

### 3

## Sistema de Dessorção Térmica *Ex Situ*

### 3.1. Considerações iniciais

Na PUC-RIO já foram desenvolvidos alguns protótipos de sistema de dessorção térmica por pesquisas na área de geotecnia ambiental. O primeiro protótipo, desenvolvido por Portes (2002), tinha como objetivo remediar *in situ* resíduos de limpezas de praias atingidas por derrame de óleo.

Este protótipo foi aperfeiçoado por Pires (2004) que tinha como objetivo utilizar a dessorção térmica para remediação de britas contaminadas das dutovias (*pipeways*) e de pisos de concreto. O protótipo de Portes (2002) não era apropriado para aplicações em dutovias; em função disto, Pires (2004) desenvolveu um novo protótipo visando às aplicações em dutovias.

Em ambos os casos foram utilizados o cobertor térmico como fonte de aquecimento. Nos dois casos foi comprovado que os sistemas não eram eficientes para profundidades maiores do que 40 cm, o que já era esperado para o cobertor térmico. Os sistemas obtiveram bons resultados para tratamentos superficiais, o que motivou desenvolver novas pesquisas. Baptista (2005) desenvolveu um novo sistema que utilizou um bastonete térmico como fonte de aquecimento para aplicações *in situ*. O sistema é aplicado a profundidades maiores que não são possíveis de serem atendidas através do cobertor térmico. Viana (2006) desenvolveu um novo bastonete térmico baseado no instrumento construído por Baptista (2005), porém com algumas modificações no sentido de aumentar o seu poder calorífico, direcionar a sua aplicabilidade para campo, bem como lhe fornecer maior resistência às altas temperaturas e às condições desfavoráveis ambientais.

Um novo sistema de dessorção térmica *Ex situ* foi projetado no Laboratório de Geotecnia da PUC - RIO e construído no Laboratório de Estruturas e materiais (LEM) da PUC - RIO. Este capítulo apresenta os equipamentos que compõem o sistema de dessorção térmica *Ex situ* desenvolvido.

### 3.2. Componentes do Sistema de Dessorção Térmica *Ex situ*

O novo protótipo de dessorção térmica *Ex situ* apresentado esquematicamente na Figura 1, possui os seguintes componentes:

- Caixa de dessorção térmica;
- Fibra cerâmica (isolante térmico);
- Controladores de temperatura;
- Sistema de aquisição de dados;
- Guincho hidráulico;
- Fonte de alimentação elétrica.

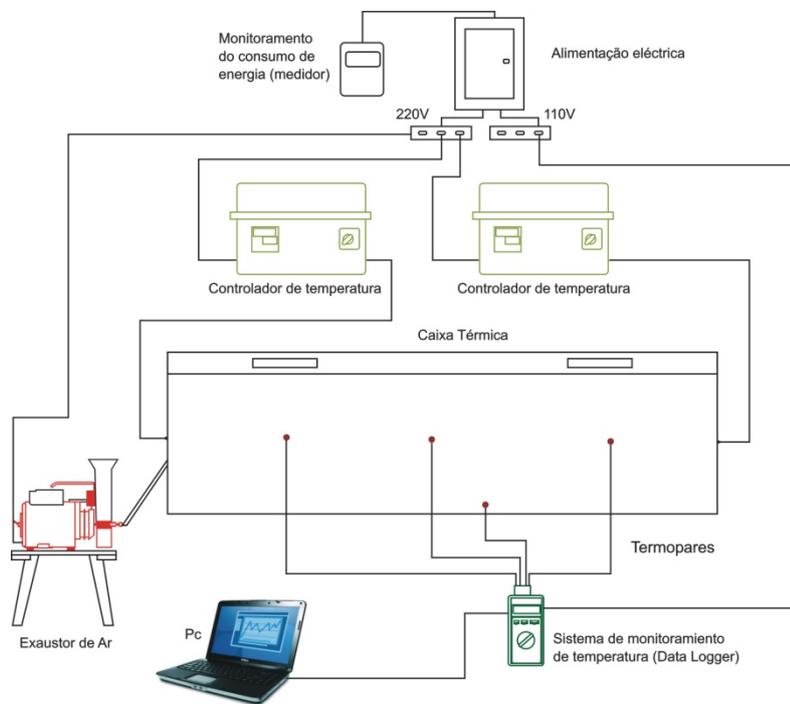


Figura 1 – Diagrama esquemático do Sistema de Dessorção Térmica *Ex Situ*.

Segue abaixo a descrição mais detalhada desses equipamentos desenvolvidos e dos materiais utilizados.

### 3.2.1. Caixa de Dessorção Térmica

A caixa térmica foi confeccionada em aço inoxidável 310 com dimensões de 215,5 x 119,5 x 35 cm e cujo volume é 0,831 m<sup>3</sup>. A Figura 2 mostra um esquema da caixa de dessorção térmica.

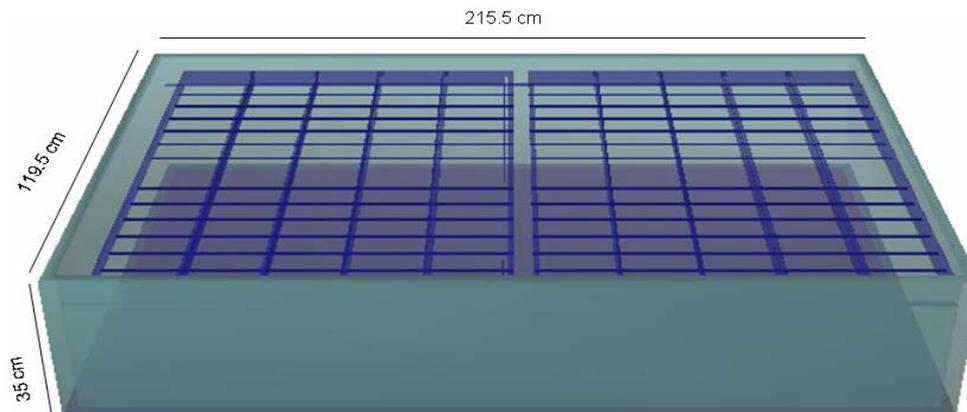


Figura 2 - Caixa de Dessorção Térmica.

A caixa térmica apresenta uma tampa com dimensões de 215,5 x 119,5 x 5,4 cm que no seu interior está preenchida com fibra cerâmica. A Figura 3 e a Figura 4 mostram a tampa da caixa de dessorção térmica.



Figura 3 - Tampa da caixa de dessorção térmica.

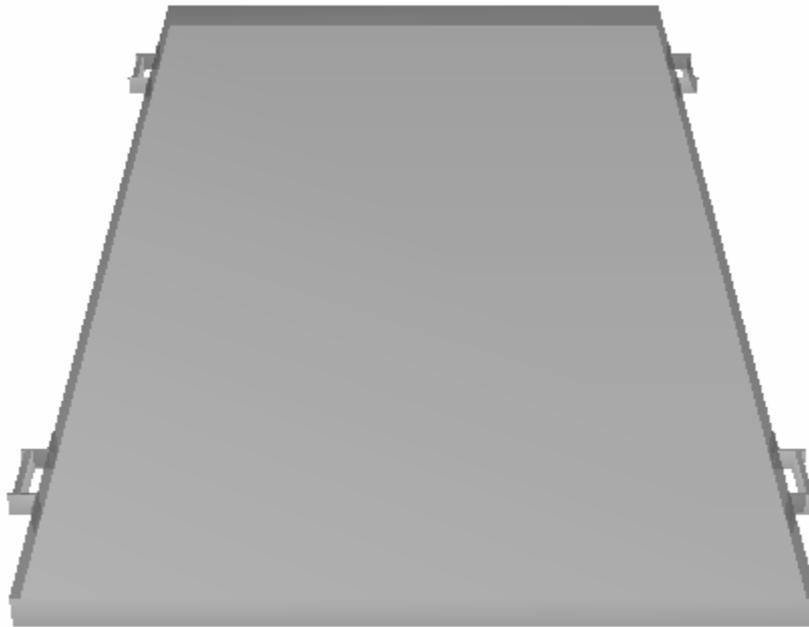


Figura 4 - Tampa da Caixa Dessorção Térmica

Dentro da caixa térmica foram colocadas duas resistências elétricas montadas em uma estrutura metálica de formato retangular apresentadas na Figura 5. Cada resistência suporta a passagem de uma corrente de 20A, o que permite a aplicação de uma potência de 4400W quando aplicado um potencial de 220V. A Tabela 1 resume as principais características físico-elétricas de cada resistência elétrica.

Tabela 1 - Características físico-elétricas da resistência.

Característica	Valores
Resistência ( $\Omega$ )	11
Potencia (W)	4400
Voltagem (V)	220
Corrente (A)	20

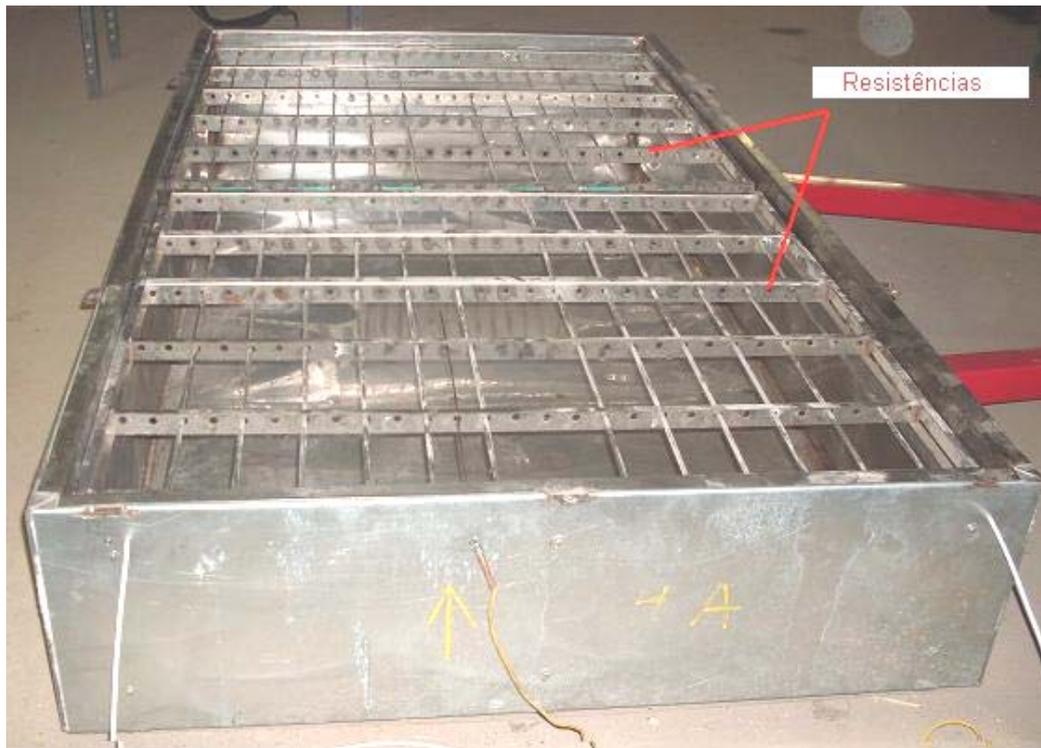


Figura 5 - Resistências montadas dentro da Caixa de dessorção térmica.

Foram usadas para confeccionar cada uma das resistências estruturas metálicas em perfis em aço inoxidável 310. Cada resistência tem dimensões de 113,5 x 99 x 4 cm. A Figura 6 e a Figura 7 mostram as resistências elétricas utilizadas no sistema de dessorção térmica *ex situ*.



Figura 6 - Resistência elétrica.

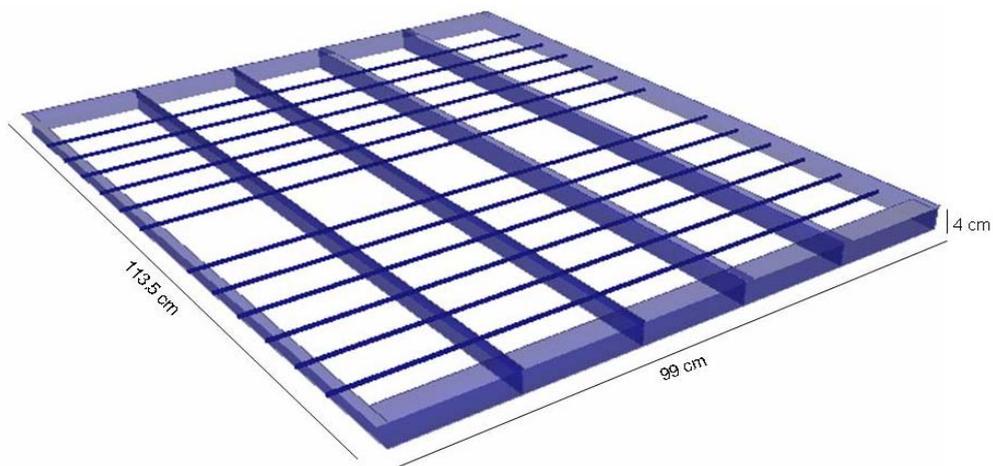


Figura 7 - Resistência elétrica.

O aço 310 é largamente utilizado em razão de suas propriedades tais como: resistência à corrosão, resistência ao calor e ao frio, aparência, pelos valores que apresentam nas suas propriedades físicas. O aço 310 não é afetado estruturalmente quando submetido a aquecimentos excessivos (Gerdau, 2003).

Segundo a NBR-6847/81 este aço apresenta alta resistência à corrosão em diversos ambientes agressivos como demonstra a Tabela 2.

Tabela 2 Resistência à corrosão (NBR 6847/81).

Tipo de Aço	Atmosfera Branda e água doce	Atmosfera		Água salgada	Química		
		Indústria	Marinha		Branda	Oxidante	Redutor
416	X						
410	X				X		
420	X						
420C	X						
430	X	X			X	X	
302	X	X			X	X	
303	X	X	X		X		
304	X	X	X		X	X	
304L	X	X	X		X	X	
316	X	X	X	X	X	X	X
316L	X	X	X	X	X	X	X
310	X	X	X		X	X	

Nota: O “X” indica que um tipo específico pode ser considerado resistente aquele meio corrosivo.

### Termopares

Foram utilizados quatro termopares tipo K, colocados na parede frontal da caixa, distribuídos três no nível meio e um no nível inferior.

Os três Termopares colocados no nível meio da caixa são do tipo K de junta quente isolada inox 310 com comprimento de 800 mm, com pote liso e cabo de compensação com revestimento de trança de cobre estanhado de 5 m, a faixa de medição é de -270 a 1372 °C conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de termopares.

<b>Tipo</b>	<b>Alcance Temperatura °C</b>	<b>Materiais e ligas</b>
<b>Metal - Base</b>		
E	-270 a 1000	Níquel - cromo Vs. Cobre - níquel.
J	-210 a 1200	Ferro Vs. cobre - níquel
T	-270 a 400	Cobre Vs. cobre - níquel
K	-270 a 1372	Níquel - cromo Vs. níquel - alumínio
N	-270 a 1300	Níquel - cromo - silício Vs.. Níquel - silício - magnésio
<b>Metal - Nobre</b>		
R	-50 a 1768	Platino - 13% ródio Vs. platino
S	-50 a 1768	Platino - 10% ródio Vs. platino
B	0 a 1820	Platino - 30% ródio Vs. platino - 6 % ródio

Os termopares são instalados na caixa com adaptadores especiais de montagem na estrutura anilhada tipo ajustável em aço com rosca longa e contra porca fixação tipo transversal da caixa. A Figura 8 e a Figura 9 mostram o adaptador do termopar.

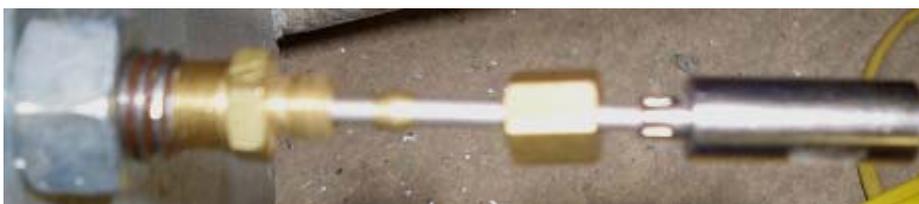


Figura 8 Adaptador do Termopar.

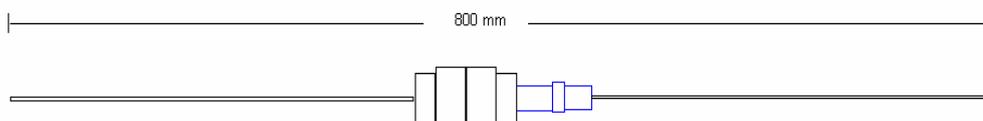
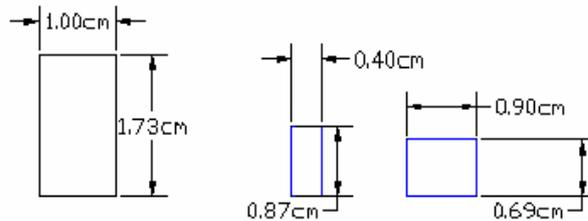


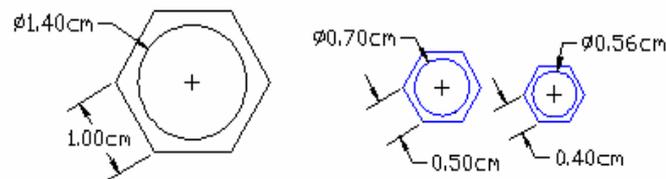
Figura 9 Termopar com adaptador.

## Contra porca de fixação

Vista Lateral

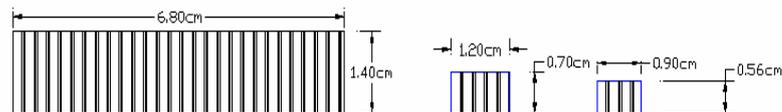


Vista Frontal



## Parafuso

Vista Lateral



Vista Frontal



Figura 10 Estrutura anilhada tipo ajustável.

O termopar do nível inferior da parede lateral é tipo K de junta quente isolada inox 310 com comprimento de 1.100mm, com pote liso e cabo de compensação com revestimento de trança de cobre estanhado de 5 m, a faixa de medição é de  $-270$  a  $1372^{\circ}\text{C}$ . Este termopar é instalado com adaptadores especiais de montagem na estrutura anilhada mostrado na Figura 10 tipo ajustável em aço com rosca longa e contra porca de fixação tipo fundo da caixa. A Figura 11 amostra os termopares utilizados.



Figura 11 Termopares.

O controle da temperatura no interior da caixa é feito por mais dois termopares ligados cada a um controlador de temperatura. O monitoramento da distribuição da temperatura no solo é feito pelos termopares conectados nos pontos 1, 2, 3 e 4, vistos na Figura 12. A Figura 13 mostra um desenho esquemático com a localização de cada termopar no interior da caixa térmica.



Figura 12 - Distribuição dos termopares na caixa térmica.

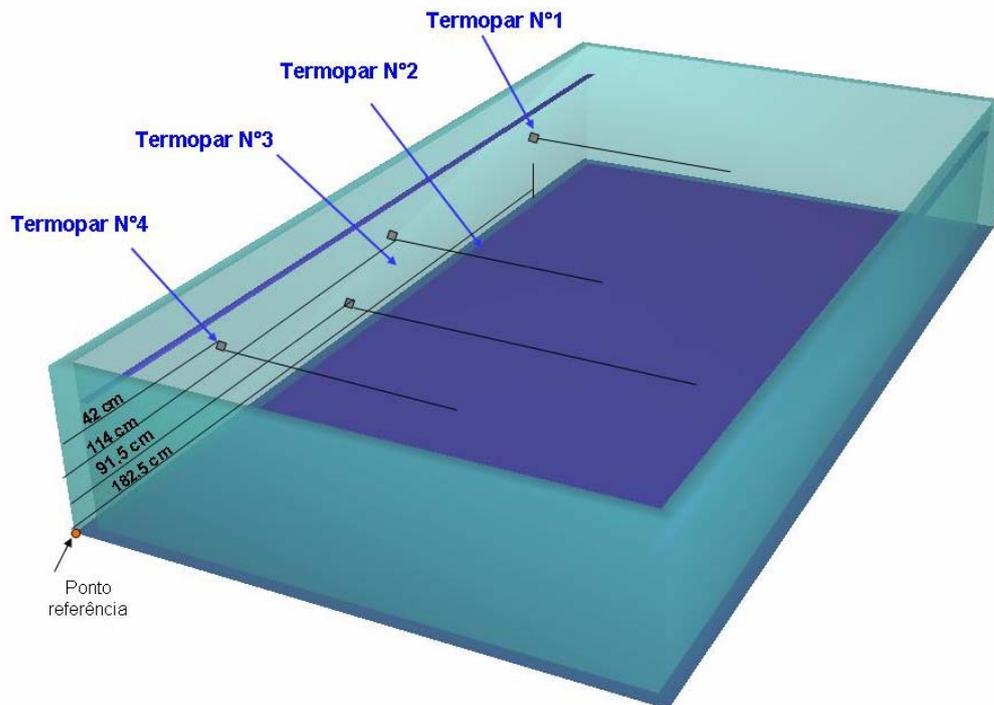


Figura 13 Localização dos termopares no interior da caixa térmica.

### 3.2.2. Isolante Térmico

O isolante térmico tem a função de minimizar ao máximo a dissipação de calor para o meio externo, conseqüentemente melhorando a eficiência do aquecimento e reduzindo consumo energético. O isolante térmico escolhido foi uma manta de fibra cerâmica, vista na Figura 14, com espessura de 50 mm, densidade de  $96 \text{ kg/m}^3$  e uma temperatura de serviço máxima de  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Uma das características das fibras cerâmicas que foi determinante para a sua escolha como isolante térmico, além das qualidades técnicas, foi o seu fácil manuseio para aplicações *ex situ*.



Figura 14 - Fibra cerâmica

As fibras cerâmicas são entrelaçadas por um processo de agulhamento para produzirem uma manta de alta resistência, sem a utilização de ligantes orgânicos (FiberFrax, 2003). Sua composição básica é de silicato de alumínio vítreo. A Tabela 4 apresenta as características das fibras cerâmicas.

Tabela 4 - Características da Fibra cerâmica (FiberFrax, 2003) .

<b>Especificações do produto</b>	
Odor, cor e textura.	Insípido, branco, material fibroso.
Fibra de silicato de alumínio vítreo	Fibra de silicato de alumínio vítreo
Ponto de ebulição	Não aplicável
Solubilidade em água	Não solúvel em água
Ponto de fusão	1760 °C
Massa específica	2,50 - 2,75
Fórmula molecular	$Al_2O_3SiO_3$

A Figura 15 apresenta as condutividades térmicas de algumas fibras cerâmicas disponíveis no mercado.

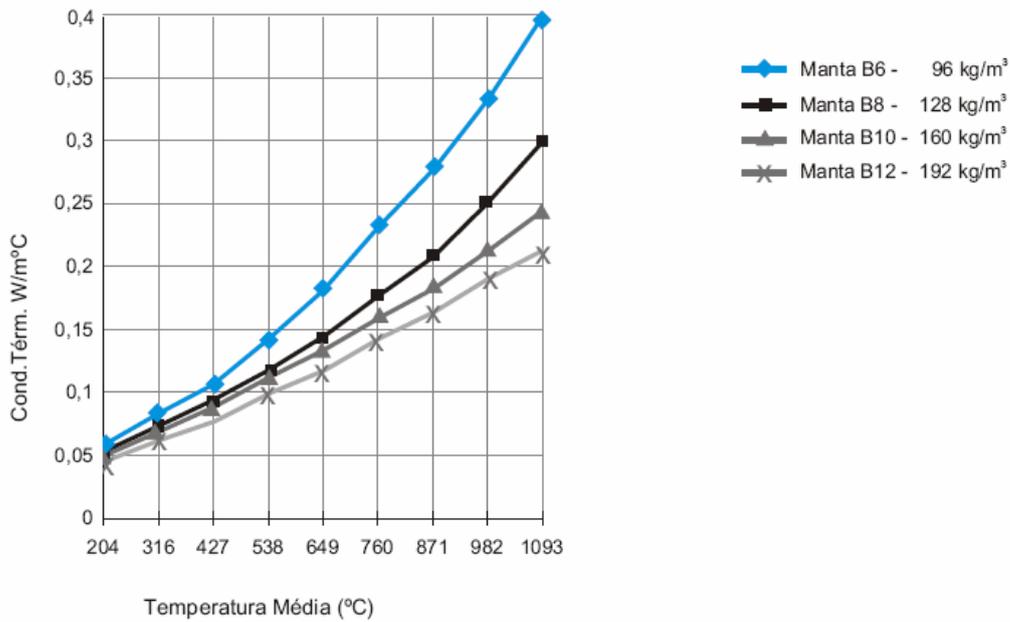


Figura 15 Condutividade térmica das mantas de fibra cerâmica (FiberFrax, 2003).

Para este sistema de dessorção térmica *ex situ*, foi utilizada a manta B6, que apesar de possuir uma maior condutividade térmica em altas temperaturas, possui valores semelhantes aos outros na faixa de temperatura necessária à remediação de materiais contaminados por hidrocarbonetos, conforme pode ser visto na Figura 15.

A fibra cerâmica foi cortada nas dimensões internas da tampa da caixa, 215,5 x 119,5 x 5 cm para depois ser colocada dentro dela como pode ser observado na Figura 16.



Figura 16 - Fibra cerâmica colocada dentro da tampa da Caixa térmica.

### 3.2.3. Controladores de Temperatura

Para o controle da temperatura dentro da caixa de dessorção térmica *ex situ* foram utilizados dois controladores de temperatura, um para cada resistência, como pode ser visto na Figura 17. Cada controlador é composto de três partes principais: o controlador de temperatura propriamente dito, um controlador de potência, que une o controlador de temperatura à caixa de dessorção térmica e uma chave tipo liga-desliga que aciona o funcionamento dos controladores bem como a passagem de corrente para a caixa de dessorção térmica.



Figura 17 Controladores de temperatura.

Os controladores de temperatura utilizados para a caixa térmica foram marca Incon, modelo CNT 110, vistos na Figura 18. Esses controladores foram escolhidos devido à possibilidade de automatizar a realização do ensaio, podendo-se programar a realização de todos os incrementos de temperatura que se deseja desenvolver ao longo de todo o ensaio. Este recurso, também chamado de rampas e patamares, permite a programação da aplicação das temperaturas, bem como os intervalos de tempo em que se deseja permanecer para cada temperatura durante todo o ensaio.

O controlador também permite a possibilidade de se fazer incrementos de temperatura de forma manual por um operador para intervalo de tempo determinado.

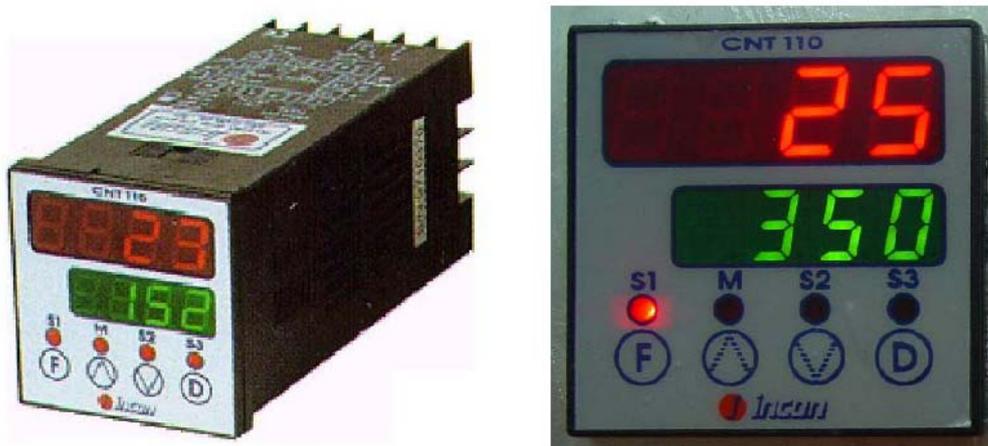


Figura 18 Controlador de temperatura - Incon CNT 110.

O visor vermelho da Figura 18, indica a temperatura real do processo e o verde a temperatura programada (set point). Pelo painel do controlador com auxílio das teclas e dos visores se faz toda a programação do controlador de temperatura. As especificações do controlador de temperatura são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Especificações técnicas do controlador de temperatura Incon CNT 110.

<b>Especificações do produto</b>	
Alimentação	85 a 264 V - 50 a 60 Hz
Consumo	4VA
Compatível para termopares	J, K, T, N, S, E, R, S e B
Precisão	J, K, T e N: 0,25% da faixa máxima de +/- 1°C.
	E, R, S e B: 0,25% da faixa máxima de +/- 3°C.
Resolução	0,1 °C
Dimensões	48x48x106 mm
Peso	150 g
Material	Termoplástico ABS preto

Os termopares utilizados nesses controladores de temperatura são o tipo K, modelo NiCr (níquel-cromo), sendo do tipo isolado, ou seja, o ponto onde se

mede a temperatura é apenas na extremidade da haste do termopar. O termopar tipo K funciona numa faixa de temperatura de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1250^{\circ}\text{C}$ , e tem uma haste de 600 mm com um cabo que liga a haste ao controlador com um comprimento de 7m.

Para um melhor desempenho e produtividade dos controladores de temperatura e, conseqüentemente, da caixa térmica, foi utilizado um controlador de potência especial, que substitui as chaves contactoras utilizadas normalmente em sistemas de controle de aquecimento. Foi usado um controlador de potência produzido pela Incon, série mini, bifásico de 32A, para uma tensão de 220V. A corrente de 32A foi escolhida para uma maior segurança, devido às resistências da caixa poderem ser alimentadas por uma corrente máxima de 20A. O controlador de potência também é comumente chamado de chave estática, devido a seu melhor desempenho em manter a temperatura na temperatura programada.

Na Figura 19 mostra-se o controlador de potência e destaca-se um *bargraph*, *leds* vermelhos indicados, que é um indicador com dez pontos em escala percentual que possibilita monitoração visual do nível de potência que está sendo entregue à carga, no caso o cobertor térmico. Os *leds* verdes vistos também na Figura 19 indicam que o controlador está ligado.

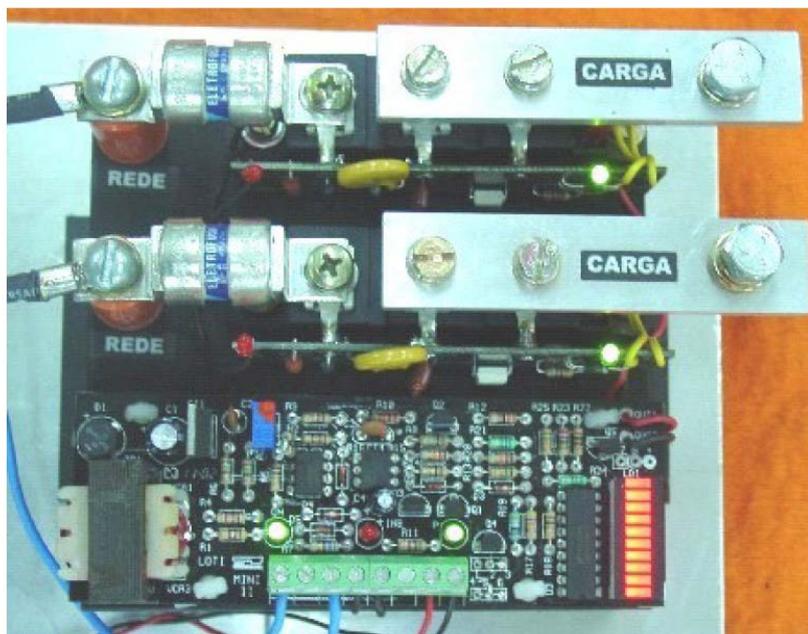


Figura 19 - Controlador de potência – Vista superior.



### 3.2.5. Sistema de Exaustão de Ar

Foi utilizado neste sistema um soprador de ar apresentado na Figura 21, constituído de mangueiras plásticas amadas e tubos de aço inoxidável. O ar gerado pelo soprador era conduzido para o interior da caixa térmica por intermédio de mangueiras plásticas amadas e tubos de aço inoxidável. 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 21 - Soprador de Ar.

### 3.2.6. Fonte de Alimentação Elétrica

No subsolo do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio foi realizada uma instalação elétrica própria para este equipamento de dessorção térmica *ex situ*, como é mostrado nas figuras seguintes. Esta instalação possui uma caixa de passe, apresentada na Figura 22, um medidor de consumo elétrico próprio, mostrado na Figura 23, a fim de se registrarem e contabilizarem os gastos energéticos do equipamento e um quadro de distribuição externo com disjuntores de 20A e 30A e corrente de 110V e 220V como se mostra na Figura 24.



Figura 22 - Caixa de passe.



Figura 23 - Medidor de consumo.



Figura 24 - Quadro de distribuição.

### 3.2.7. Guincho Hidráulico

O Guincho girafa hidráulico utilizado é da marca Worker. Este guincho hidráulico é utilizado para levantar a tampa da Caixa de dessorção térmica. A Figura 25 mostra o Guincho hidráulico, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações técnicas

Capacidade máxima	0,5 - 2 Ton
Altura máxima da carga	1,8 - 2,2 m



Figura 25 - Guincho Hidráulico.