

## 5

### Avaliação do Sistema de Dessorção Térmica *Ex Situ*

O Sistema de Dessorção Térmica *Ex Situ* idealizado na PUC-Rio para o tratamento de solos contaminados por combustíveis está esquematizado na Figura 1. O sistema consiste de unidades de dessorção térmica capazes de tratar 1,5m<sup>3</sup> de solo contaminado por batelada. As emissões gasosas advindas do aquecimento do solo são tratadas pelo sistema desenvolvido por Baptista (2005). A alimentação elétrica do conjunto pode ser realizada através da rede elétrica ou, alternativamente, por um grupo gerador.

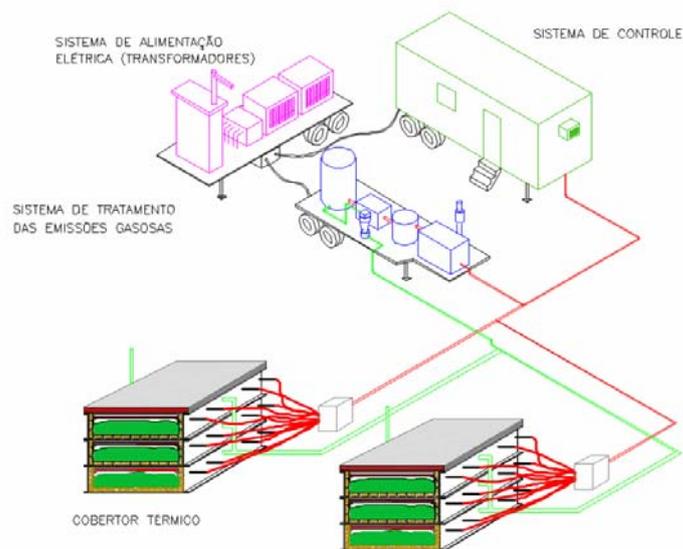


Figura 1 - Diagrama esquemático do sistema PUC-Rio de dessorção térmica *ex situ*.

A unidade de dessorção térmica, vista esquematicamente na Figura 2, é composta por 3 (três) caixas retangulares de aço inoxidável 316 e cobertores térmicos, desenvolvidos por Pires (2004), que proporcionam o aquecimento do meio a temperaturas que permitam a volatilização dos contaminantes. Durante o processo o interior das caixas é submetido a uma aeração forçada para evitar o coqueamento das partículas sólidas do meio poroso. Cada caixa possui saídas para a retirada dos gases para posterior tratamento. A temperatura a que cada caixa é submetida é controlada por um sistema de controle que se baliza pelo sinal de um

termopar posicionado imediatamente abaixo do cobertor térmico. A temperatura à qual o solo é submetido é monitorada durante o tratamento por termopares instalados em diversas posições no interior de cada caixa metálica. Este sistema ainda não foi testado é por isso que esta dissertação avaliara o funcionamento do equipamento de dessorção térmica *ex situ* utilizando um solo contaminado.

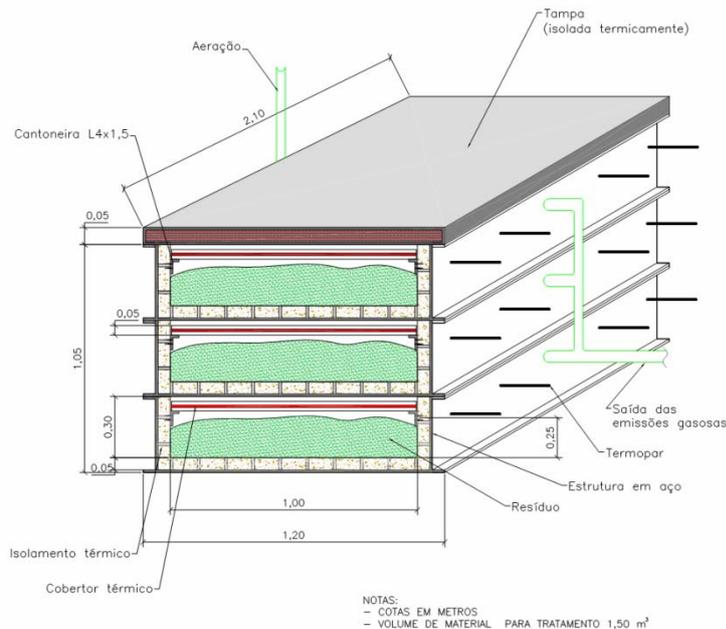


Figura 2 - Diagrama esquemático da unidade de dessorção térmica

No presente trabalho não foi possível testar o sistema em sua integralidade dada a restrição de espaço físico no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM). O pé direito do subsolo do LEM não atendia as condições de operacionalidade do sistema. Desta forma, testou-se o desempenho de apenas uma caixa metálica com o solo contaminado advindo de um antigo posto de serviços no Grajaú. O sistema de tratamento das emissões desenvolvido por Baptista (2005) também não foi utilizado devido a restrições do espaço físico.

Nosso trabalho começou com a montagem de uma rede elétrica para o funcionamento do equipamento no LEM, logo depois foi montado o equipamento, descrito no capítulo 3, e foram feitos uma serie de testes com areia limpa para garantir um ótimo funcionamento do equipamento e uma adequada programação dos controladores de temperatura, finalmente foi realizado um teste com solo contaminado, que será descrito a continuação.

## 5.1. Lay out do Experimento

A Figura 3 apresenta o equipamento que avaliou o desempenho do sistema de dessorção térmica.

Neste experimento, a energia utilizada foi da rede elétrica da concessionária Light exceto das 17:30h às 20:30h onde a energia consumida foi suprida por geradores próprios da PUC-Rio. Foi montada toda uma infra-estrutura elétrica para alimentar o sistema com 380V e 40A. Os controladores de temperatura e os cobertores térmicos foram alimentados com 220V enquanto que a unidade de aquisição foi alimentada com 110V. Instalou-se, ao lado do quadro elétrico, um medidor de consumo para avaliar o gasto no decorrer do ensaio.

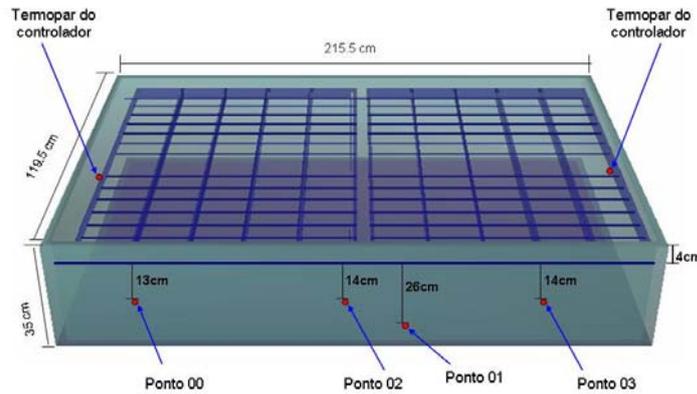


Figura 3 – Equipamento de avaliação do sistema de dessorção térmica.

A temperatura no decorrer do ensaio foi monitorada por intermédio de 4 (quatro) termopares instalados ao longo da lateral da caixa metálica, obedecendo ao esquema da

Figura 4. Os termopares empregados tinham a mesma dimensão, *i.e.* 80 cm, e mediam a temperatura em sua extremidade. Os termopares eram excitados pela unidade de aquisição de dados e os dados das temperaturas medidas eram armazenados em sua memória interna e periodicamente transferidos para um computador pessoal.

a)



b)



Figura 4 – *Layout* da instrumentação do ensaio: a) disposição espacial dos termopares e b) termopares instalados

Para evitar o coqueamento durante a aplicação de calor foi utilizado um soprador. O ar gerado pelo soprador era conduzido para o interior da caixa térmica por intermédio de mangueiras plásticas aramadas e tubos de aço inoxidável, conforme pode ser visto na Figura 5. No decorrer do ensaio constatou-se que havia uma transmissão de calor por condução através do tubo metálico e foi necessário instalar um ventilador portátil, visto na Figura 5, para impedir a degradação das mangueiras plásticas. O soprador funcionava em intervalos de 45 minutos com 15 minutos de pausa para evitar superaquecimento de seu motor elétrico. O acionamento automático do soprador era garantido por um multi-timer digital da marca Icel, modelo TI-10.



Figura 5 – Detalhe de instalação do soprador.

Por último, um guincho do tipo girafa foi utilizado para manusear a tampa metálica do sistema de dessorção térmica. A Figura 6 mostra o sistema em operação.



Figura 6 – Detalhe do sistema em operação.

## 5.2. Condução do Experimento

O ensaio empregou 346,40 kg de solo contaminado com um teor de umidade gravimétrico médio de 15%. O solo, contido nos sacos plásticos, foi disposto manualmente no interior da caixa de dessorção térmica cuidadosamente para que se observasse uma uniformidade em sua distribuição. Durante o decorrer da colocação foi empregada uma máscara plástica, vista na Figura 7, para

minimizar a inalação de compostos voláteis. Os sacos plásticos foram descartados como resíduo perigoso.



Figura 7 – Detalhe da colocação do solo contaminado na caixa de dessorção térmica

Após a colocação do material na caixa de dessorção térmica foram instalados os cobertores térmicos. Entre os cobertores foram utilizadas mantas isolantes de amianto para impedir os contatos entre os conectores elétricos do cobertor e as paredes da caixa elétrica, vide Figura 8, o que poderia gerar um de curto circuito no sistema. Este problema pode acontecer devido à dilatação dos cobertores térmicos e das paredes da caixa de dessorção térmica com o aumento da temperatura no interior da caixa térmica durante o tratamento.



Figura 8 – Detalhe da instalação das mantas isolantes

O ensaio foi conduzido obedecendo a um sistema de rampas e patamares. Inicialmente o solo foi submetido a uma temperatura de 50°C, por um período de 6 horas. Em seguida foram acrescentados mais 20°C por um período de 30 minutos

atingindo-se a temperatura de 70°C, que permaneceu por 18 horas. Decorrido este prazo, foram acrescentados mais 30°C, por um período de 30 minutos atingindo-se a temperatura de 100°C, que permaneceu por 24 horas. Novamente foram acrescentados 100°C, por um período de 30 minutos, atingindo-se a temperatura de 200°C, que permaneceu por 24 horas. Novamente foram acrescentados 100°C, por um período de 30 minutos, atingindo-se a temperatura de 300°C, que permaneceu por 24 horas. Finalmente foram acrescentados mais 100°C, por um período de 30 minutos atingindo-se a temperatura de 400°C, que permaneceu por 24 horas.

A Figura 9 apresenta os valores de temperatura a que foram submetidos os cobertores térmicos e os valores determinados de temperatura medidos pelos 4 termopares instalados.

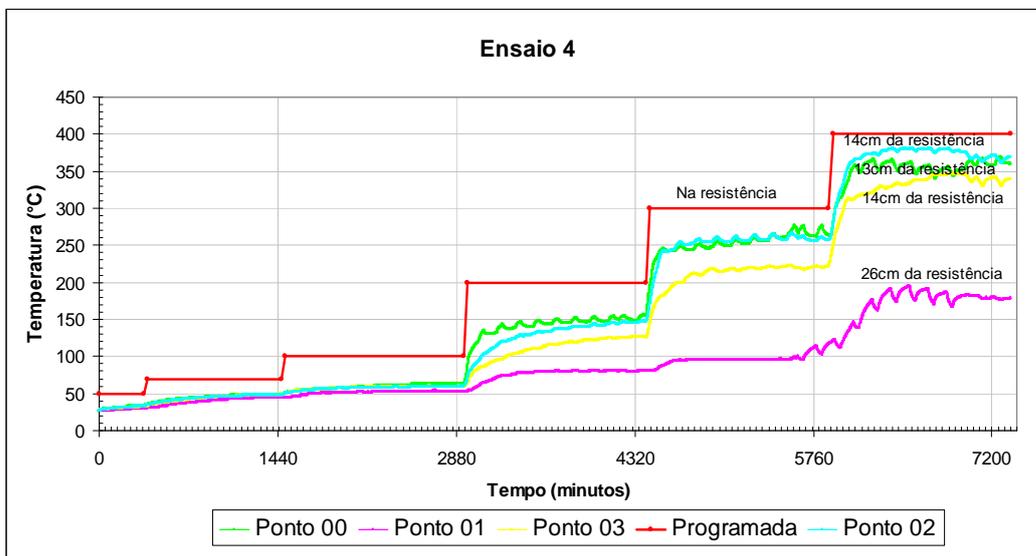


Figura 9 - Variação da temperatura no decorrer do ensaio

A Figura 9 mostra uma diferença entre o valor de temperatura aplicado ao cobertor térmico controlado por um termopar posicionado imediatamente abaixo e os valores medidos pelos diferentes termopares posicionados, de acordo com a Figura 4, no interior da massa de solo. Nos primeiros instantes do ensaio, a diferença observada é fruto do bolsão de ar existente entre os cobertores térmicos e a massa de solo. Sendo o ar um mau condutor térmico, os cobertores térmicos não conseguem transmitir integralmente ao solo o calor emitido.

À medida que o valor do teor de umidade do solo vai sendo reduzido observa-se um crescimento na diferença de temperatura entre os diferentes pontos

da massa de solo. O aumento da proporção de gás nos poros do solo, aliado à baixa condutividade térmica das partículas sólidas do solo, resulta em uma crescente diferença de temperatura entre as partes mais superficiais do solo na caixa de dessorção e aquelas que estão posicionadas próximo ao seu fundo.

Devido ao solo ser constituído de grãos de quartzo e feldspato observou-se nos instantes finais do ensaio diferenças de temperatura de quase  $150^{\circ}\text{C}$  entre pontos espaçados de apenas 12 cm.

### 5.3. Avaliação do Experimento

Ao final do experimento, a tampa da caixa de dessorção foi içada pela girafa e pode-se constatar uma mudança na tonalidade da cor do solo tratado. Antes do tratamento o solo apresentava uma cor marrom escura que, com a exposição a altas temperaturas, tornou-se amarelo avermelhada, conforme pode ser visto na Figura 10. A mudança da cor, aliada à ausência de odor, foi um indicativo da remoção dos hidrocarbonetos de petróleo.



Figura 10 – Solo contaminado após o tratamento

Análises no solo tratado empregando o procedimento estabelecido pela CETESB, vide Figura 11, indicaram que a concentração de TPH nas amostras analisadas estavam abaixo do limite de detecção do analisador de gás.



Figura 11–Determinação da concentração de TPH no solo tratado

No entanto, observou-se uma pequena quantidade de material de tonalidade mais escura quando da retirada do material do fundo da caixa. A Figura 12 mostra um material pedregoso com tonalidade próxima à inicial, mas sem a presença de odor característico de combustível. Análises realizadas neste material também constataram níveis de TPH abaixo do limite de detecção do analisador de gás denotando que houve coqueamento.



Figura 12 – Solo coqueado

O coqueamento é um indicativo que não houve uma aeração uniforme no interior da caixa. Este experimento mostrou a necessidade de alterar a forma de

aeração em seu interior. Teoricamente, a forma mais adequada de aeração é a vertical descendente, mas na prática há uma dificuldade de penetração do ar mais quente e, por conseguinte menos denso, no interior da massa de solo devido à sua baixa permeabilidade quando úmido.

Um outro problema enfrentado foi a variação de volume das peças metálicas resultante da sua exposição a altas temperaturas durante o ensaio. Esta variação foi primeiramente constatada na fase de ajuste do sistema de dessorção onde a dilatação dos componentes resultava em um curto circuito no cobertor térmico. Este problema foi contornado com a utilização de mantas de amianto. No entanto, durante a execução do ensaio com o solo contaminado a tampa da caixa empenou em uma das suas extremidades provocando uma ligeira fuga dos gases emitidos pela volatilização do contaminante.

Foram efetuadas as medições de TPH nas emissões resultantes da volatilização do contaminante durante todo o experimento, dando como resultado níveis de TPH abaixo do limite de detecção do analisador de gás.

#### 5.4. Custo do Experimento

A Figura 13 apresenta o consumo elétrico, em kW.h, durante a execução do ensaio.

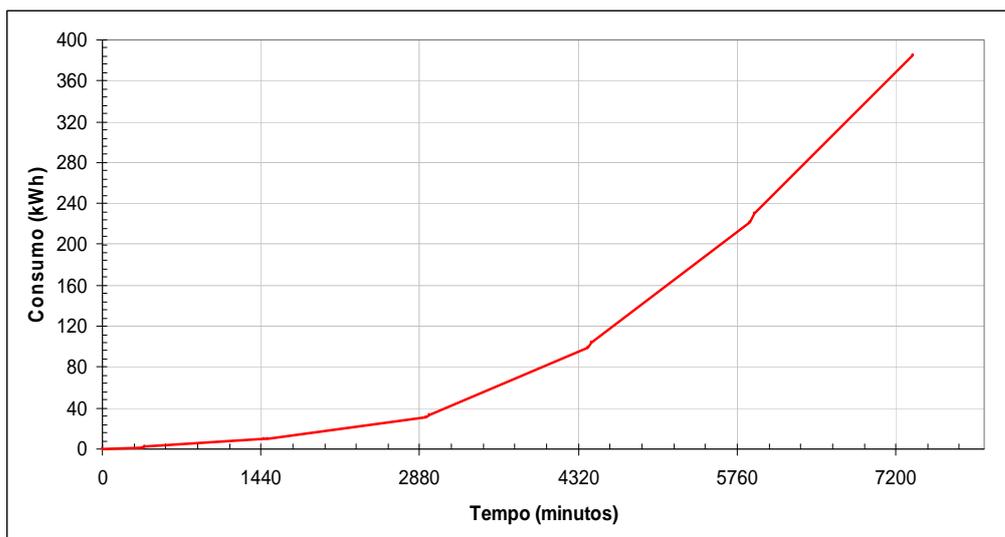


Figura 13 – Consumo elétrico

Com base na tarifa elétrica aplicada para classe não residencial pela Light na Cidade do Rio de Janeiro para o mês de abril o custo do ensaio montou a quantia de R\$ 149,21. O consumo elétrico foi de 384,6 kWh, o equivalente ao consumo de 4 (quatro) geladeiras ao longo de 1 (um) mês.

O custo equivale a R\$ 0,43/kg de solo tratado, um valor bem abaixo do cobrado por unidades de incineração do Estado do Rio de Janeiro (*i.e.*, cerca de R\$ 3,00/kg) e inferior ao cobrado pelas empresas de gerenciamento de resíduos para dispô-lo adequadamente (*i.e.*, cerca de R\$ 0,60/kg).