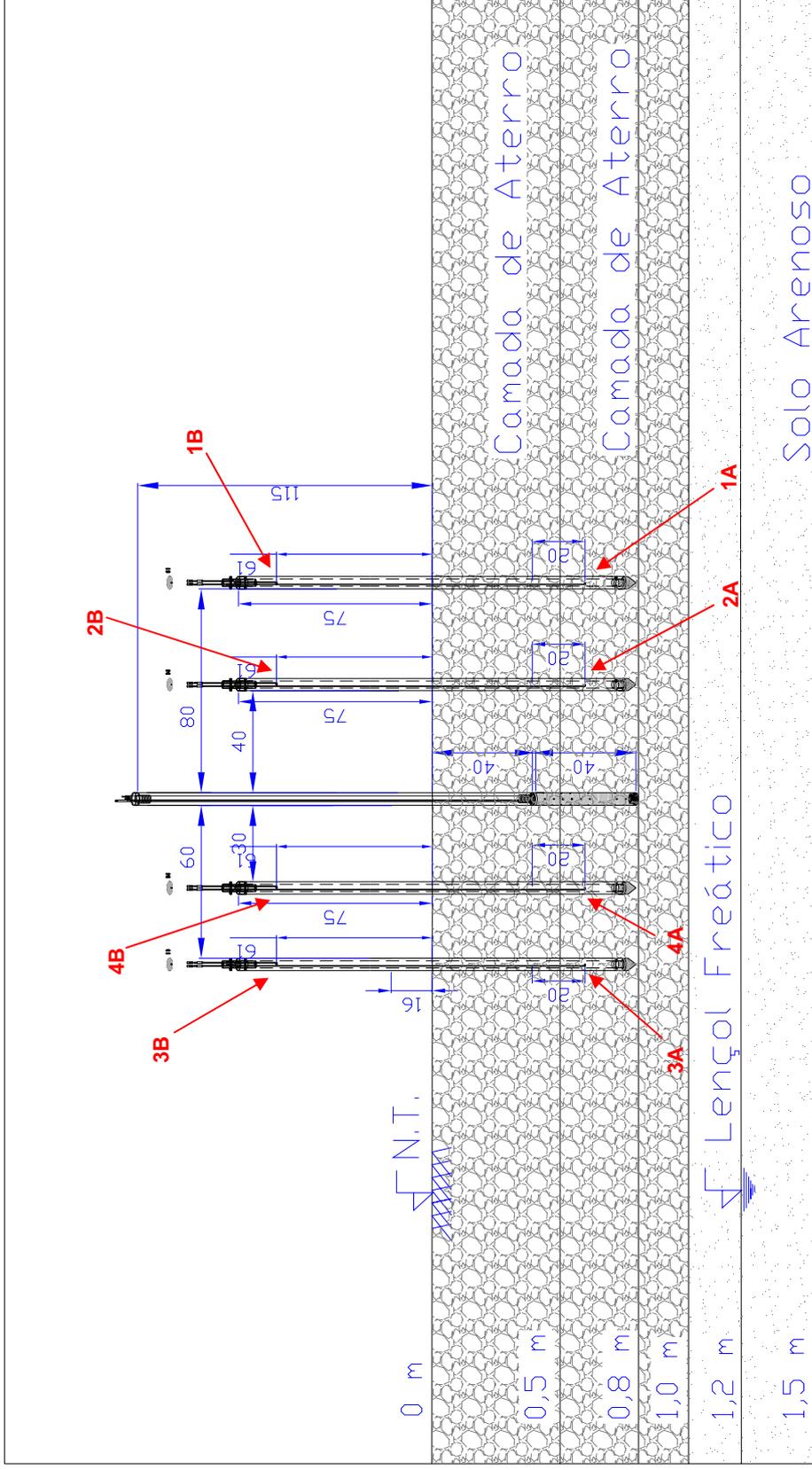


Figura 4.23 – Configuração do bastonete térmico e das sondas medidoras de temperatura no CE-01

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.

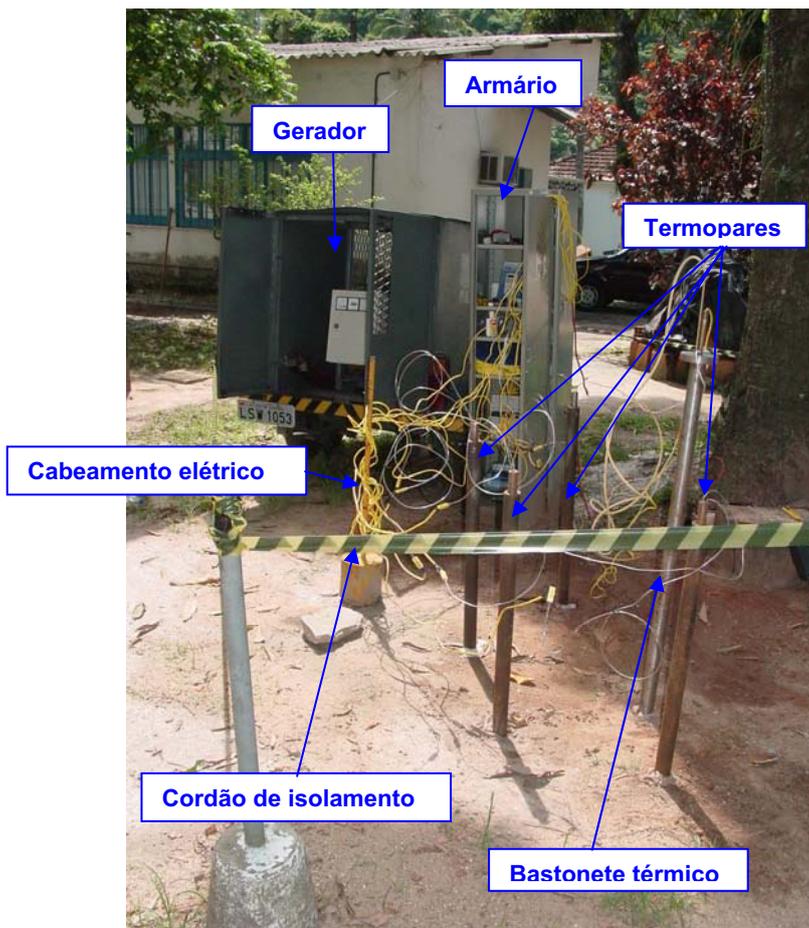


Figura 4.24 – Sistema de dessorção térmica *in situ* instalado na **EMBRAPA Solos**

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 (horas:minutos)	Combustível (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:

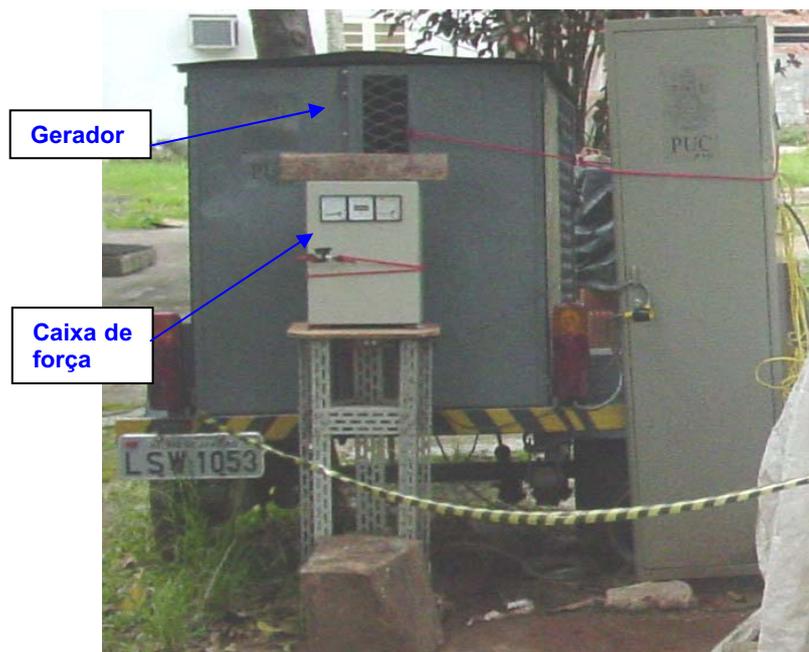


Figura 4.26 – Caixa de força do gerador independente da sua estrutura

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

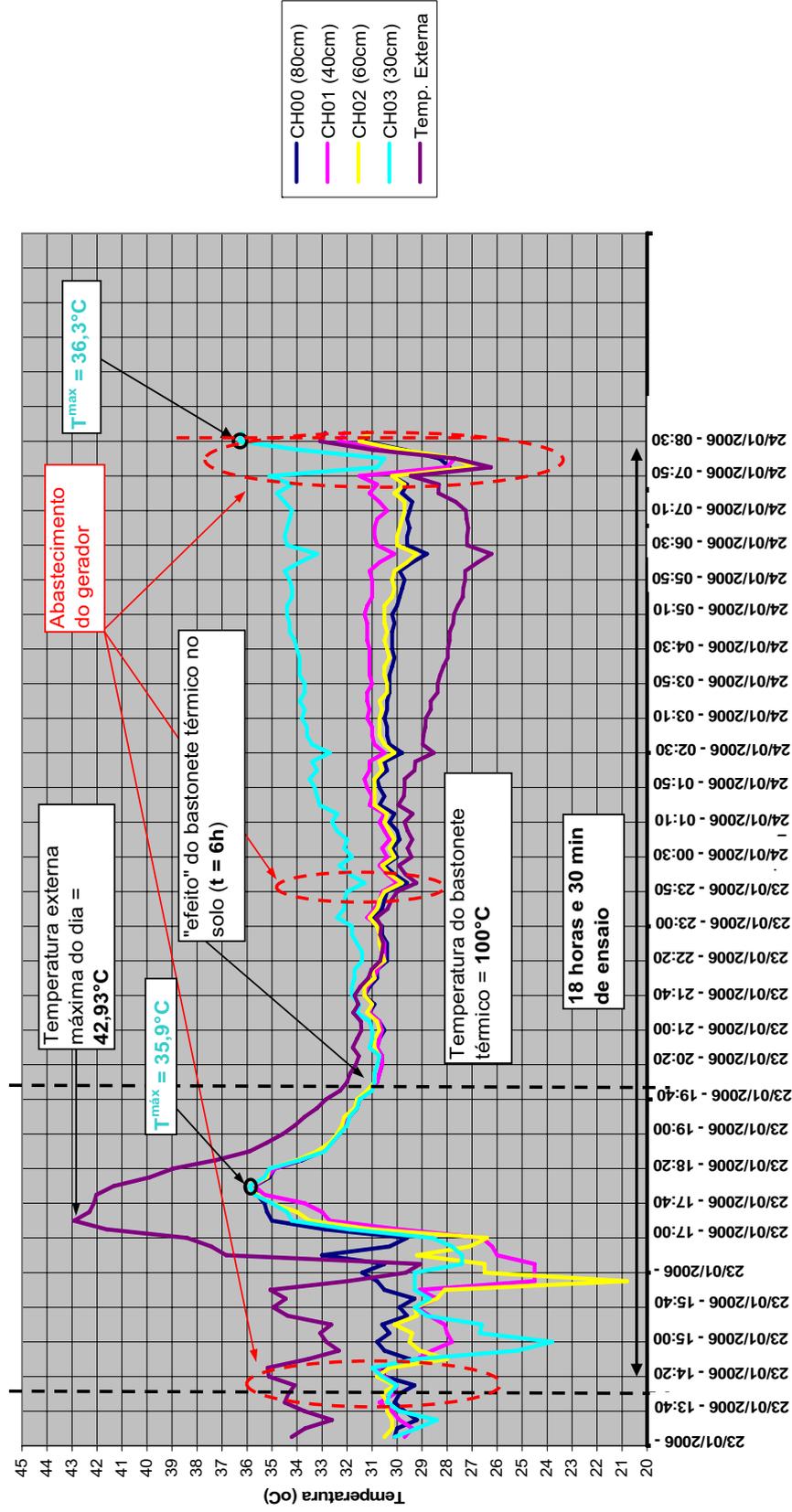


Figura 4.33 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 23/01/2006 a 24/01/2006

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 da 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.

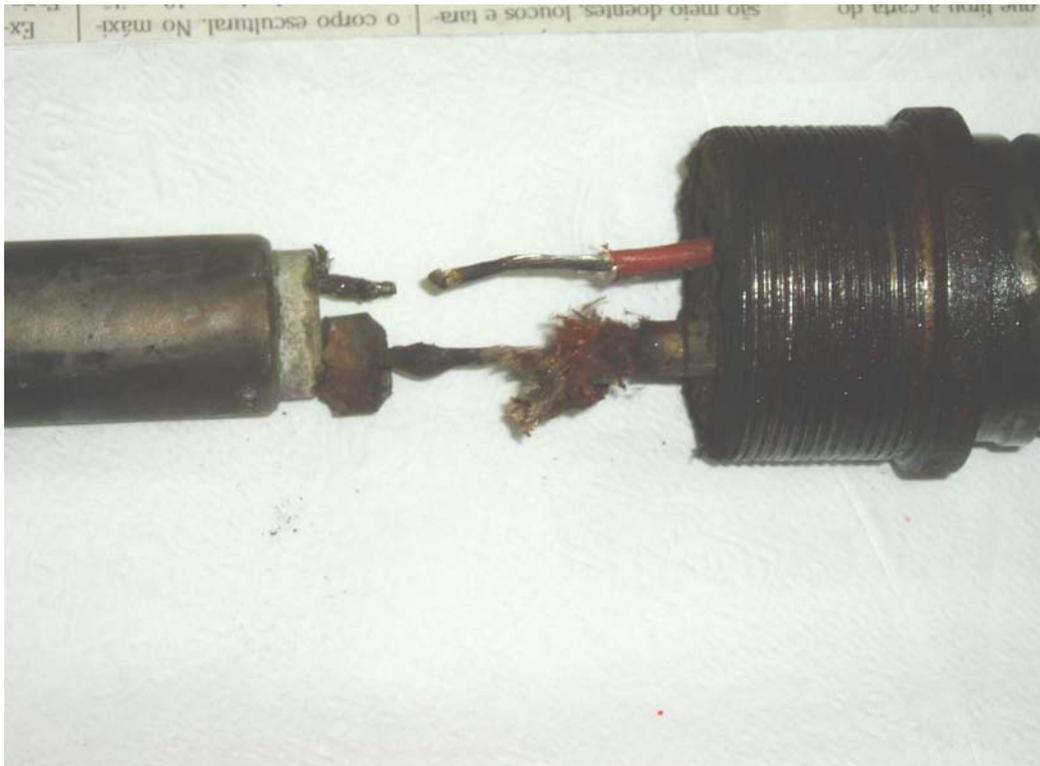


Figura 4.34 – Detalhe do rompimento de um dos terminais do cartucho de resistência do aquecedor, com sinais de 'queimado'

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.

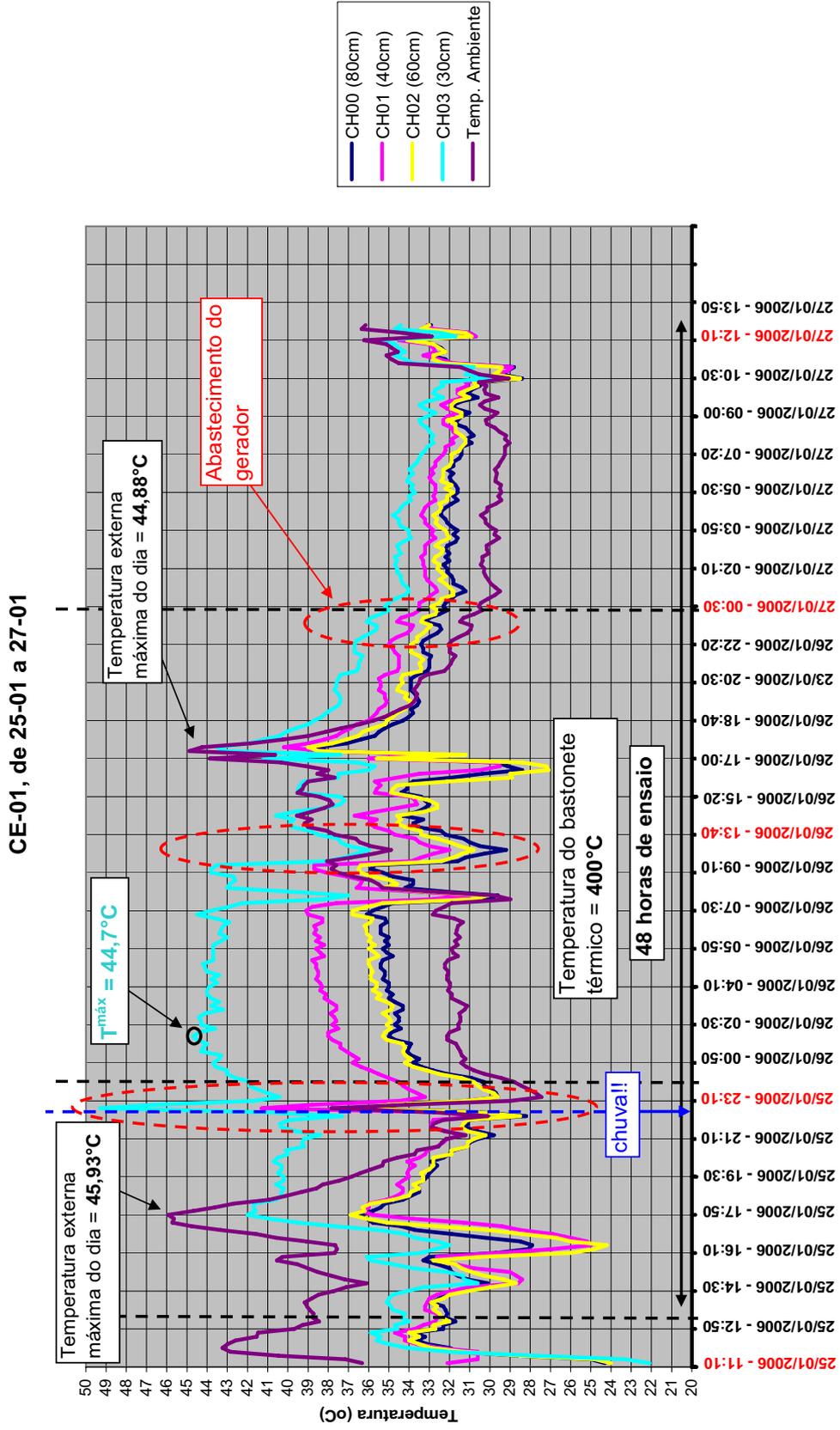


Figura 4.35 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 25/01/2006 a 27/01/2006

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

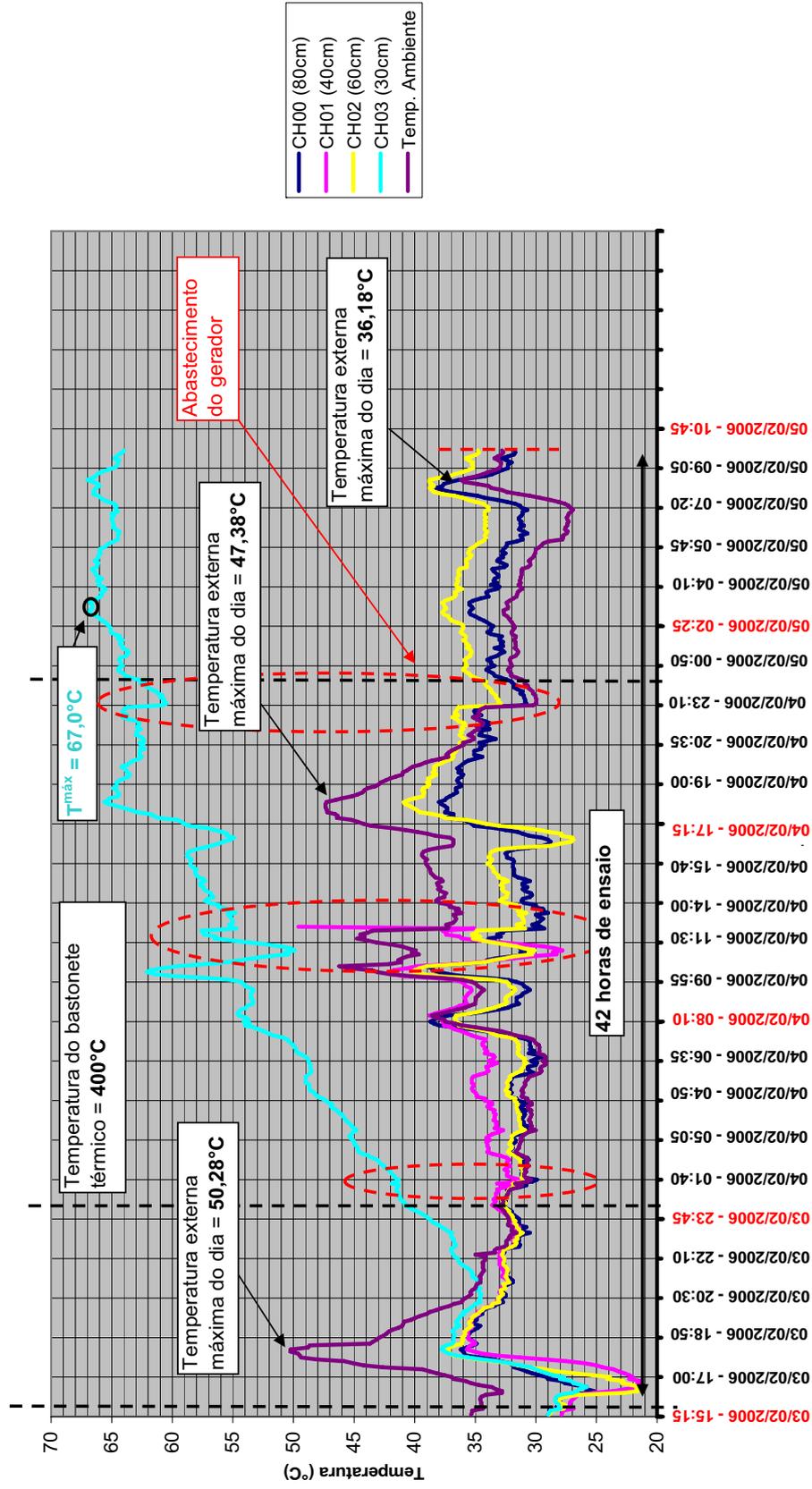


Figura 4.37 – Aplicação dos bastonetes térmicos no CE-01, de 03/02/2006 a 05/02/2006

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 (23 e 24 de janeiro)		Quarto Experimento (25, 26 e 27 de janeiro)		Quinto Experimento (3, 4 e 5 de fevereiro)	
	Temperatura Máxima	Tempo de ensaio	Temperatura Máxima	Tempo de ensaio	Temperatura Máxima	Tempo de 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. 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)

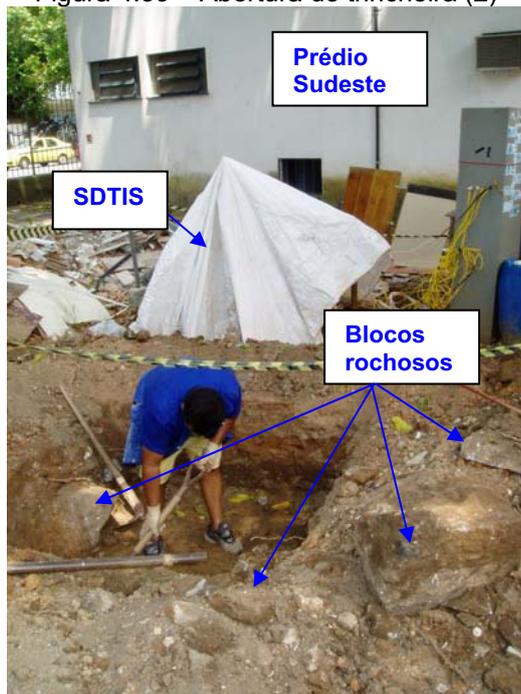


Figura 4.41 – Abertura de trincheira (4)

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 consequência 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 Ensaios 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.

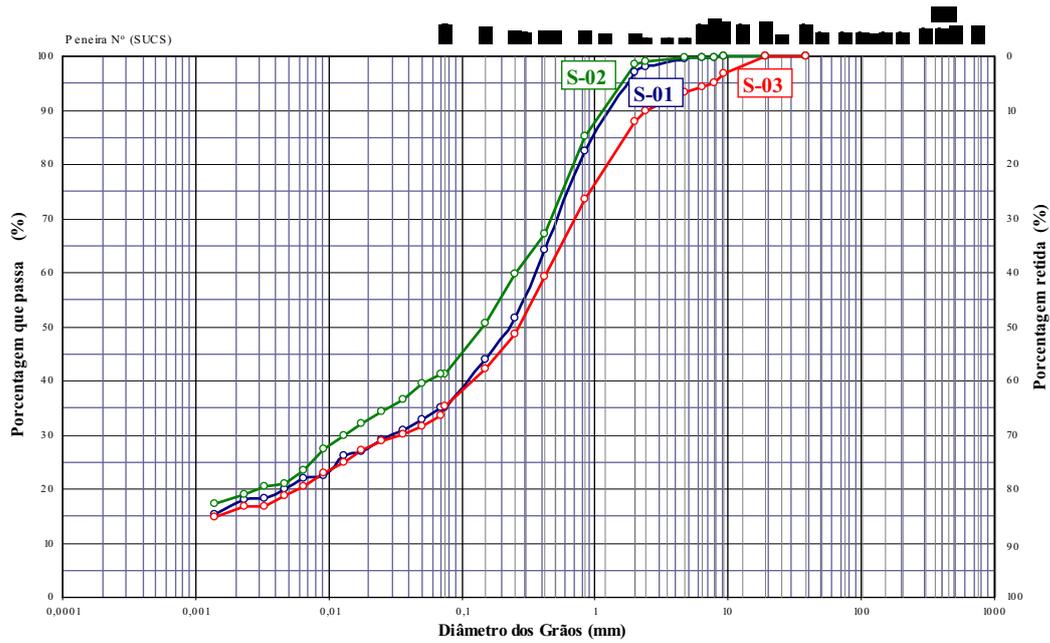


Figura 4.48 – Curvas granulométricas das sondagens 01, 02 e 03, sob profundidade de 0 a 0,5m

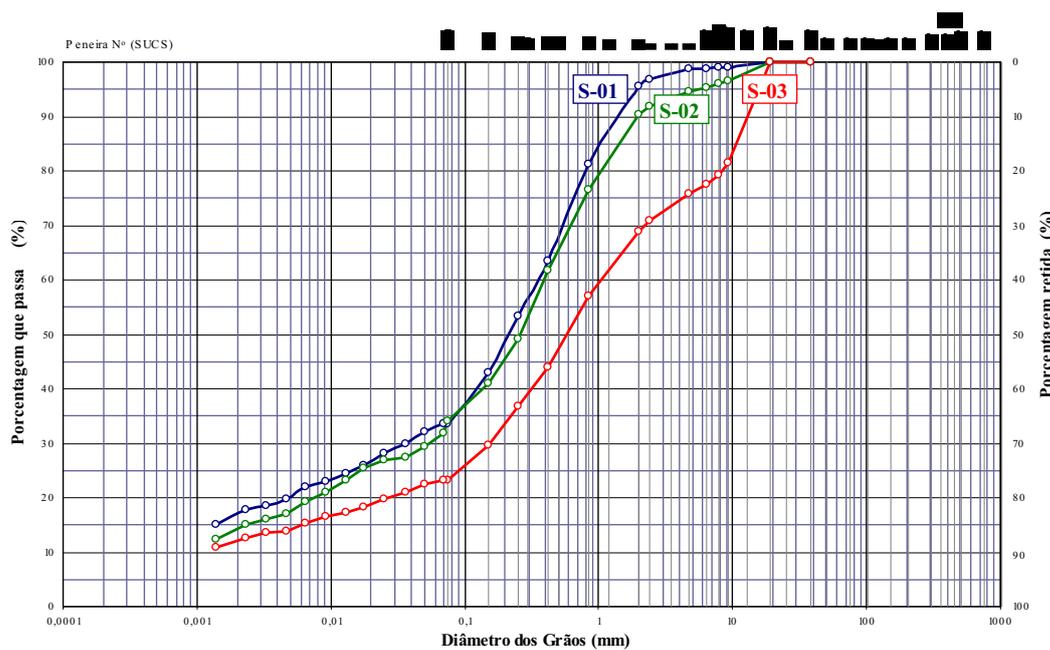


Figura 4.49 – Curvas granulométricas das sondagens 01, 02 e 03, sob profundidade de 0,5 a 1,0m

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.

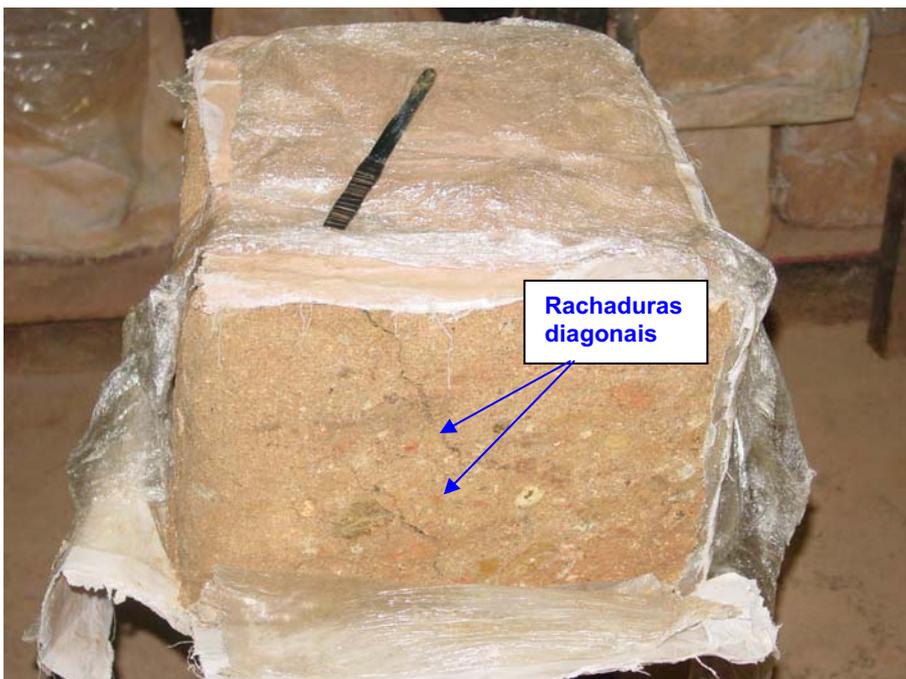


Figura 4.51 – Bloco de solo indeformado aberto, apresentando rachaduras diagonais

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:

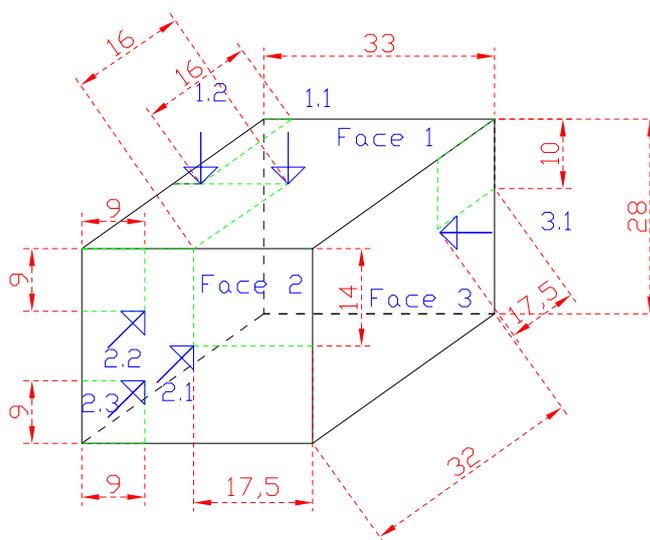


Figura 4.52 – Posicionamento dos pontos no bloco de solo (dimensões em centímetros)

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. Ensaios 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

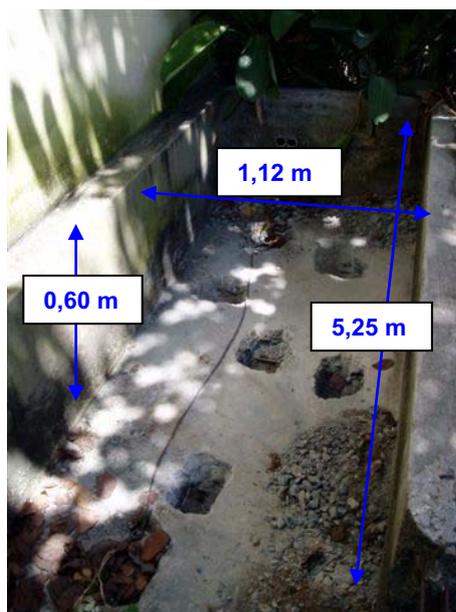


Figura 4.62 – Laje de concreto perfurada

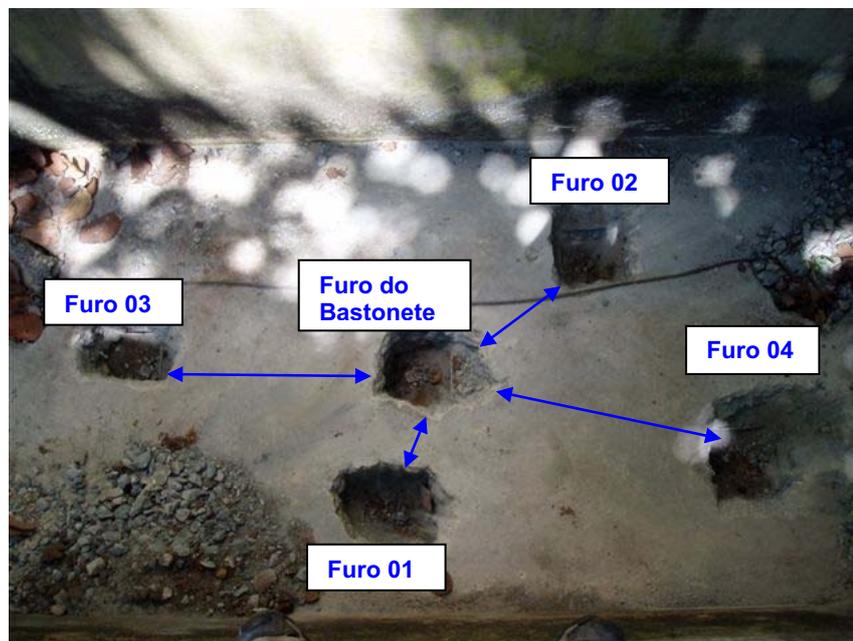


Figura 4.63 – Furos executados

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:

$$W_{\text{H}_2\text{O}+\text{caulim}} = 1,5 \times LL_{\text{caulim}} \quad \text{Equação 4.1}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_s \times W_{\text{mistura}} \quad \text{Equação 4.1}$$

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.

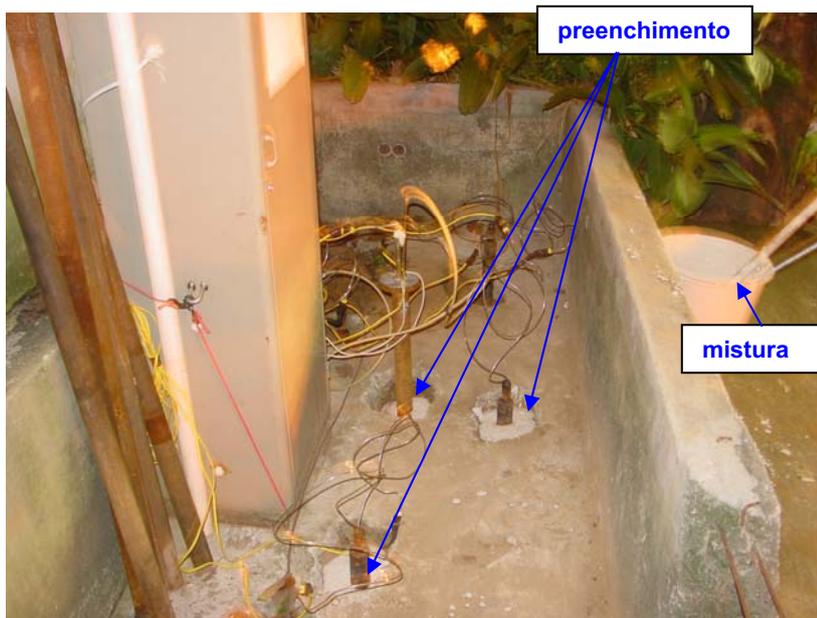


Figura 4.69 – Furos preenchidos com a mistura

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**

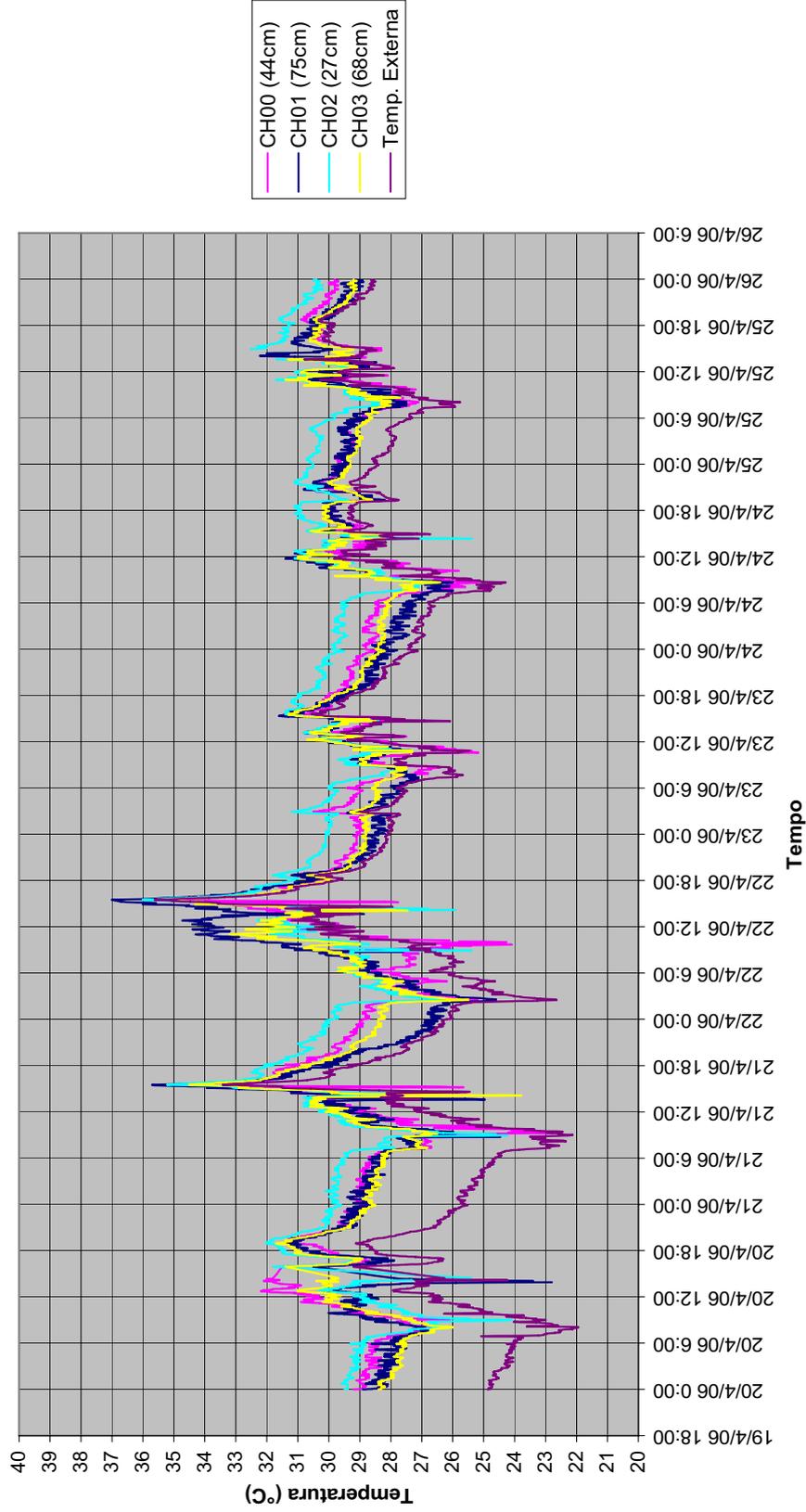


Figura 4.70 – Aplicação do bastonete térmico no CE-02, de 20/04/2006 a 25/04/2006

#### 4.4.3.2. Segundo Experimento

Para este segundo experimento, não seria mais possível a instalação da instrumentação nos mesmo 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:

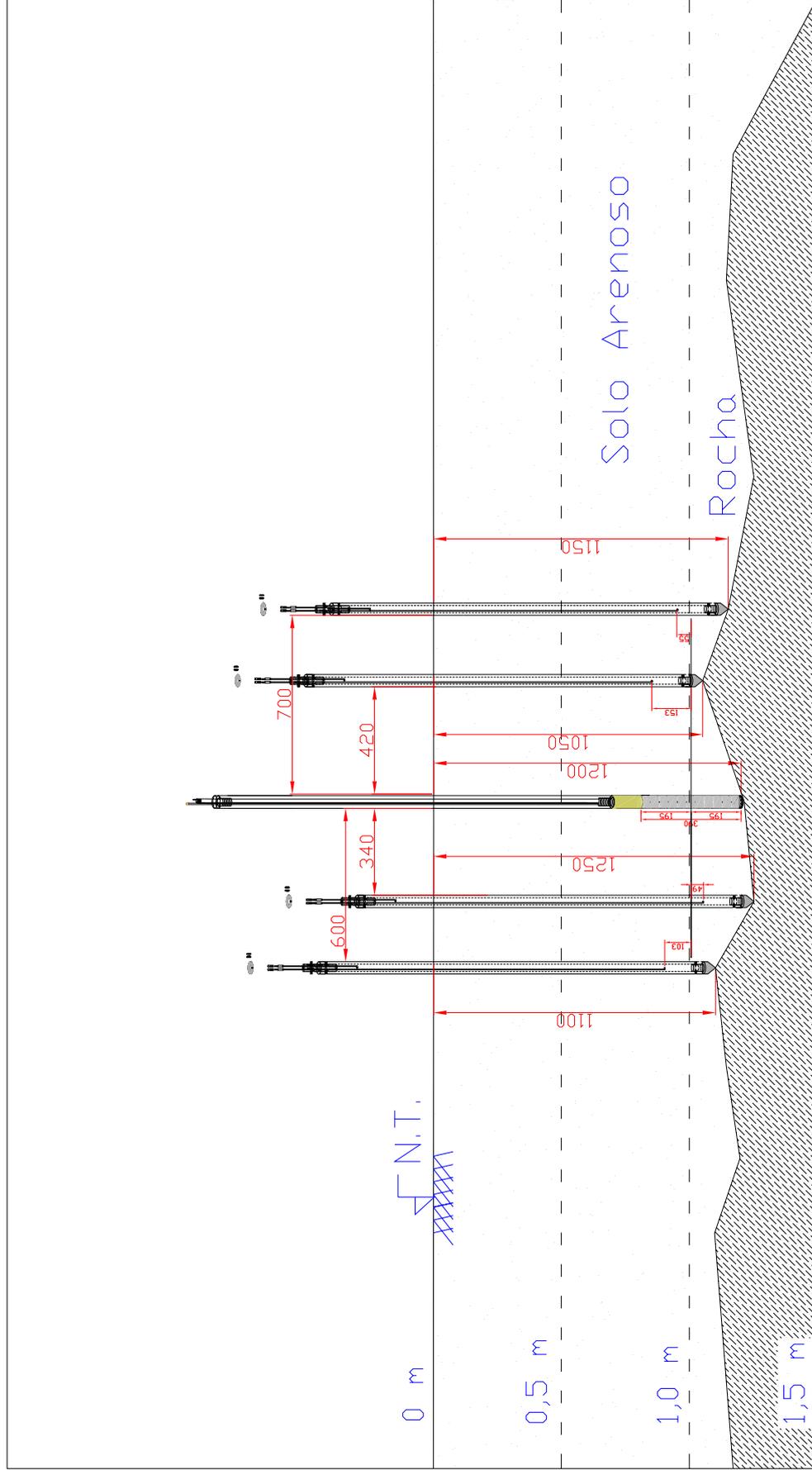


Figura 4.71 – Configuração do segundo experimento no CE-02

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

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

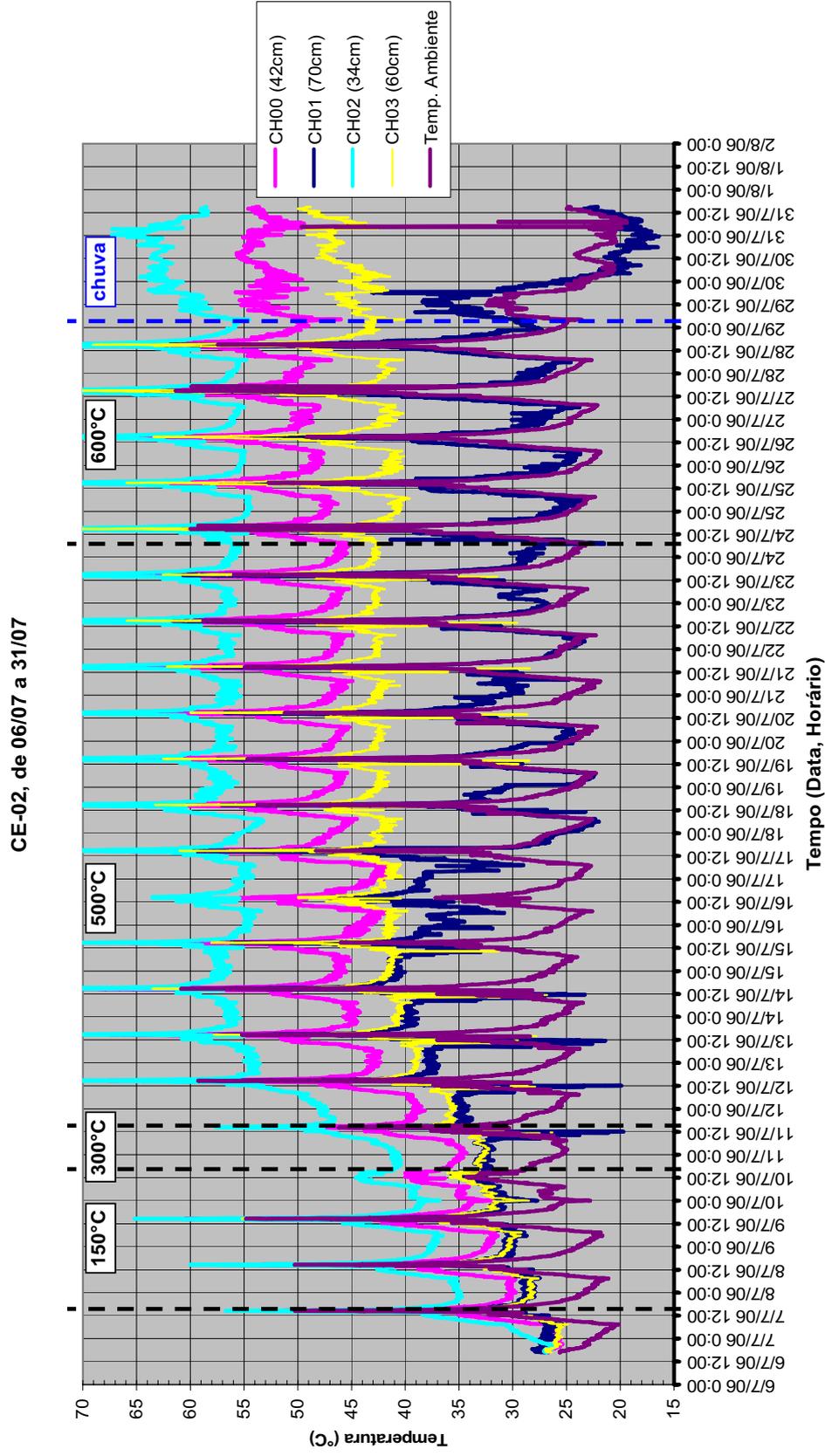


Figura 4.86 – Aplicação do bastonete térmico no CE-02, de 06/07/2006 a 31/07/2006

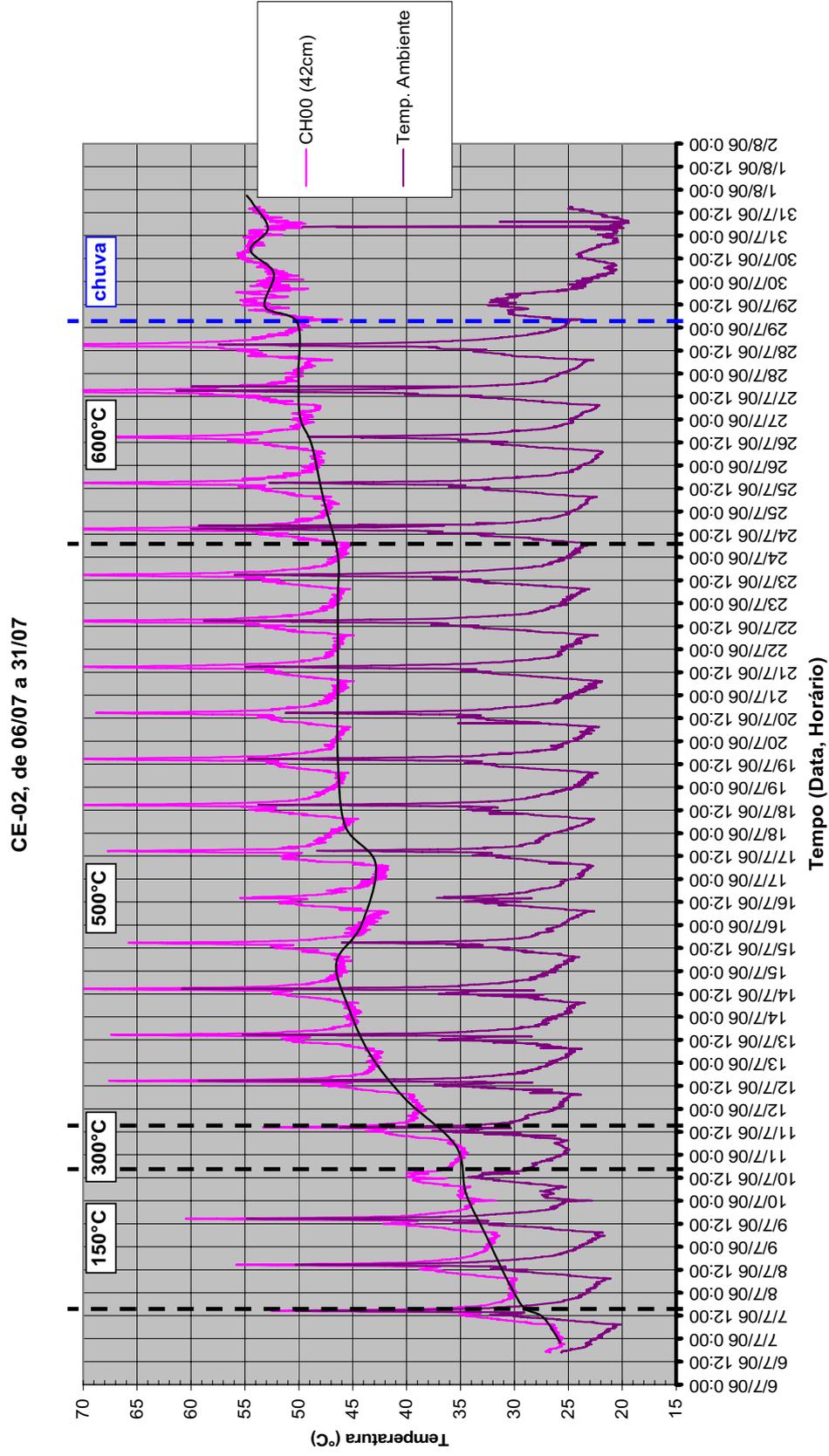


Figura 4.87 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 42 cm de distância

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

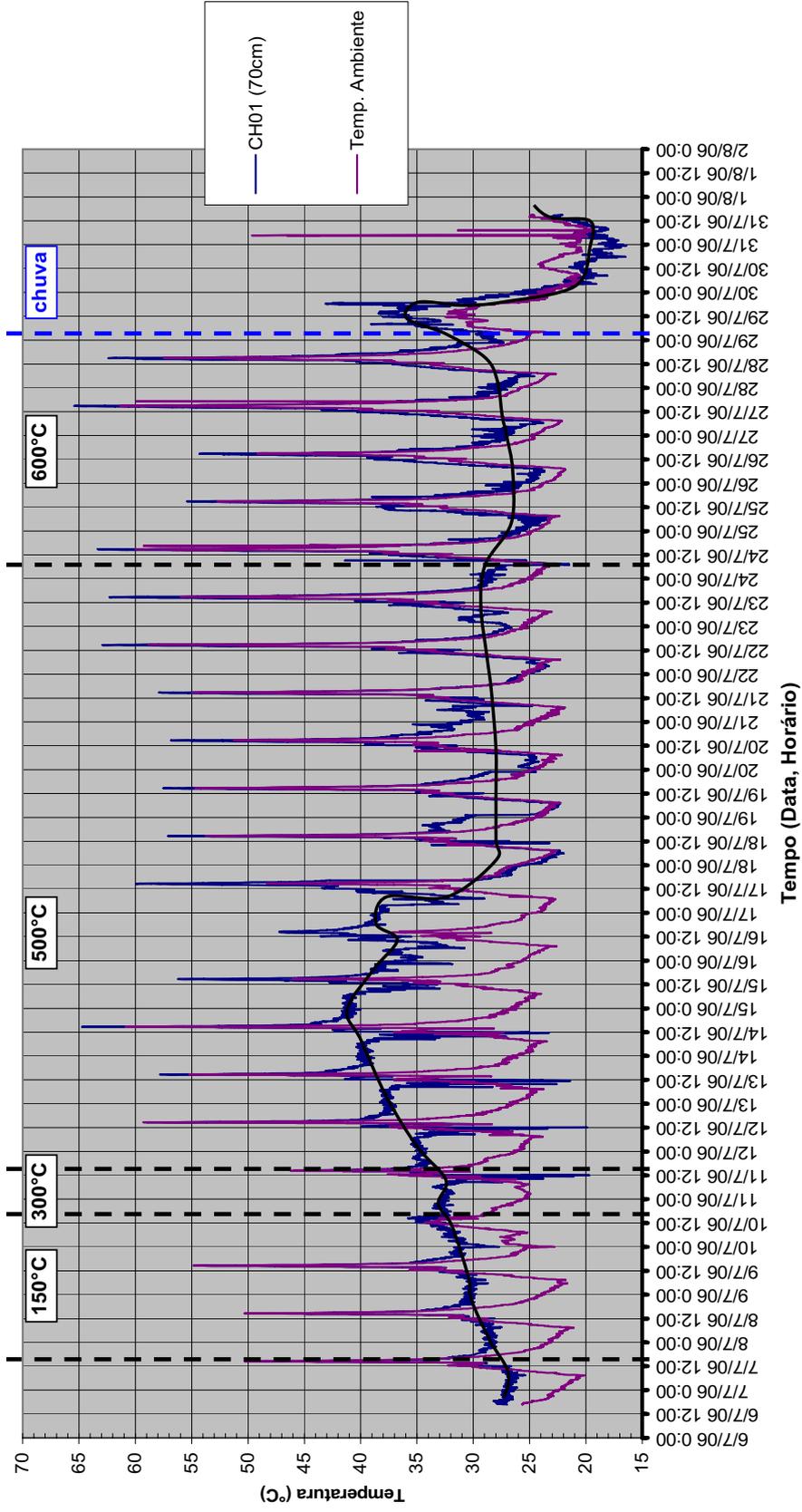


Figura 4.88 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 70 cm de distância

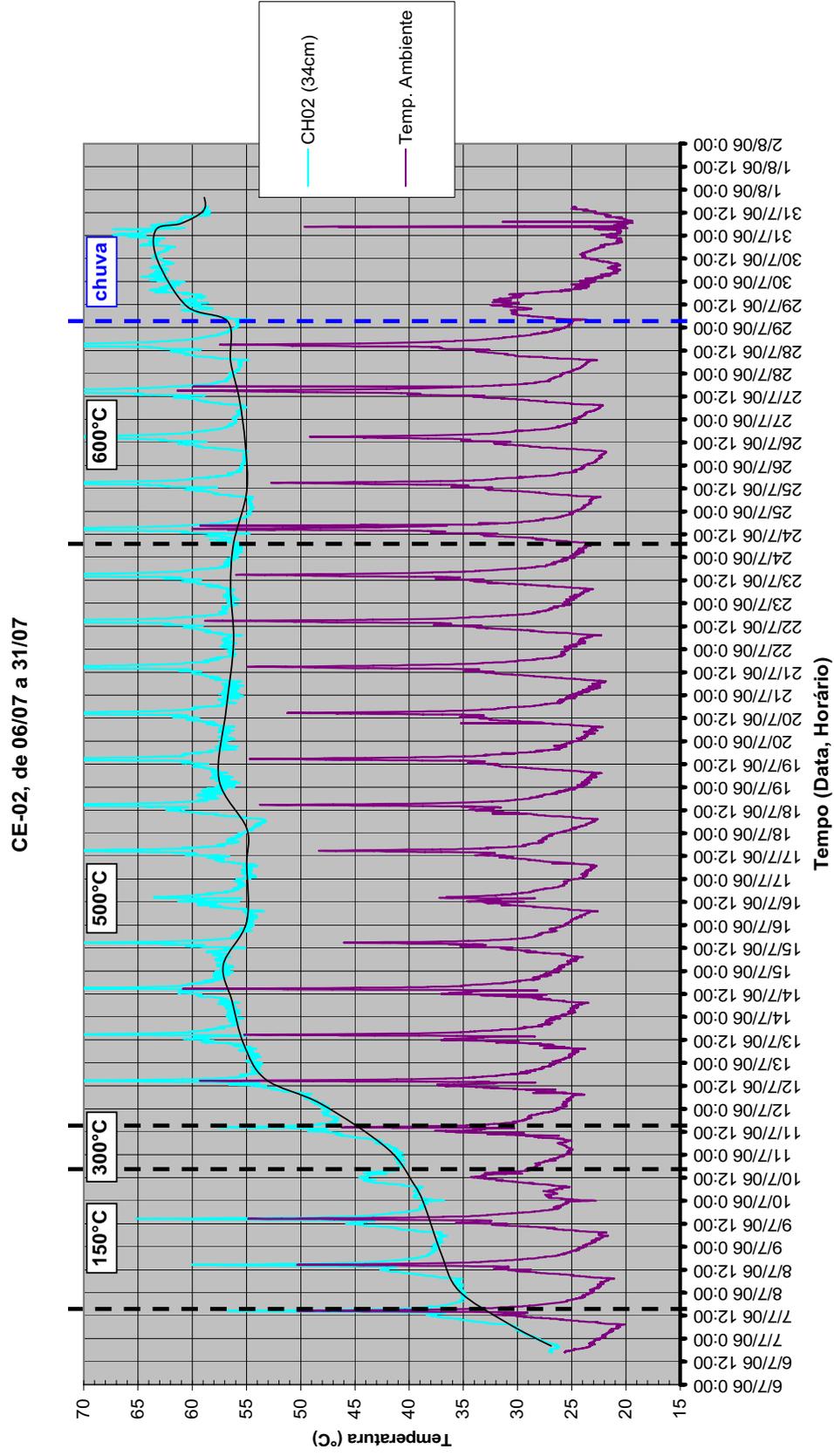


Figura 4.89 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 34 cm de distância

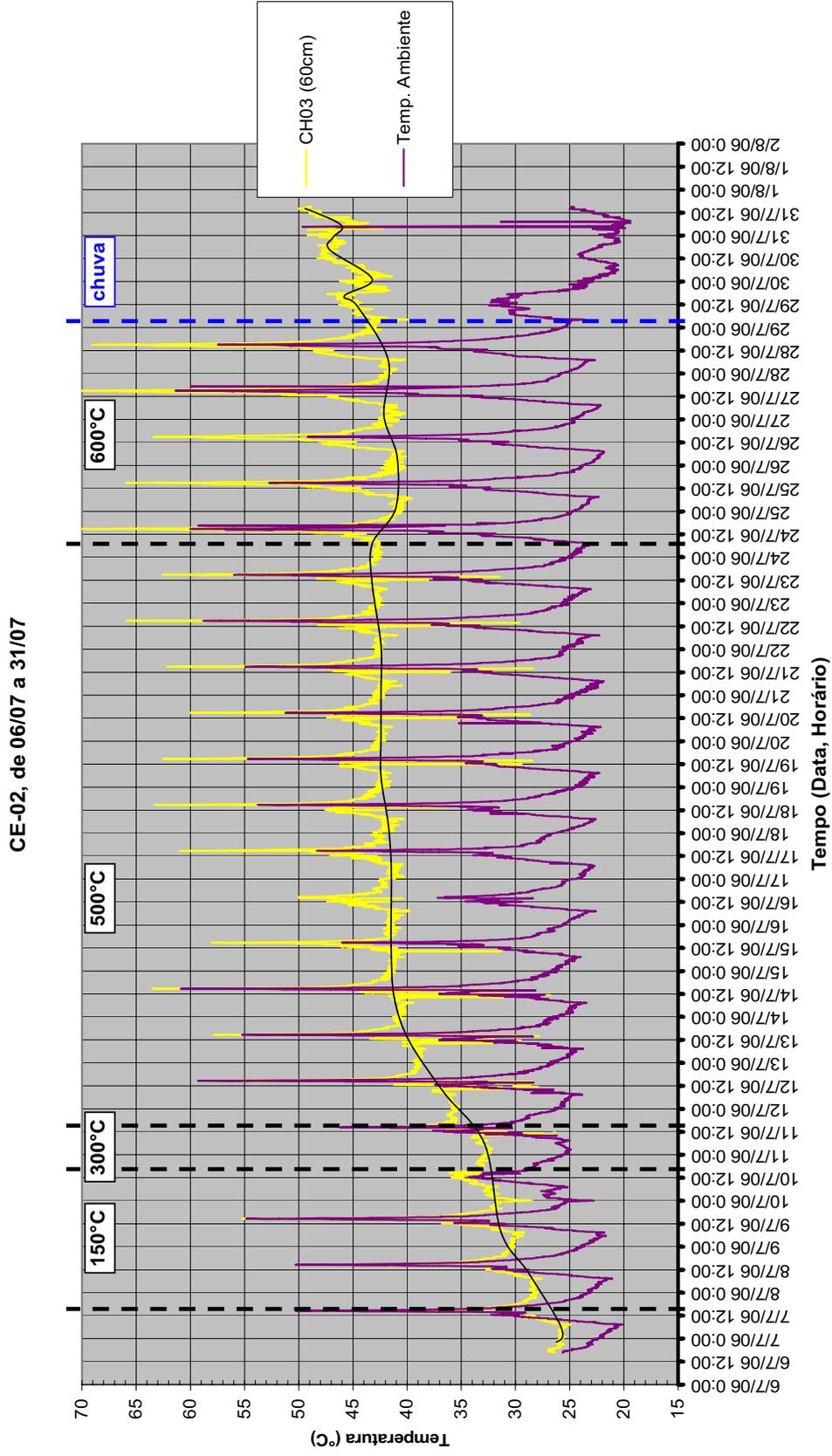


Figura 4.90 – Influência do aquecimento do bastonete térmico no ponto situado a 60 cm de distância

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 (06 a 31 de julho)		
Ponto	1ª Fase (até 500°C)	2ª Fase (até 600°C + 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.

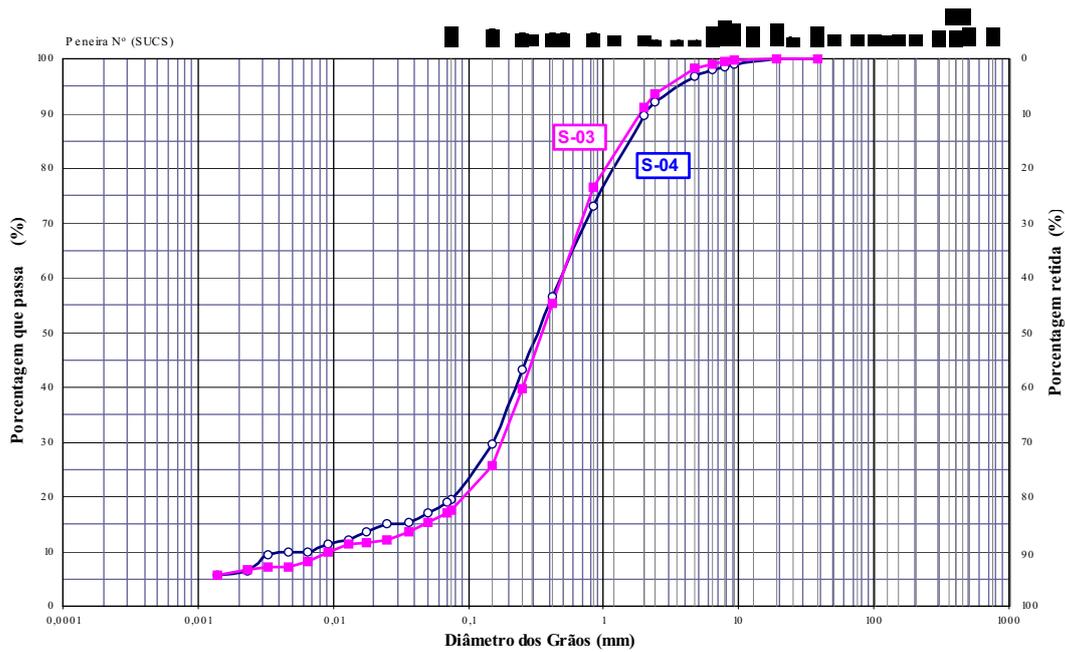


Figura 4.91 – Curvas granulométricas das sondagens 03 e 04, sob profundidade de 0,5 a 1,0m

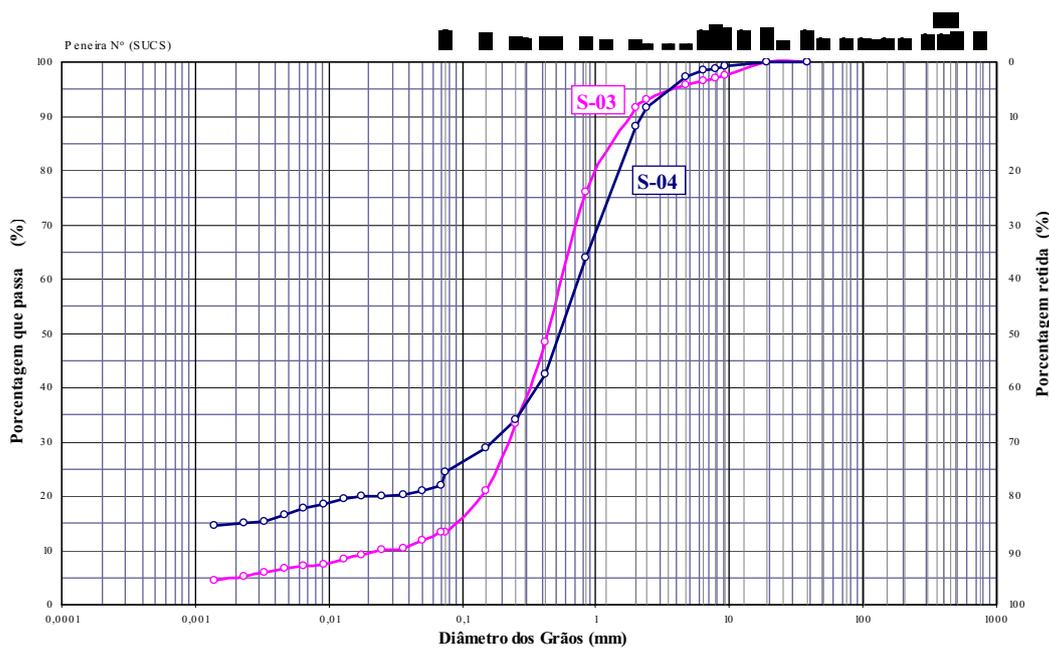


Figura 4.92 – Curvas granulométricas das sondagens 03 e 04, sob profundidade de 1,0 a 1,5m

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.