

5

Novo protótipo de dessorção térmica *in situ*

5.1.

Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os primeiros ensaios realizados com o protótipo de dessorção térmica *in situ* (PDTIS). Foram realizados um total de 5 ensaios, utilizando britas contaminadas por óleo visando avaliar o desempenho do protótipo.

A Tabela 27 apresenta um quadro resumo dos ensaios realizados com o PDTIS, um ensaio “teste” com o oxidador térmico (OXT) e as análises realizadas para esses ensaios.

Tabela 27 – Resumo dos ensaios realizados e análises desenvolvidas para ensaios com o PDTIS.

Ensaio	Equipamento	Análises		
		1	2	3
1	PDTIS	X	X	
2	PDTIS	X	X	
3	PDTIS	X	X	X
4	OXT	X		
5	PDTIS	X	X	X

(1) Monitoramento da temperatura e consumo de energia;

(2) Determinação do teor de hidrocarbonetos de petróleo totais (TPH) por espectroscopia na região do infravermelho e

(3) Cromatografia gasosa para identificação dos compostos presentes nas emissões.

5.2.

Ensaio 01 - PDTIS

O primeiro ensaio utilizando o protótipo de dessorção térmica *in situ* foi realizado para remediação de britas contaminadas por óleo. Esse material contaminado é o mesmo que foi empregado na realização dos ensaios 01 e 02

do capítulo 04, realizados com o mini sistema de dessorção térmica desenvolvido por Portes (2002).

Para esse ensaio, conforme apresentado na Tabela 27, foi feito monitoramento de temperatura, verificação do consumo de energia e determinações analíticas do teor de hidrocarbonetos de petróleo totais.

5.2.1. Metodologia do ensaio

Na realização desse ensaio foi inicialmente colocado o material contaminado na calha de concreto, após a determinação de sua massa. A determinação da massa das britas contaminadas foi executada colocando-se o material em um balde de 8L e medida a massa do conjunto em uma balança da marca Brião, modelo B, com capacidade nominal de 300kg e uma resolução de 100g, vista na Figura 79. Ao todo foram utilizados 33,8kg de britas contaminadas.



Figura 79 – Ensaio 01 - PDTIS , pesagem das britas contaminadas

O material contaminado foi colocado diretamente dentro da calha em concreto e espalhado de forma que ficasse bem distribuído em toda a superfície da calha. A Figura 80 mostra o material já disposto na calha.



Figura 80 – Ensaio 01 - PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto.

As britas contaminadas dentro da calha ficaram em uma camada de aproximadamente 12 cm de altura, conforme pode ser visto na Figura 81.



Figura 81 - Ensaio 01 - PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto, vista lateral.

O cobertor térmico foi colocado dentro da calha, sobre o material contaminado, estando apoiado sobre 2 vergalhões de 8 mm, fixados transversalmente, a uma distância de 15 cm do fundo, como ilustra as Figuras 80 e 81. A Figura 82 mostra a forma em que o cobertor é disposto sobre os vergalhões na calha.



Figura 82 – Ensaio 01 - PDTIS , cobertor térmico apoiado sobre vergalhões dentro da calha em concreto.

Depois de colocado o cobertor térmico dentro da calha em concreto, foi então iniciado a colocação da fibra cerâmica sobre o cobertor térmico e sobre toda a área da calha em concreto. A fibra cerâmica foi colocada de forma que tivesse no mínimo duas camadas recobrindo toda a bancada de ensaio, como mostra a Figura 83.



Figura 83 – Ensaio 01 - PDTIS, colocação da fibra cerâmica.

Logo em seguida a colocação da fibra cerâmica, colocou-se a manta asfáltica, cobrindo toda a bancada de ensaio. A face da manta asfáltica revestida em alumínio ficou voltada para o exterior.

Para a melhor vedação da manta asfáltica junto a calha de concreto foram utilizadas cantoneiras em aço, vistas na Figura 84, nos cantos da calha em concreto que estavam em contato com a manta asfáltica. As cantoneiras foram afixadas por 4 cabos de aço com esticadores nas extremidades, conforme é visto na Figura 84. Essa forma de fixação da manta asfáltica com os cabos em aço e esticadores era extremamente trabalhosa e pouco operacional.

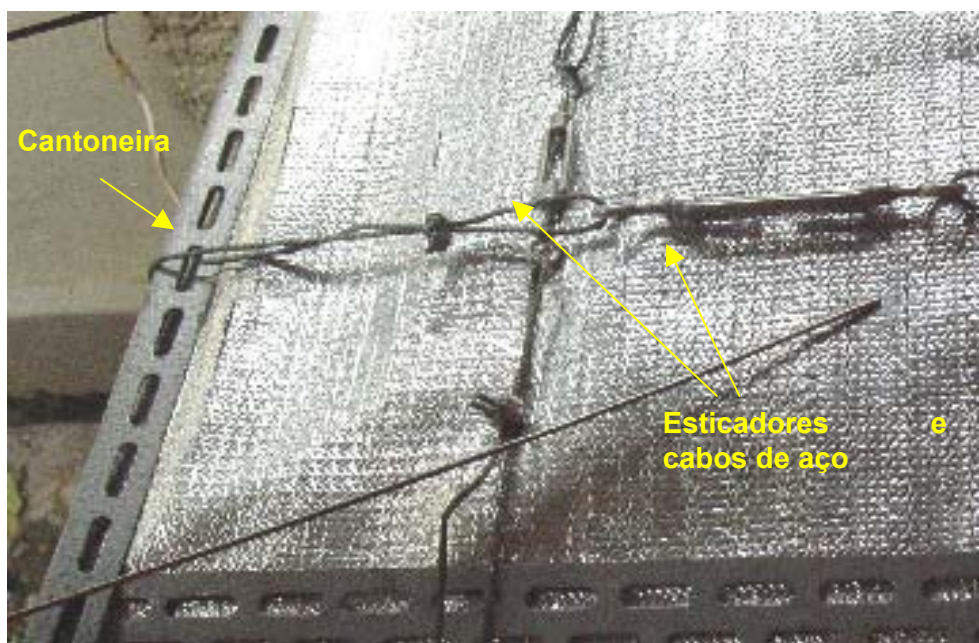


Figura 84 – Ensaio 01 - PDTIS, detalhe de cantoneiras e cabos de aço para fixação da manta asfáltica

Na realização desse ensaio foi usado um controlador de temperatura de marca Coel, modelo HW-1440, do mini cobertor térmico citado no item 4.2.2.

Foram feitos 5 furos distribuídos lateralmente à calha em concreto para colocação dos termopares. Durante o ensaio os furos que não estavam sendo ocupados com termopares eram fechados com massa de calafetar.

Os pontos de monitoramento de temperatura estão apresentados nas Figuras 85 e 86, e estavam distribuídos da seguinte forma:

- O termopar do controlador de temperatura foi instalado na lateral esquerda da bancada, próximo a saída da alimentação do cobertor térmico. O local mais indicado para esse termopar seria no centro do

cobertor térmico, porém isto não foi possível de ser realizado devido a limitação do tamanho da haste e do cabo do termopar;

- Termopar 0 estava colocado no centro da calha em concreto entre a brita contaminada e o cobertor térmico, no furo central feito na calha em concreto;
- Termopar 1 foi colocado entre a fibra cerâmica e o cobertor térmico, internamente a bancada de ensaio;
- Termopar 2 foi instalado entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica; internamente a bancada de ensaio;
- Termopar 3 estava em contato com a superfície externa da manta asfáltica;
- Termopar 4 estava localizado na parte externa verticalmente a 20cm de distância da manta asfáltica.

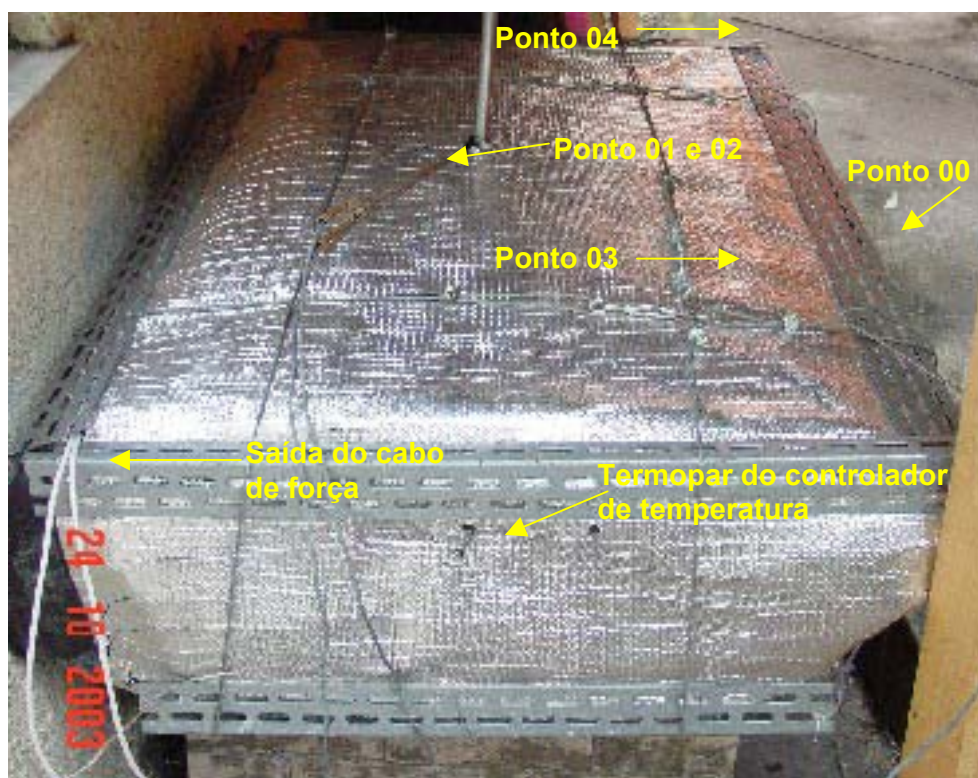


Figura 85 – Ensaio 01 - PDTIS , termopares

Foi afixado no tubo de saída de gases, o filtro de carvão ativado, através de abraçadeiras, como demonstra a Figura 86.

A Figura 86 apresenta uma vista lateral de toda a bancada de ensaio montada.

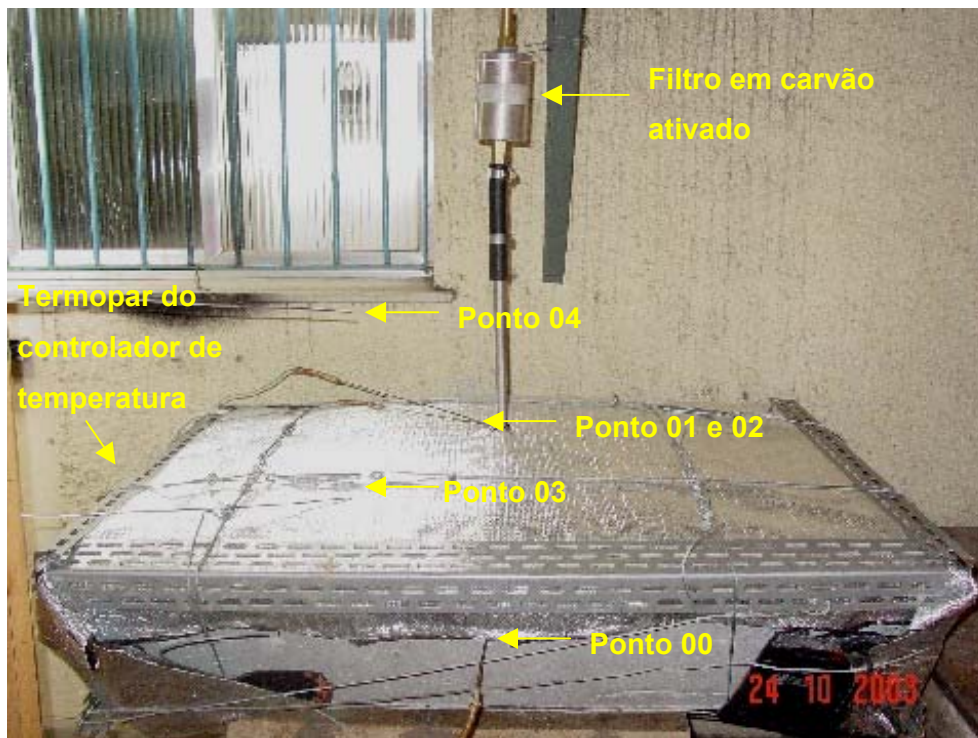


Figura 86 – Ensaio 01 - PDTIS, bancada de ensaio montada.

Diariamente fazia-se a medição da temperatura ambiente com o termômetro digital, marca Minipa, modelo MT-511, com resolução de 0,1°C. A verificação do consumo de energia era feita através de um medidor de marca ABB, modelo 2002. Fazia-se a medida do consumo para cada estágio de temperatura.

5.2.2. Monitoramento da temperatura e do consumo de energia

Esse ensaio foi iniciado com uma temperatura de 50°C e feito incrementos de temperatura de 50°C a cada 24 horas. Os dados eram coletados do *data logger* a cada 48 horas e transferidos para um computador PC.

A Tabela 28 apresenta as temperaturas, máximas e mínimas, registradas para todos os estágios de temperatura ao longo do experimento. Nesta Tabela também é apresentado a temperatura ambiente medida e o consumo de energia para cada estágio de temperatura aplicada.

Na Figura 87, está plotado o gráfico que demonstra a variação de temperatura nos pontos de monitoramento para todos os estágios do ensaio. Este gráfico foi feito unindo-se todos os dados coletados em cada estágio.

Tabela 28 - Ensaio 01 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia

Estágio (°C)	50		100		150		200		250		300 (1º)		300 (2º)		350		400	
Temperatura	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Ponto 00 (°C)	63,1	37,9	122	61,2	184	145,9	245,4	184,2	301,4	239,4	324,6	295	314,4	309,5	364,1	312,2	417,8	370,6
Ponto 01 (°C)	66,5	21,5	109,2	56,4	142,4	99,9	176	135,6	201,3	162,3	213,8	197,9	262,1	260,4	301,6	261,6	337,8	299,5
Ponto 02 (°C)	24,9	22,3	25,3	23,4	26,8	24,7	26,8	25,8	29,4	25,8	28,7	23,5	25,2	22	23,2	21,6	24,9	21,4
Ponto 03 (°C)	25,6	20,9	33,7	25,5	41,5	33,4	49,1	39,8	49,4	42,2	49,1	37,4	52,9	43,1	51,5	42,5	58,2	46,9
Ponto 04 (°C)	23	20	27,2	20,7	31,10	22,4	33,4	23,8	30,40	24	30,1	23,9	33,4	23,7	20,1	19,4	26,2	18
Ambiente (°C)	21		26,5		31,4		29,5°C		28		27,4		27,4		19,9		19,9 e 22,3	
Consumo de energia (kW.h)	3		11		15		22		25		35		35		52		128 p/ 48 horas	

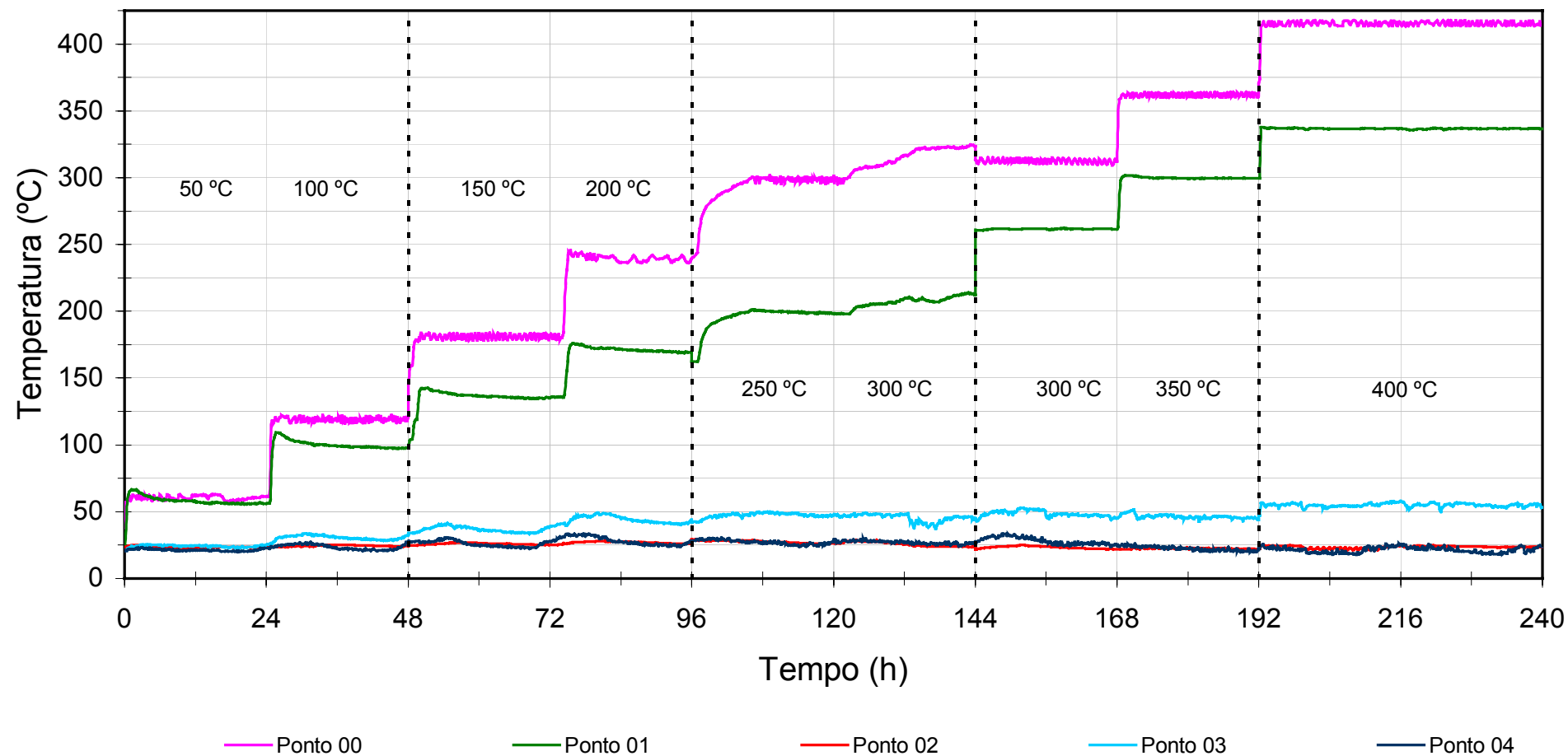


Figura 87 - Ensaio 01 - PDTIS, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento

Observa-se na Tabela 28, que as máximas temperaturas registradas no ponto 0, estão sempre acima da temperatura programada pelo controlador. Pode-se também comprovar no gráfico apresentado na Figura 87, que no ponto 0, localizado dentro da banca de ensaio sobre as britas contaminadas, manteve a temperatura acima da temperatura programada.

Para este ensaio se verifica que o isolamento térmico com a fibra cerâmica funciona a contento. Foi verificado que o ponto 0, sobre o material contaminado, atingiu uma temperatura máxima de 417,8°C, enquanto que, sobre a fibra cerâmica foi medida uma temperatura máxima de apenas 24,9°C, conforme pode ser visto na Tabela 28.

Observando a Figura 87, constata-se que o ponto 2, localizado entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica, e o ponto 4, situado a uma distância de 20cm da superfície externa da manta asfáltica, apresentam um comportamento bem semelhante durante todo o desenvolver do ensaio. As temperaturas verificadas neste ponto de monitoramento oscilam em torno da temperatura ambiente. É razoável afirmar que esses pontos provavelmente não sofrem influência do aquecimento provocado pelo cobertor térmico.

O ponto 1, situado entre o cobertor térmico e a fibra cerâmica, tem comportamento semelhante ao ponto 0. Entretanto, apresentando temperaturas menores que o ponto 0, conforme pode se verificar na Figura 87.

O ponto 3, em contato com a superfície externa da manta asfáltica, apresenta temperaturas superiores às observadas nos pontos 4 e 2, conforme visto na Figura 87. Uma possível explicação para este fato, é que a superfície em alumínio da manta asfáltica, sofre aquecimento provocado pela irradiação solar, apresentando temperaturas superiores à temperatura ambiente. O controle da temperatura externa da manta asfáltica é de fundamental importância visto o problema citado no item 4.4.

Durante a aplicação da temperatura de 300°C, foi observado no visor do controlador de temperatura, que o cobertor térmico não atingia os 300°C programados, então através de um alicate amperímetro digital, marca Minipa, modelo ET 3200A, foi verificado a corrente do cobertor térmico. Naquele instante foi medida uma corrente de 9A, bem abaixo do que deveria encontrar-se. Isto levou a suspeitar que uma das resistências do cobertor térmico poderia ter se danificado. O ensaio foi então interrompido, aguardado o resfriamento do cobertor térmico e então desmontado para verificar-se o problema. Logo no início do desmonte da bancada de ensaio, verificou-se que um dos cabos de

alimentação do cobertor térmico tinha se desconectado. Este fato é evidenciado na Figura 88.

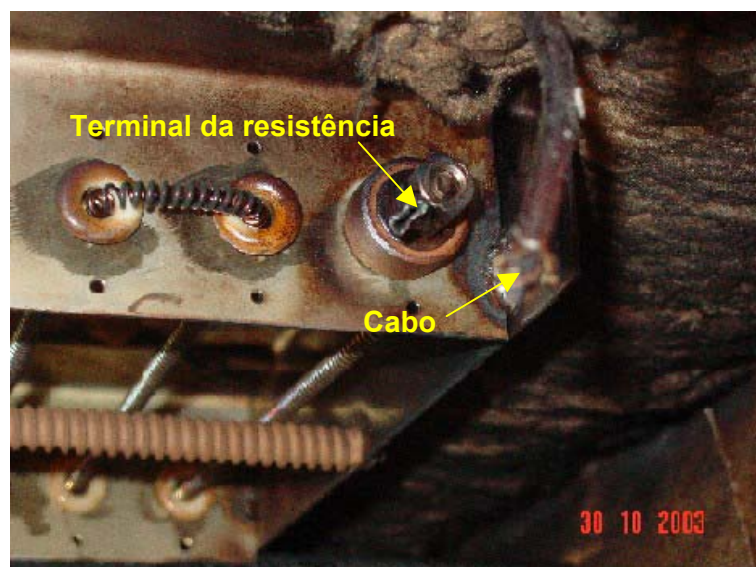


Figura 88 – Ensaio 01 - PDTIS, cabo desconectado do cobertor térmico

Entretanto, observa-se na Figura 87, que durante a temperatura de 300°C, o ponto 0 apresenta temperatura superior a 300°C. Isto ocorreu devido ao termopar do ponto 0 estar no centro da bancada de ensaio, recebendo ainda influência do aquecimento da outra resistência que permaneceu ligada.

Foi observado, quando desmontado o ensaio, que o óleo sobre as britas estava endurecido, conforme atestada a Figura 89, sem apresentar a viscosidade característica de um óleo. Era possível tocar nas britas sem que ficasse óleo impregnado nas mãos.



Figura 89 – Ensaio 01 - PDTIS, óleo endurecido sobre as britas

Depois de conectado o cabo foi então dada seqüência ao ensaio, reiniciando-o com a temperatura de 300°C.

Durante a realização do ensaio não se observou vazamento de emissões gasosas produzidas no processo. Este fato demonstrou que a forma de vedação das emissões gasosas, com a manta asfáltica fixada com cabos de aço e cantoneiras, estava funcionando adequadamente.

A máxima temperatura verificada na manta asfáltica foi de 58,2°C, sendo que o ponto de amolecimento dessa manta está entre 95°C e 110°C e seu ponto de fulgor é de 250°C (vide item 3.2.4). Isto atesta a eficiência da fibra cerâmica.

A fibra cerâmica, durante o desmonte da bancada de ensaio estava muito úmida e grudada à manta asfáltica dificultando a desmontagem. Isto fazia com que a fibra cerâmica rompesse em algumas partes, devido a dificuldade de separá-la da manta asfáltica.

Foi medido um consumo total de 326kW.h. Subtraindo-se desse valor o consumo de 35kW.h para a temperatura de 300°C, onde houve a desconexão do cabo do cobertor térmico, teríamos um consumo de 291kW.h efetivo para realização desse ensaio. Como base no valor cobrado pela Light de R\$ 0,29235 por kW.h, para classe não residencial, no mês de março de 2004, chega-se a um gasto de R\$ 85,07 na realização deste ensaio.

A Figura 90 apresenta o material ao término do ensaio.



Figura 90 - Ensaio 01 - PDTIS, fim do ensaio.

Depois de desmontada toda a bancada de ensaio verificou-se que as britas apresentavam um aspecto de um material carbonizado, por sua coloração escura, conforme pode ser visto na Figura 90. Não se verificou a presença de nenhum resíduo de óleo.

O processo que aconteceu nesta brita foi o coqueamento, a formação do coque de petróleo. O coque é um produto sólido, negro e brilhante obtido por coqueamento dos resíduos pesados essencialmente constituídos por carbono (90 a 95%). E este material queima sem deixar cinzas. Houve uma oxidação incompleta devido à ausência de fluxo de ar no interior da bancada de ensaio. É possível ainda encontrar hidrocarbonetos nesse material, visto ter ocorrido uma oxidação incompleta. É provável que tenha ocorrido uma reação química de pirólise, o craqueamento térmico leva ao consumo dos hidrocarbonetos na ausência de oxigênio, provocando a formação de coque. Isso pode ter ocorrido devido à vedação da bancada de ensaio ter impedido o escape dos voláteis produzidos como também a entrada de ar.

A formação desse coque mostrou também que o filtro de carvão ativado não permite a passagem das emissões gasosas produzidas, sem que seja forçado um fluxo através de um sistema de bombeamento.

As britas foram retiradas da calha em concreto e a sua massa determinada. Foi verificado um aumento de 6,40kg, aumentando em 18,90% da sua massa inicial de 33,80kg. Após o ensaio a massa resultante foi de 40,20kg. Provavelmente a oxidação incompleta e a formação de coque, transformando parte da fase líquida do óleo para a fase sólida, fez aumentar a massa desse material. Não foi possível fazer um balanço de massa devido a incerteza da quantidade de óleo no início do ensaio. O material produzido pela oxidação incompleta, o coque aderido à brita, foi coletado para análise química.

A calha em concreto resistiu muito bem aos 10 dias de aquecimento. Não foi observado o aparecimento de fissuras na estrutura.

5.2.3.

TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais

As análises de hidrocarbonetos de petróleo totais (TPH) foram feitas na brita e no resíduo restantes ao término do ensaio, sendo usado a mesma curva de calibração do ensaio 02 do capítulo 4.

A brita foi macerada juntamente com o material que ficou impregnado a ela depois do processo de aquecimento.

A Figura 91 apresenta o macerado da brita impregnada com coque.

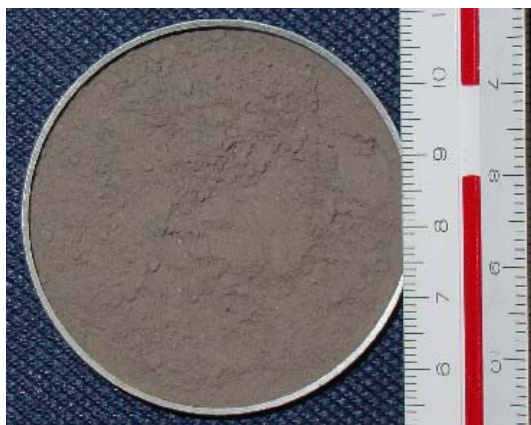


Figura 91 – Ensaio 01 - PDTIS, brita macerada impregnada com coque após o aquecimento.

Para a brita macerada foi encontrado um valor de TPH igual a 379mg/L. A massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução é obtida da seguinte forma:

$$\begin{array}{rcl} 379\text{mg} & - & 1 \text{ L} \\ X \text{ mg} & - & 25\text{mL} (25 \times 10^{-3}\text{L}) \text{ (avolumado)} \end{array} \quad (18)$$

$$X = 9,475\text{mg} \text{ (massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução)}$$

A amostra do macerado da brita a qual foi extraída para análise pesava 2,5017g.

O teor de TPH em ppm é obtido da seguinte forma:

$$TPH = \frac{9,475\text{mg}}{2,5017 \times 10^{-3} \text{kg(solo)}} = 3787,42\text{mg} / \text{kg} = 3787,42 \text{ ppm} \quad (19)$$

$$TPH = 3787,42 \text{ ppm}$$

Esse valor de TPH encontrado para a brita após o processo de dessorção térmica encontra-se abaixo do valor da lista holandesa (CETESB, 2001).

Para o material impregnado na brita, visto na Figura 92, foi também realizado a determinação analítica de TPH.

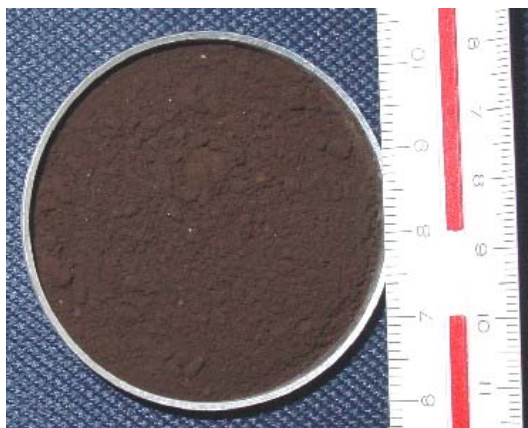


Figura 92 – Ensaio 01 - PDTIS, coque impregnado as britas após o aquecimento.

Houve problemas para realização da análise de TPH neste material. Não se conseguia fazer a filtragem pelo algodão e o sulfato de sódio da solução preparada com o coque. Uma alternativa para este problema foi reduzir a massa de coque que estava sendo diluído. Feitos vários testes reduzindo a quantidade de coque chegou-se a um valor de 0,1859g. Passando de 2,5g utilizados nas demais análises de TPH para apenas 0,1859g.

O valor de TPH para essa amostra foi de 831 mg/L, esse valor extrapola o trecho linear da curva de calibração apresentada no item 4.4.5. Devido a isso foi então feito uma diluição na solução dessa amostra para induzir os valores para o trecho linear da curva de calibração.

O procedimento para induzir o valor ao trecho linear da curva de calibração é o seguinte:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (20)$$

onde, C_1 é a concentração de 831mg/L encontrada, V_1 o volume da solução procurado, C_2 a concentração que se pretendia atingir, dentro do trecho linear da curva de calibração, sendo adotado de 300mg/L e V_2 o volume adotado, aqui usado de 25mL.

$$831 \times V_1 = 300 \times 25 \quad (21)$$

Logo, $V_1 = 9,025 \approx 9,00\text{mL}$, então foi colhidos 9 mL da solução cujo valor de TPH era igual a 831mg/L e avolumado até 25mL com tetracloroetileno.

Encontrando o fator de diluição (Fd) tem-se:

$$Fd = \frac{V_2}{V_1} = \frac{25}{9} = 2,77 \quad (22)$$

Fazendo a leitura da nova solução no TOG/TPH Analyzer Infracal, determinamos um valor de TPH igual a 270mg/L, o qual se encontra dentro do trecho linear.

Multiplicado-se esse valor de TPH 270 mg/L pelo fator de diluição determina-se o valor de TPH para o resíduo sobre a brita.

$$TPH = 270 \times Fd = 270 \times 2,77 = 747,90 \text{ mg / L} \quad (23)$$

$$TPH = 747,90 \text{ mg / L}$$

$$\begin{array}{rcl} 747,9 \text{ mg} & - & 1 \text{ L} \\ X \text{ mg} & - & 25 \text{ mL } (25 \times 10^{-3} \text{ L}) \text{ (avolumado)} \end{array} \quad (24)$$

X = 18,6975mg (massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução)

A amostra do macerado do coque a qual foi extraída para análise pesava 0,1859g.

Dividindo-se X pelo peso da amostra de solo temos o TPH em ppm.

$$TPH = \frac{18,6975 \text{ mg}}{0,1859 \times 10^{-3} \text{ kg(solo)}} = 100578,26 \text{ mg / kg} = 100578,26 \text{ ppm} \quad (8)$$

$$TPH = 100578 \text{ ppm} \quad (25)$$

Esse valor encontrado é muito superior ao valor de intervenção do recomendado pela lista holandesa de 5000ppm (CETESB, 2001). A oxidação incompleta dos hidrocarbonetos pode ser a justificativa desse alto índice de hidrocarbonetos de petróleo totais.

5.3.

Ensaio 02 - PDTIS

O ensaio 02 - PDTIS, o segundo ensaio utilizando o novo protótipo de dessorção térmica *in situ*, seguiu o mesmo padrão de execução do ensaio 01 – PDTIS. Para este ensaio foi reduzida a quantidade de material contaminado a ser tratado. Deixou-se também o tubo de saída dos voláteis livre, sem conectar a câmara em carvão ativado, permitindo a saída dos voláteis produzidos direto para a atmosfera.

Para este ensaio foi feito monitoramento de temperatura, verificação do consumo de energia e análises de hidrocarbonetos de petróleo totais.

5.3.1.

Metodologia do ensaio

Utilizou-se uma massa total de 24kg de britas contaminadas. O material contaminado foi colocado diretamente na calha em concreto, conforme mostra a Figura 93.



Figura 93 – Ensaio 02 - PDTIS, britas contaminadas dentro da calha em concreto.

Logo em seguida as britas contaminadas serem colocadas dentro da calha em concreto foi montada a bancada de ensaio, adotando o mesmo procedimento do ensaio 01 - PDTIS.

Reutilizou-se neste ensaio a fibra cerâmica e a manta asfáltica do ensaio 01 – PDTIS. A reutilização destes materiais tinha o objetivo de avaliar a sua vida útil.

Os pontos de monitoramento de temperatura deste ensaio, conforme vistos na Figura 94, estavam distribuídos da seguinte forma:

- O termopar do controlador de temperatura, controlador Coel-HW-1440, foi instalado próximo à saída da alimentação do cobertor térmico, na lateral esquerda. No mesmo local que estava instalado na realização do ensaio 01 - PDTIS;
- Termopar 0 estava colocado no centro da calha em concreto entre a brita contaminada e o cobertor térmico, no furo central feito na calha em concreto;
- Termopar 1 foi colocado entre a fibra cerâmica e o cobertor térmico, internamente a bancada de ensaio;
- Termopar 2 foi instalado entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica; , internamente a bancada de ensaio;
- Termopar 3 estava em contato com a superfície externa da manta asfáltica;
- Termopar 4 estava localizado na parte externa, verticalmente, a uma distância de 20cm de distância da manta asfáltica.

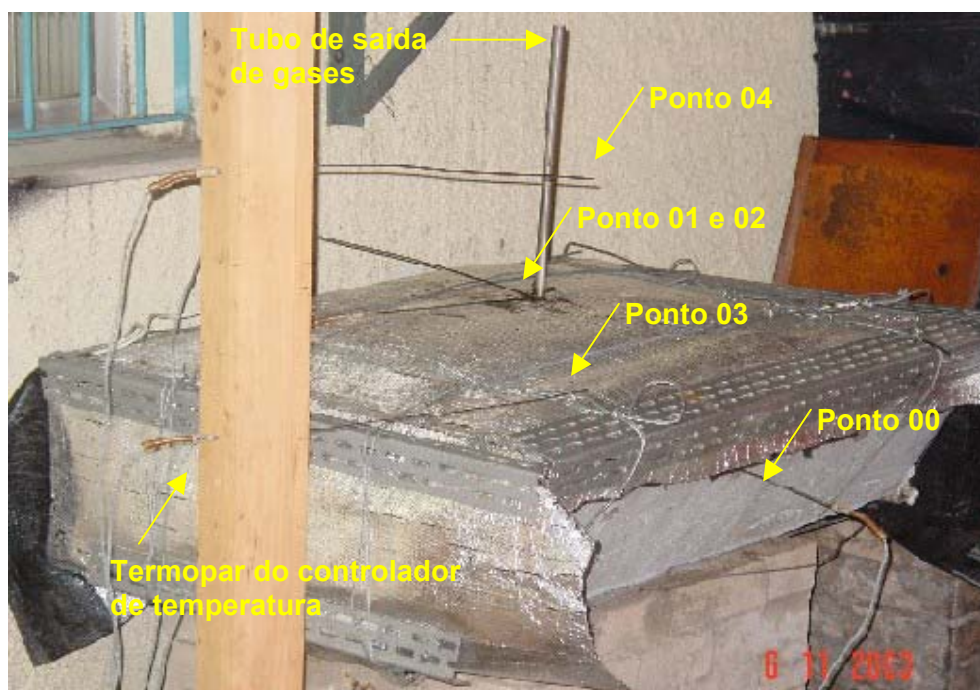


Figura 94 – Ensaio 02 - PDTIS, termopares.

Diariamente fazia-se a medição da temperatura ambiente com o termômetro digital e verificava-se o consumo de energia.

5.3.2.

Monitoramento da temperatura e do consumo de energia

Este ensaio foi iniciado com uma temperatura de 50°C, por um período de 24 horas. Em seguida foram acrescentados mais 50°C, atingindo-se a temperatura de 100°C, que permaneceu por 48 horas. A partir do estágio com 100°C, a cada 24 horas acrescia-se mais 50°C, até atingir a temperatura de 400°C.

A Tabela 29 apresenta as temperaturas, máximas e mínimas, registradas para todos os estágios de temperatura ao longo de todo ensaio. Nesta tabela também é apresentado a temperatura ambiente medida e o consumo de energia para cada estágio de temperatura aplicada.

A Figura 95, apresenta graficamente a variação de temperatura nos pontos de monitoramento, para todos os estágios do ensaio.

O gráfico visto na Figura 95, foi montado com os dados coletados no *data logger*. Os dados do *data logger* para este ensaio foram coletados em três etapas. Primeiramente coletaram-se os dados para 50°C e 100°C, depois os dos estágios que vão de 150°C a 350°C e por último os dados para o estágio com 400°C. Todos esses dados foram unidos em uma só planilha para a confecção do gráfico da Figura 95.

Tabela 29 - Ensaio 02 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia.

Estágio (°C)	50		100		150		200		250		300		350		400	
Temperatura	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Ponto 00 (°C)	54,9	25,9	102,5	53,8	152,9	97,9	202	151,6	250,6	198,6	299,8	246,8	350,9	295,4	400	395,7
Ponto 01 (°C)	58,2	23,4	100,3	53,1	132,4	91,7	162,4	125,3	192,4	157,5	222,9	188,1	252,3	219,9	285,7	279,8
Ponto 02 (°C)	34,1	31,1	43,1	31,1	47,2	21,5	61	22,6	70,9	58,6	78,7	68,5	83,5	71,3	98,8	78,2
Ponto 03 (°C)	31,8	21,4	37,8	28,8	43,2	38,8	53,4	40,3	62,4	48,4	61,8	46,6	64,9	56,1	76,2	60
Ponto 04 (°C)	28	20,7	28,8	20,7	28,7	22,4	34,2	21,7	35,1	26,9	30,5	20,7	28	20	33,7	27
Ambiente (°C)	25		25,5		27,3		35,5		36,7		31		27,6		30,2	
Consumo de energia (kW.h)	4		15 p/ 48 horas		13		20		28		32		40		70	

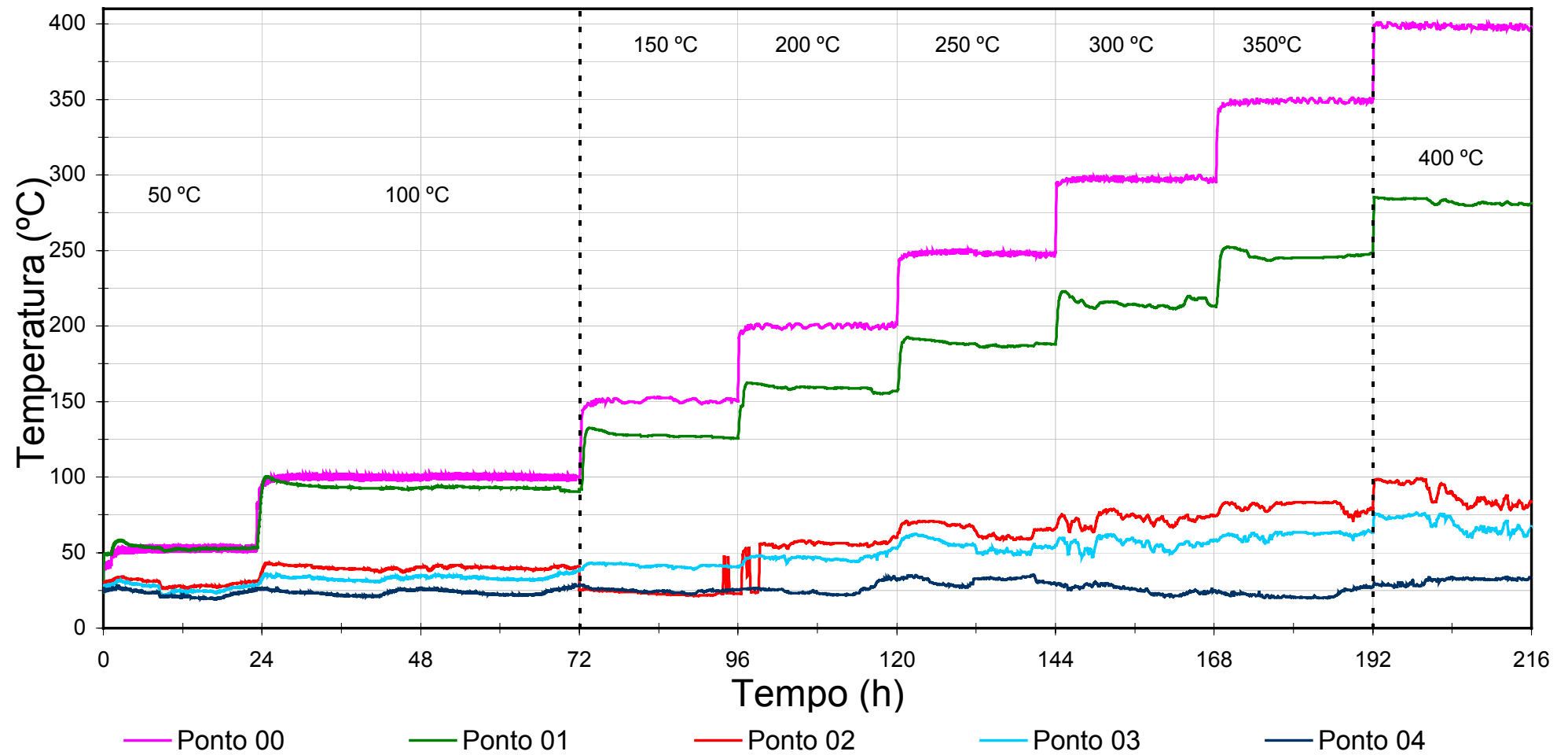


Figura 95 - Ensaio 02 - PDTIS, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.

A Tabela 29 mostra que as temperaturas máximas atingidas no ponto 0, localizado sobre as britas, no interior da bancada de ensaio, atingem patamares em torno das temperaturas programadas. Da mesma forma é possível observar na Figura 95, para o ponto 0, em todos os estágios, que as temperaturas se apresentam em torno da temperatura programada. Diferentemente do ensaio 01 – PDTIS, que apresentou temperaturas bem superiores às programadas para cada estágio.

As menores temperaturas registradas para o ponto 0, também foram registradas para o ponto 1, que de acordo com o gráfico da Figura 95, acompanha o padrão descrito pelo ponto 0.

De acordo com a Figura 95, observa-se que o ponto 2, localizado entre a manta asfáltica e a fibra cerâmica, e o ponto 3, em contato com a superfície externa da manta asfáltica, apresentam temperaturas mais elevadas do que as verificadas no ensaio 01 – PDTIS.

O fato de atingir temperaturas menores no ponto 0 e maiores no ponto 2 e 3, evidencia que a fibra cerâmica perdeu um pouco de sua capacidade de isolamento térmico. Isto favorece uma maior dissipação do calor interno da bancada de ensaio.

De acordo com a Tabela 29, foi atingida uma temperatura máxima de 98,8°C entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica. Mesmo estando esta temperatura dentro da faixa amolecimento da manta asfáltica, 95°C a 110°C, não foram observadas sérias avarias a manta asfáltica, sendo possível reutilizá-la. A temperatura de 98,8°C, registrada sob a manta, está distante ainda do seu ponto de fulgor que é 250°C.

O ponto de monitoramento 4, a uma distância de 20 cm da manta asfáltica, apresentou temperaturas em torno da temperatura ambiente, conforme pode ser verificado na Tabela 29.

Durante a aplicação da temperatura de 100°C foi observado o início da saída de muitos voláteis pelo tubo de escape de gases do cobertor térmico. As emissões aumentaram quando foram aplicadas as temperaturas de 150°C e 200°C. Só foi observado o desprendimento dessas emissões apenas pelo tubo de saída de gases, não sendo verificado vazamento de gases pelas laterais entre a calha e a manta asfáltica. Quando já aplicado a temperatura de 350°C já não se percebia a emissão de gases de dentro da bancada de ensaio.

Durante o desmonte da bancada de ensaio foi novamente observado que a fibra cerâmica estava grudada à manta asfáltica dificultando a separação

dessas. Nesse ensaio constatou-se que a fibra cerâmica não estava úmida como observado no desmonte do ensaio 01 – PDTIS.

A Figura 96 apresenta o material dentro da calha depois de desmontada a bancada de ensaio.



Figura 96 – Ensaio 02 - PDTIS, britas após o processo de dessorção térmica.

O material contaminado, depois de encerrado o ensaio, não apresentava mais presença de óleo, conforme pode ser visto na Figura 96. O material apresentou o mesmo aspecto encontrado para o ensaio 01 e 02 realizado com o mini sistema de dessorção térmica, vistos no capítulo 4.

Esse material foi retirado de dentro da calha em concreto e devidamente pesado, sendo observado uma redução de 23,33% da massa inicial do material contaminado, passando de uma massa de 24kg de britas contaminadas para 18,4kg de material tratado.

A Figura 97 apresenta em detalhe uma brita antes e após o processo de dessorção térmica. A Figura 97 a apresenta a brita ainda contaminada, enquanto que a Figura 97 b mostra a mesma brita após o processo de dessorção térmica. Observe na Figura 97 b o material fino que fica sobre a brita após a descontaminação. A Figura 97 c apresenta a brita após a retirada de tal resíduo com auxílio de um pincel.

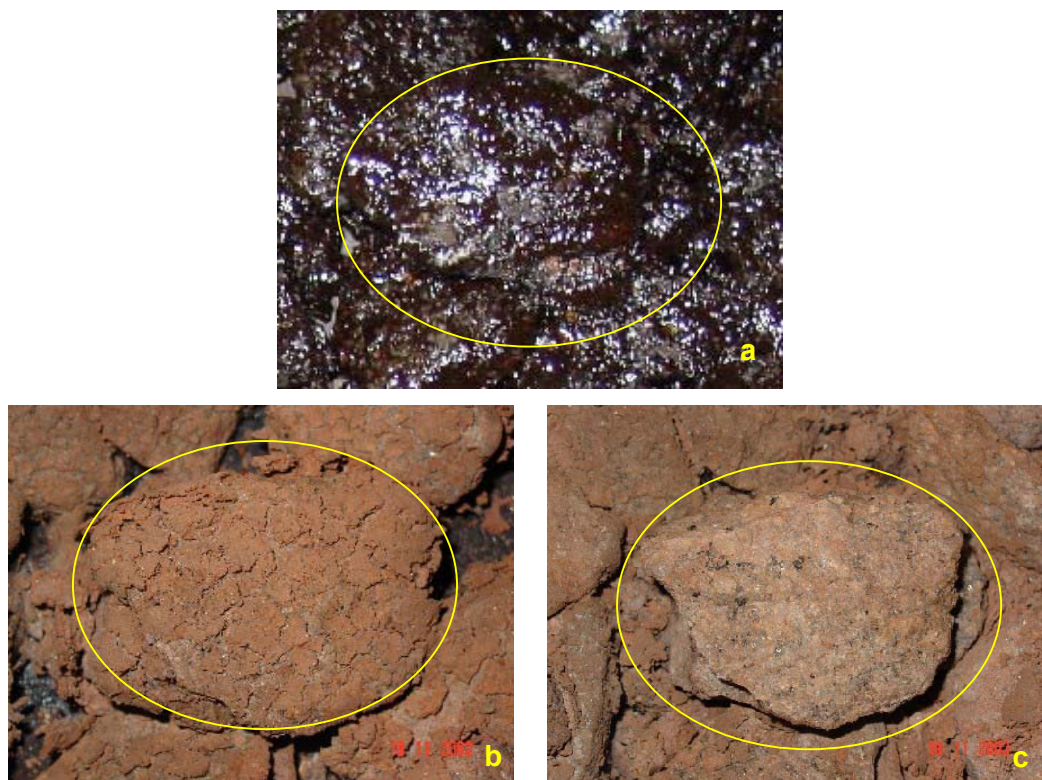


Figura 97 – Ensaio 02 - PDTIS, detalhe de britas contaminadas e após descontaminação.

O consumo total de energia na realização desse ensaio foi de 222kW.h. Como base no valor cobrado pela Light, empresa fornecedora de energia do Rio de Janeiro, de R\$ 0,29235 por kW.h, para classe não residencial, no mês de março de 2004, foram gastos R\$ 64,90 para realização desse ensaio. Para um exemplo meramente ilustrativo, a limpeza de 1 ton desse material, considerando as mesmas condições deste protótipo, teria um gasto de R\$ 2704,16.

5.3.3. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais

As análises de TPH para esse ensaio foram realizadas na brita limpa macerada e no resíduo restante sobre ela depois de sofrer o tratamento.

Para a brita macerada, vista na Figura 98, foi determinado um valor de TPH igual a 4mg/L. Esse valor se encontra abaixo do limite de detecção do aparelho.



Figura 98 – Ensaio 02 - PDTIS, brita macerada depois tratamento.

Para o resíduo sobre a brita após o aquecimento, visto na Figura 99, foi determinado um valor de TPH de 175mg/L.

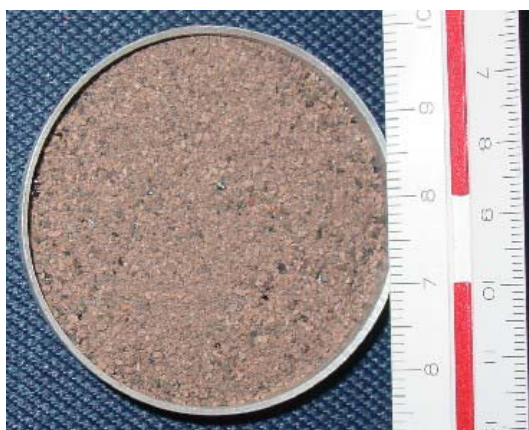


Figura 99 – Ensaio 02 - PDTIS – resíduo sobre a brita após a descontaminação.

A massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução é obtida da seguinte forma:

$$\begin{array}{rcl} 175\text{mg} & - & 1 \text{ L} \\ X \text{ mg} & - & 25 \text{ mL } (25 \times 10^{-3}\text{L}) \text{ (avolumado)} \end{array} \quad (26)$$

$$X = 4,375\text{mg} \text{ (massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução)}$$

A amostra do macerado da brita a qual foi extraída para análise tinha uma massa de 2,5058g.

O teor de TPH em ppm é obtido da seguinte forma:

$$TPH = \frac{4,375mg}{2,5058 \times 10^{-3} kg(solo)} = 1745,94mg / kg = 1745,94 ppm \quad (27)$$

$$TPH = 1745,94 ppm$$

Esse valor de TPH encontrado para a brita após o processo de dessorção térmica encontra-se abaixo do valor da lista holandesa, que indica um valor limite de intervenção de 5000ppm (CETESB, 2001).

5.4.

Ensaio 03 - PDTIS

Para realização do ensaio 03 - PDTIS, repetiu-se os mesmo passos dos primeiros ensaios deste capítulo. Para um melhor conhecimento da distribuição da temperatura, no interior da bancada de ensaio, foram feitas alterações nas posições dos termopares. Foi substituído o termopar do controlador de temperatura por um com haste e cabo maiores, que permitia instalá-lo no centro da calha em concreto. Foram colocados dois termopares entre as britas contaminadas e o cobertor térmico. Com mais termopares dentro da bancada de ensaio, teve-se uma melhor noção da distribuição da temperatura interna no processo, verificando se as temperaturas programadas no controlador de temperatura estão sendo atingidas em diversos pontos no interior da bancada de ensaio.

Para esse ensaio foi feito monitoramento de temperatura, verificação do consumo de energia, determinações analíticas de hidrocarbonetos de petróleo totais e cromatografia gasosa para análises das emissões gasosas geradas no processo.

5.4.1.

Metodologia do ensaio

Foi usado na execução deste ensaio um total de 24kg de britas contaminadas, os quais foram colocadas diretamente dentro da calha em concreto. O material ensaiado pode ser visto na Figura 100.



Figura 100 – Ensaio 03 – PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto.

Foi montada toda a bancada de ensaio a semelhança dos ensaios 01 e 02. Utilizou-se a mesma manta asfáltica e a mesma fibra cerâmica dos ensaios anteriores.

A fixação da manta asfáltica foi modificada neste ensaio. Os cabos de aço com esticadores foram substituídos por parafusos, como pode ser visto na Figura 101.

Os parafusos eram fixados nos orifícios das cantoneiras e, o conjunto na calha em concreto através de buchas em nylon. O novo sistema facilitava a fixação da manta asfáltica.



Figura 101 – Ensaio 03 – PDTIS, detalhe da fixação da manta asfáltica com parafuso.

Os termopares de monitoramento e controle de temperatura, são apresentados em destaque na Figura 102 e foram dispostos da seguinte forma:

- O termopar do controlador de temperatura, controlador Coel-HW-1440, foi instalado no centro da calha em concreto, em um furo feito na lateral da calha, entre as britas contaminadas e o cobertor térmico;
- Os termopares 1 e 2 estavam afixados a 30cm do termopar do controlador de temperatura, sendo um à direita e outro à esquerda, entre a brita e o cobertor térmico.
- O termopar 3 foi instalado entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica;
- O termopar 4 foi fixado em contato com a superfície externa da manta asfáltica;
- O termopar 5 estava localizado na parte externa, verticalmente a 10cm de distância da manta asfáltica.

A Figura 102 apresenta a bancada de ensaio montada, destacando o ponto onde está afixado o termopar do controlador de temperatura, os pontos de monitoramento com os termopares do *data logger* e também a forma de fixação das cantoneiras em aço por parafusos.

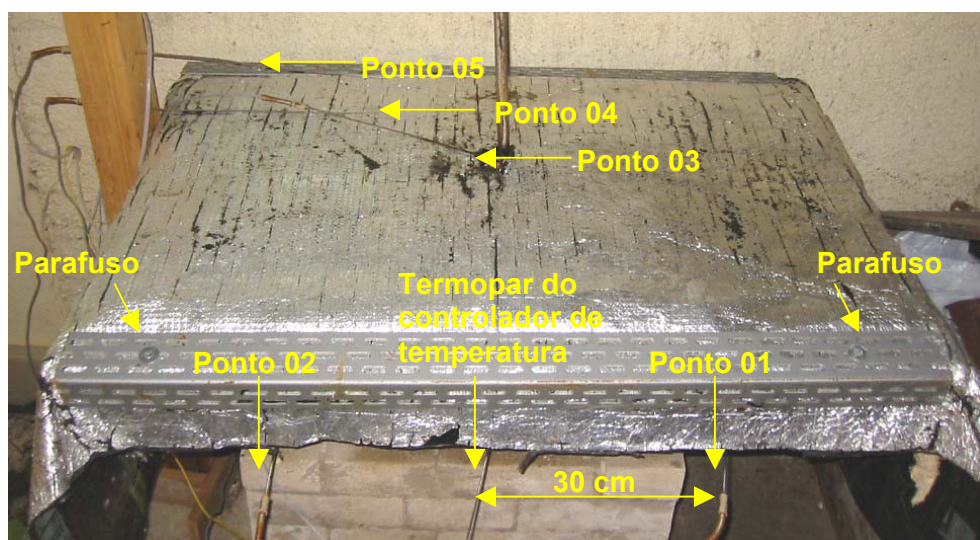


Figura 102 – Ensaio 03 – PDTIS, bancada de ensaio.

O tubo de saída das emissões gasosas permaneceu a maior parte do tempo do ensaio aberto, sendo fechado apenas quando a câmara de carvão ativado era instalada para amostragem dos voláteis.

Foram feitas diariamente as medições da temperatura ambiente com o termômetro digital e a verificação do consumo de energia.

5.4.2.

Monitoramento da temperatura e do consumo de energia

A programação do aquecimento para esse ensaio seguiu o padrão dos demais ensaios. Foram aplicadas as temperaturas de 50°C e 100°C por 48 horas cada, e a partir de 150°C permaneceu um intervalo de 24 horas para cada temperatura.

A Tabela 30 apresenta as temperaturas, máximas e mínimas, registradas para este ensaio, bem como a temperatura ambiente e o consumo de energia para cada estágio de temperatura.

A Figura 103 apresenta a variação da temperatura nos pontos de monitoramento deste ensaio. O *data logger* foi programado para coletar os dados de todo ensaio em uma só vez. Ao término do ensaio esses dados foram coletados e transferidos para um computador PC. A Figura 103 apresenta os resultados.

Tabela 30 - Ensaio 03 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de

Estágio (°C)	50		100		150		200		250		300		350		400	
Temperatura	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Ponto 00 (°C)	57,7	47,5	102,2	96,5	149,1	143,5	196,4	188,4	240,5	234,5	284,8	270,9	328,3	312,8	373,2	343,2
Ponto 01 (°C)	54,9	45,5	100,1	93,7	145,1	139,5	190,2	180	230,8	222,6	275	259,4	316	301,5	364,4	333,4
Ponto 02 (°C)	39,8	29,6	46,1	33,9	57,8	46,8	71,6	55,2	72,9	61,4	83,6	68,9	93,4	80,2	107,7	86,7
Ponto 03 (°C)	36,4	24,5	39,7	27,5	48,4	38,6	51,5	28,1	34,7	27,6	37,8	31,1	40,8	31,8	45,2	25,1
Ponto 04 (°C)	33,3	22,9	31,3	23,5	34,5	26,2	35,5	22,8	26,6	22,1	28,2	23,3	30,9	23,3	33,6	24,8
Ambiente (°C)	34,6		29,5		34,2		36		25,3		28,4		31,2		34,5	
Consumo de energia (kW.h)	6 p/ 48 horas		10 p/ 48 horas		26		21		30		36		46		107 p/ 48 horas	

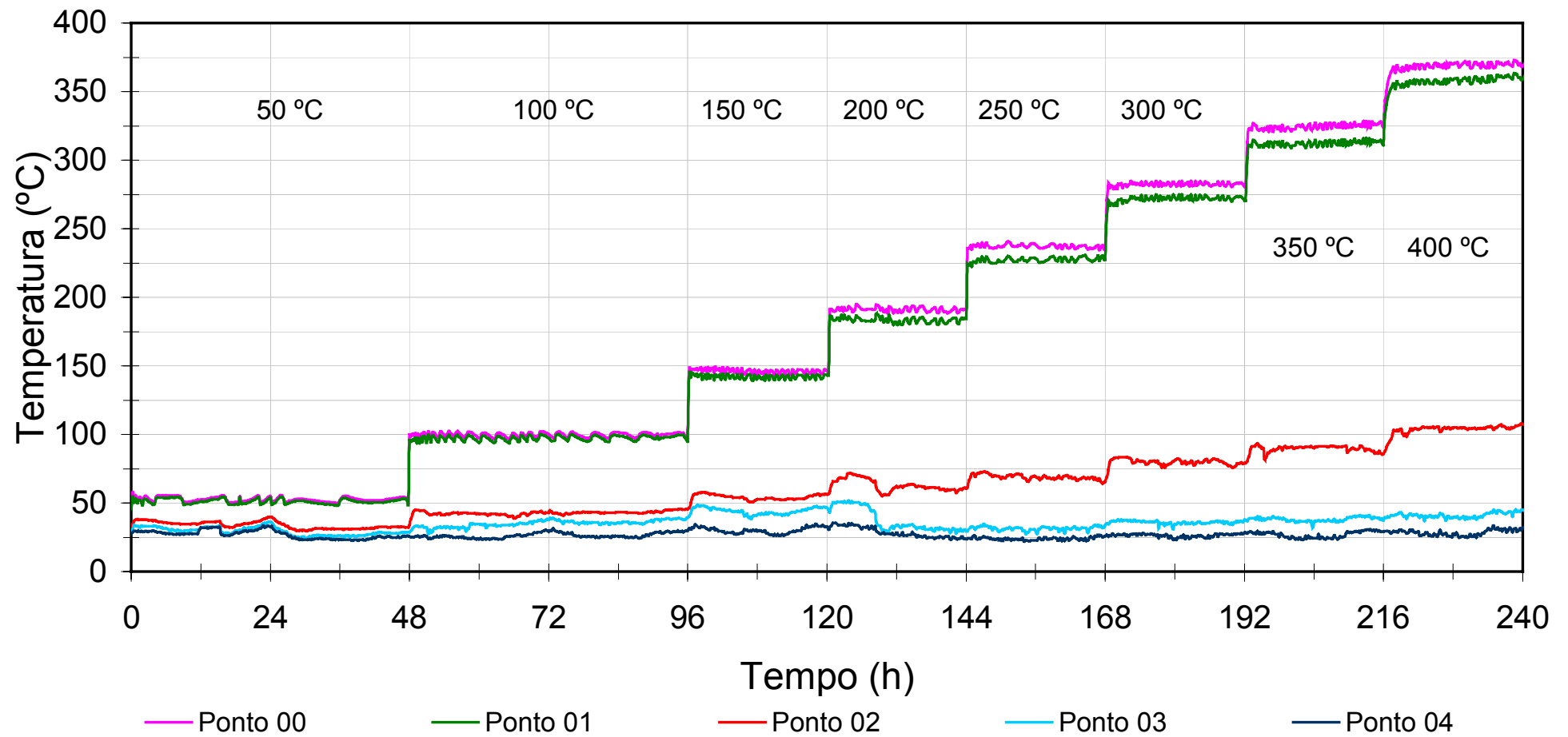


Figura 103 - Ensaio 03 - PDTIS, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.

Verifica-se na Tabela 30 e na Figura 103 que os pontos de monitoramento 0 e 1 atingiram temperaturas inferiores às programadas para os estágios de 200°C a 400°C. Porém observava-se que o controlador de temperatura, situado a mesma altura dos termopares 0 e 1, sempre atingia a temperatura programada. Isto mostra que a distribuição de temperatura no interior da bancada de ensaio não era uniforme.

O isolamento térmico de fibra cerâmica, o mesmo utilizado nos ensaios anteriores, perdeu um pouco sua eficiência. Isto pode ser visto observando o ponto 3, localizado entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica. Durante o estágio com 400°C é verificada uma temperatura de 107,7°C nesse ensaio, vide Tabela 30, enquanto que no ensaio 01 - PDTIS apresentou uma temperatura de 24,9°C, vide Tabela 28, e no ensaio 02 - PDTIS atingiu os 98,8°C, vide Tabela 29.

A possível explicação para a perda da capacidade de isolamento térmico pode ser devido: 1) a contaminação da fibra pelos voláteis do processo de dessorção térmica e 2) a redução da espessura da fibra cerâmica. Essas hipóteses reduzem os vazios da estrutura da fibra, antes apenas preenchidos por ar. Visto o ar ser um péssimo condutor de calor, a redução dos vazios permite a maior propagação do calor pela fibra cerâmica.

Mesmo com um pouco de perda da capacidade de isolamento térmico da fibra cerâmica nesse ensaio, foi verificada uma temperatura máxima na superfície externa da manta asfáltica de 45,2°C. Este é um valor seguro para o risco do aquecimento causar a ignição de algum combustível que eventualmente possa entrar em contato com a bancada de ensaio, conforme descrito no item 4.4.

A temperatura no ponto 4, conforme pode ser visto na Tabela 30 e na Figura 103, estando esse a 10cm de distância da manta asfáltica, sempre esteve oscilando em torno da temperatura ambiente, sem aparentemente sofrer influência do processo.

A temperatura de 107,7°C verificada abaixo da manta asfáltica está dentro de sua faixa de temperatura de amolecimento, mas ainda distante de seu ponto de fulgor. A manta asfáltica ao final do ensaio encontrava-se apenas com partes do seu revestimento em alumínio desprendendo-se.

Mesmo verificando que a temperatura no interior da bancada de ensaio não era uniforme, não se observou a presença de óleo na brita, conforme pode ser visto na Figura 104. Isto é um indicativo que as temperaturas atingidas foram suficientes para a remediação deste material.



Figura 104 – Ensaio 03 - PDTIS, britas após o processo de dessorção térmica.

O material foi retirado de dentro da calha em concreto e devidamente pesado. Observou-se uma redução de 19,56% de sua massa inicial, passando de uma massa de 24kg de britas contaminadas para 19,3kg de material remediado.

A Figura 105 apresenta em detalhe uma brita antes e após o processo de dessorção térmica. A Figura 105 a apresenta a brita ainda contaminada. A Figura 105 b mostra a mesma brita após o processo de dessorção térmica. Observe na Figura 105 b o material fino que fica sobre a brita após a descontaminação. A Figura 105 c apresenta a brita após a retirada do tal resíduo com auxílio de um pincel.

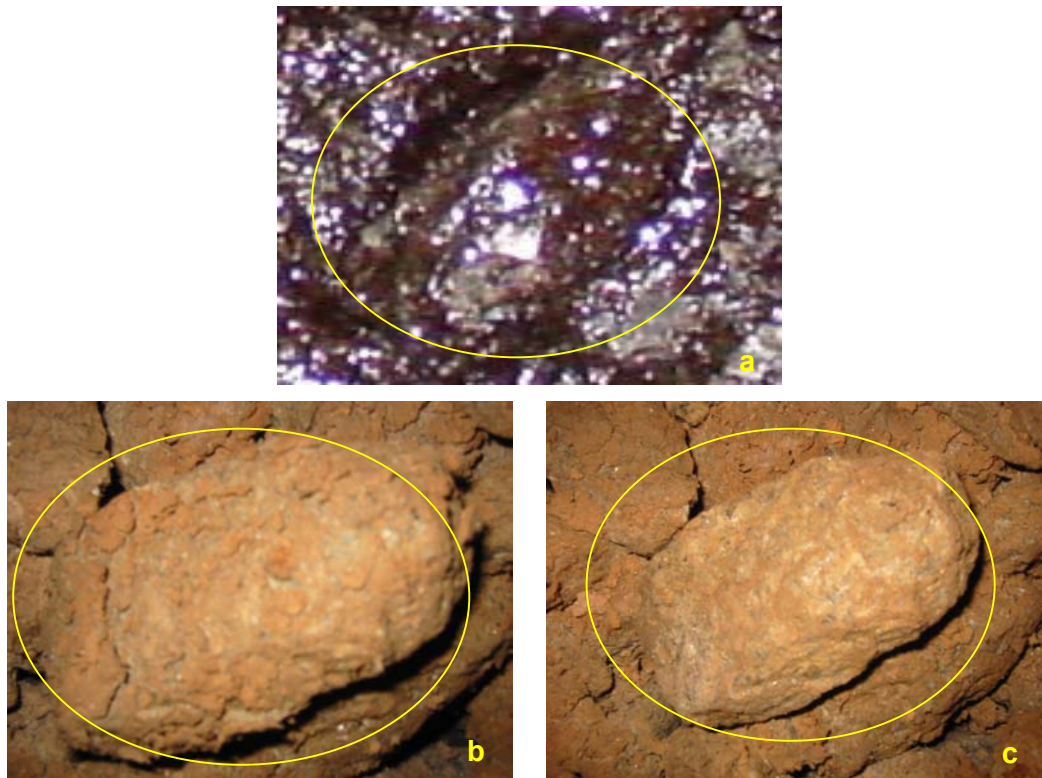


Figura 105 – Ensaio 03 - PDTIS, detalhe das britas contaminadas antes e após descontaminação.

A Figura 106 apresenta as britas depois do tratamento. O material fino residual foi retirado dessas britas por peneiramento, onde se separou o fino das britas e coletou-se o material fino para análises químicas. Observe que as britas adquiriram a coloração original e que não há indícios visuais de contaminação.



Figura 106 – Ensaio 03 - PDTIS , britas após o processo de dessorção térmica.

O consumo total na realização desse ensaio foi de 282kW.h, que como base o valor cobrado por kW.h de R\$ 0,29235, em março de 2004, pela Light, empresa fornecedora de energia do Rio de Janeiro, isso daria um custo de R\$ 82,44 para realização desse ensaio.

O consumo de energia deste ensaio, 282 kW.h foi maior que o anterior (222 kW.h). O maior consumo de energia pode ser atribuído a perda da capacidade de isolamento térmico da fibra cerâmica, que permite uma maior dissipação de calor da bancada de ensaio, e assim, aumentando o consumo energético.

5.4.3. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais

As análises de TPH foram realizadas na brita limpa macerada e no resíduo sobre a brita depois de sofrer o tratamento.

A análise para o macerado da brita, visto na Figura 107, forneceu um valor de -13mg/L. Este valor negativo encontrado é típico para análises que a solução tem um valor de TPH abaixo do limite de detecção. Assim, pode-se afirmar que não foi detectado pelo TOG/TPH Analyser índices de hidrocarbonetos nesta amostra.



Figura 107 – Ensaio 03 -PDTIS, brita macerada depois do aquecimento.

Para o resíduo sobre a brita ao fim do ensaio, mostrado na Figura 108, foi determinado um valor de TPH de 16mg/L.

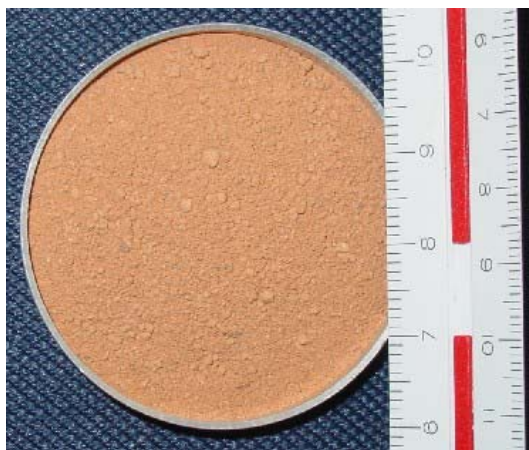


Figura 108 – Ensaio 03 - PDTIS – resíduo sobre a brita após a descontaminação.

A massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução é obtida da seguinte forma:

$$\begin{array}{rcl} 16\text{mg} & - & 1 \text{ L} \\ X \text{ mg} & - & 25\text{mL} (25 \times 10^{-3}\text{L}) \text{ (avolumado)} \end{array} \quad (28)$$

$$X = 0,40\text{mg} \text{ (massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução)}$$

A amostra do macerado da brita a qual foi extraída para análise tinha uma massa de 2,5102g.

O teor de TPH em ppm é obtido da seguinte forma:

$$TPH = \frac{0,40\text{mg}}{2,5102 \times 10^{-3} \text{kg(solo)}} = 159,35\text{mg} / \text{kg} = 159,35 \text{ ppm} \quad (29)$$

$$TPH = 159,35 \text{ ppm}$$

Esse valor de TPH encontra-se abaixo do valor da lista holandesa que tem um valor limite de intervenção de 5000ppm para solos (CETESB, 2001).

5.4.4. Cromatografia gasosa

Para análises dos voláteis desprendidos durante o processo de dessorção térmica foi feita uma amostragem dos voláteis. A amostragem foi realizada utilizando carvão ativado para adsorver as substâncias presentes nos

voláteis, através da câmara de carvão ativado descrita no item 3.2.6. A câmara de carvão ativado foi conectada ao tubo de escape dos voláteis do cobertor térmico e com auxílio de uma bomba a vácuo, também descrita no item 3.2.6, induzia-se o fluxo dos voláteis que eram sugados do interior da bancada de ensaio por dentro do leito de carvão ativado da câmara.

Para esse ensaio, a câmara de carvão ativado possuía um diâmetro interno de 65mm e uma altura de 100mm, e todo esse espaço foi preenchido com carvão ativado em pó.

A amostragem foi iniciada apenas quando aplicado 200°C, pois para temperaturas inferiores a essa, ainda se esperava a saída de vapor d'água, o que poderia prejudicar a adsorção. Por outro lado, só era verificado uma maior produção de voláteis após a aplicação de 150°C.

O ideal seria que o conjunto, câmara de carvão ativado e bomba a vácuo, estivessem conectados ao cobertor térmico durante toda a realização do ensaio, para um maior contato dos voláteis com o carvão ativado. Entretanto, a bomba a vácuo sofria um aquecimento excessivo para longos períodos de funcionamento. Então, decidiu-se realizar uma amostragem intermitente.

A amostragem dos voláteis foi feita instalando-se o conjunto câmara e bomba no tubo de saída das emissões do cobertor térmico e ligando a bomba a vácuo por um período de 1 hora. Em seguida, desconectava-se a câmara de carvão ativado do tubo e se aguardava 1 hora para o resfriamento da bomba, para reiniciar o processo. Esse procedimento era repetido 4 vezes para todos estágios de temperaturas aplicados até o término do ensaio.

Ao fim do ensaio foi coletada uma amostra do carvão ativado. O carvão ativado, que era inodoro antes do ensaio, apresentou um cheiro muito forte. Neste material foi feita uma extração com tolueno para retirada dos possíveis produtos que ficaram adsorvidos ao carvão ativado. A solução extraída era injetada no cromatógrafo a gás que fornecia o percentual dos compostos presentes na solução.

O resultado das análises revelou que os compostos adsorvidos ao carvão ativado eram basicamente parafinas, olefinas e naftênicos na faixa de C₅ a C₈, num total adsorvido de 1,45% por grama de carvão ativado. É possível que a ausência dos hidrocarbonetos mais pesados que não foram detectados nas análises, indique que esses tenham oxidado transformando-se em CO₂ e água ou craqueado em hidrocarbonetos mais leves.

Apesar dos hidrocarbonetos serem os gases poluentes mais abundantes em refinarias, pouco se sabe ainda sobre os seus efeitos deletérios. Alguns

autores referem a incidência acrescida de neoplasias, em especial leucemia em humanos e pode-se suspeitar de efeitos idênticos nos animais. A adsorção por carbono ativado e a oxidação térmica são exemplos de duas técnicas utilizáveis com vista à eliminação dos hidrocarbonetos e têm uma eficiência que pode chegar aos 90%. (Miguel Matos *et al*, 2003).

De fato, quando usado o conjunto câmara de carvão ativado e bomba a vácuo, é notável a redução do odor das emissões filtradas no carvão ativado e que eram exaladas pela bomba a vácuo.

5.5.

Ensaio 04 – Oxidador térmico (OXT)

Neste ensaio é apresentado um teste com o oxidador térmico antes de utilizá-lo na realização dos ensaios de dessorção térmica.

Para o teste foi conectado uma bomba a vácuo na entrada do oxidador térmico e, através de um termômetro digital media-se a temperatura de saída das emissões gasosas que atravessavam o oxidador e a temperatura externa do tubo do oxidador térmico.

O termopar do controlador de temperatura do oxidador térmico estava com sua extremidade localizada no interior e no centro do tubo aquecedor do oxidador térmico.

A Figura 109 apresenta um esquema de como foi procedido o teste com o oxidador térmico.

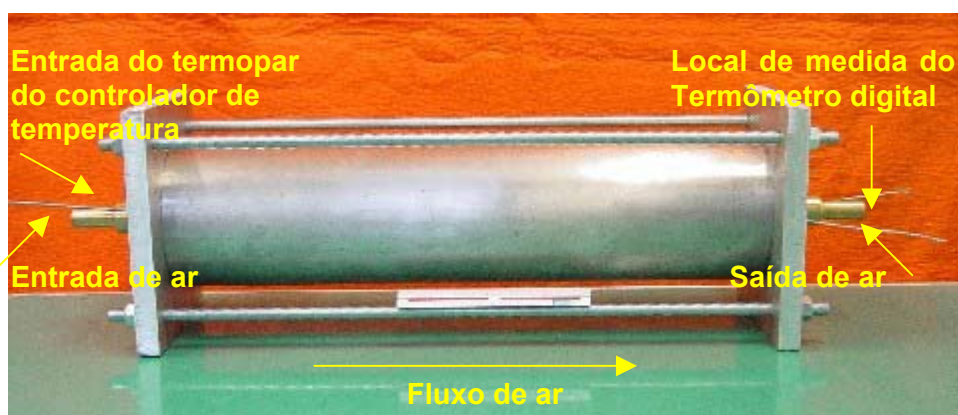


Figura 109 – Ensaio 04 – Esquema do teste com o oxidador térmico

Não se tinha um controle exato da vazão de ar pelo oxidador térmico, porém estimava-se uma taxa de 36 L/min, dada pela capacidade nominal da bomba a vácuo.

Depois de conectada a bomba a vácuo ao oxidador térmico foi iniciado o ensaio. Vale ressaltar que a bomba a vácuo estava injetando ar dentro do oxidador térmico.

Esse ensaio foi iniciado com uma temperatura de 100°C e dado um incremento de 50°C a cada 20 minutos, até atingir a temperatura de 1000°C. O controlador de temperatura do oxidador é do tipo Coel-HW-1440. Os incrementos de temperaturas para esse controlador eram feitos manualmente por um operador.

As temperaturas verificadas na superfície externa do oxidador e na saída do ar estão apresentadas no gráfico da Figura 110.

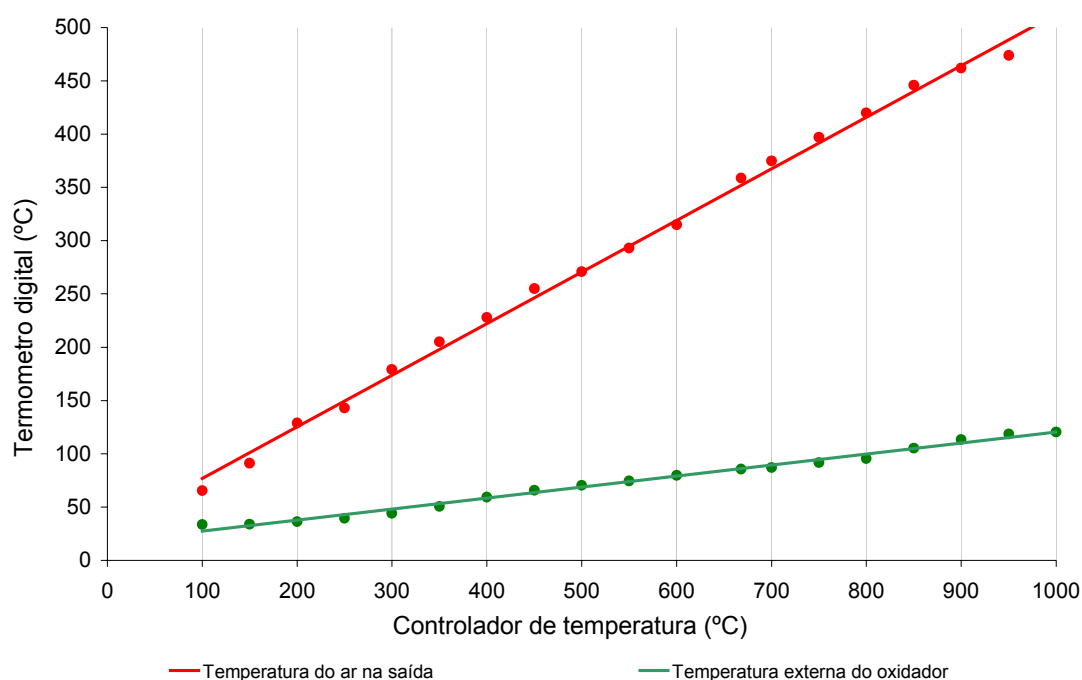


Figura 110 – Ensaio 04 – teste do oxidador térmico

O isolamento térmico do oxidador funcionou razoavelmente, visto ter sido observado uma temperatura externa de apenas 120,3°C, enquanto se registrava 1000°C no interior desse.

É esperado que a utilização do oxidador térmico conectado a saída do cobertor térmico faça com que os voláteis atinjam temperaturas mais elevadas que as verificadas nesse teste. Isto devido a vazão das emissões produzidas pelo processo de dessorção térmica ser menor do que a do teste aqui

apresentado. Tendo dessa forma um maior tempo de residência no oxidador térmico, e assim fazer a oxidação dos contaminantes ainda presentes nas emissões.

5.6.

Ensaio 05 - PDTIS

A realização desse ensaio seguiu o mesmo procedimento de realização dos demais ensaios. Para esse ensaio foi utilizado o controlador de temperatura Incon, modelo CNT 110, o qual é possível fazer toda a programação do aquecimento do ensaio automaticamente, e o oxidador térmico para o tratamento das emissões gasosas produzidas na realização do ensaio.

Foram feitos monitoramento de temperatura, determinação analítica de hidrocarbonetos de petróleo totais e análise por cromatografia gasosa para determinação das emissões gasosas geradas no processo.

5.6.1.

Metodologia do ensaio

Foram pesados 25kg de britas contaminadas e colocadas diretamente dentro da calha em concreto. A Figura 111 apresenta o material ensaiado.



Figura 111 – Ensaio 05 - PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto.

Foi montada toda a bancada de ensaio seguindo o mesmo procedimento dos demais ensaios.

A manta asfáltica utilizada para fechamento da bancada de ensaio foi a mesma utilizada nos demais ensaios, permanecendo nesse ensaio a mesma forma de fixação do ensaio anterior, i.e. utilizando as cantoneiras de aço fixadas à calha em concreto com parafusos.

Entretanto, para este ensaio foi substituída parte da fibra cerâmica, posto que a fibra cerâmica usada nos ensaios anteriores estava muito danificada. Vale lembrar que a fibra cerâmica só se danificava quando a bancada de ensaio era desmontada, pois essa impregnava na manta asfáltica dificultando a sua retirada que provocava rasgos e desagregação em sua estrutura.

Os termopares de monitoramento e controle de temperatura, apresentados em destaque na Figura 112, estavam dispostos da seguinte forma:

- O termopar do controlador de temperatura, controlador Incon CNT-110, foi instalado no centro da calha em concreto, em um furo feito na lateral da calha, entre as britas contaminadas e o cobertor térmico;
- Os termopares 0 e 1 estavam afixados a 30cm do termopar do controlador de temperatura, sendo um à direita e outro à esquerda, entre a brita e o cobertor térmico.
- O termopar 2 foi instalado entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica;
- O termopar 3 foi fixado em contato com a superfície externa da manta asfáltica;
- O termopar 4 estava localizado na parte externa, verticalmente a 10cm de distância da manta asfáltica.

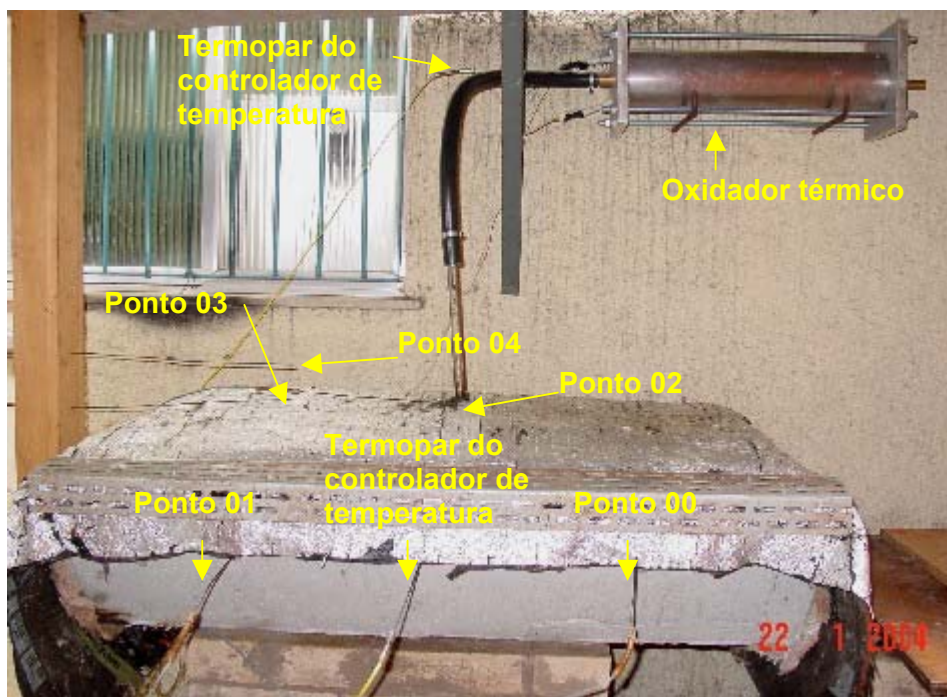


Figura 112 – Ensaio 05 - PDTIS, bancada de ensaio montada.

O tubo de saída das emissões gasosas do cobertor térmico foi conectado ao oxidador térmico por meio de uma mangueira de borracha, conforme mostrado na Figura 112. O oxidador térmico só foi ligado quando o controlador atingiu a temperatura de 150°C. Este só era desconectado do cobertor térmico quando da realização da amostragem dos voláteis.

Foram realizados diariamente as medições da temperatura ambiente e o consumo de energia. O consumo de energia verificado é a soma do consumo do cobertor térmico e do oxidador térmico.

5.6.2.

Monitoramento da temperatura e do consumo de energia

A programação do aquecimento para esse ensaio seguiu o padrão dos demais ensaios, com um aumento gradual de temperatura. Foram aplicadas as temperaturas de 50°C e 100°C por 48 horas cada, e a partir de 150°C permaneceu um intervalo de 24 horas para cada temperatura, sendo esse ensaio programado até a temperatura de 450°C.

Toda essa programação foi feita de uma só vez no controlador de temperatura Incon CNT-110, sem a necessidade de fazer manualmente os

incrementos de temperatura. A programação desse controlador de temperatura é mostrada no apêndice A.

A Tabela 31 apresenta as temperaturas, máximas e mínimas, registradas para todos os estágios de temperatura ao longo de todo ensaio. Nesta Tabela também são apresentados as temperaturas ambiente medidas e os consumos de energia para cada estágio de temperatura aplicada.

Os dados do *data logger* foram coletados e transferidos para um computador PC. A Figura 113 apresenta a variação da temperatura nos pontos de monitoramento.

Tabela 31 - Ensaio 04 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia.

Estágio (°C)	50		100		150		200		250		300		350		400		450	
Temperatura	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Ponto 00 (°C)	47,6	26,1	95,4	92,5	141,7	132,1	188,3	186,4	240,2	229,9	277,7	261,9	321,6	312,4	367,5	339,8	408,6	334,3
Ponto 01 (°C)	54	26,1	106,9	98,5	152,4	145,1	195,9	191	266,2	234,4	282,9	270,8	326,9	319	369,7	345,6	407,7	335
Ponto 02 (°C)	33,9	27,3	46,1	33,2	54,6	44,5	111,5	56,8	132,2	113,3	151,2	128	172,9	156,9	193	170,5	211,8	189,1
Ponto 03 (°C)	30,5	27	37,9	30,3	41,8	34,9	45,2	39,1	49,3	39,7	55,9	47,2	60	52,5	65,2	57,7	68	57,7
Ponto 04 (°C)	27,9	24,3	31	24,1	31,2	24,8	32,1	24,8	31,7	25,5	34,4	24,8	35,9	26,3	37,6	27,2	37,6	27,7
Ambiente(°C)	29,1		30		32,1		31,5		31,7		36,8		38		38,5		38,9	
Consumo de energia(kW.h)	4		7		25		20		33		35		48		51		54	

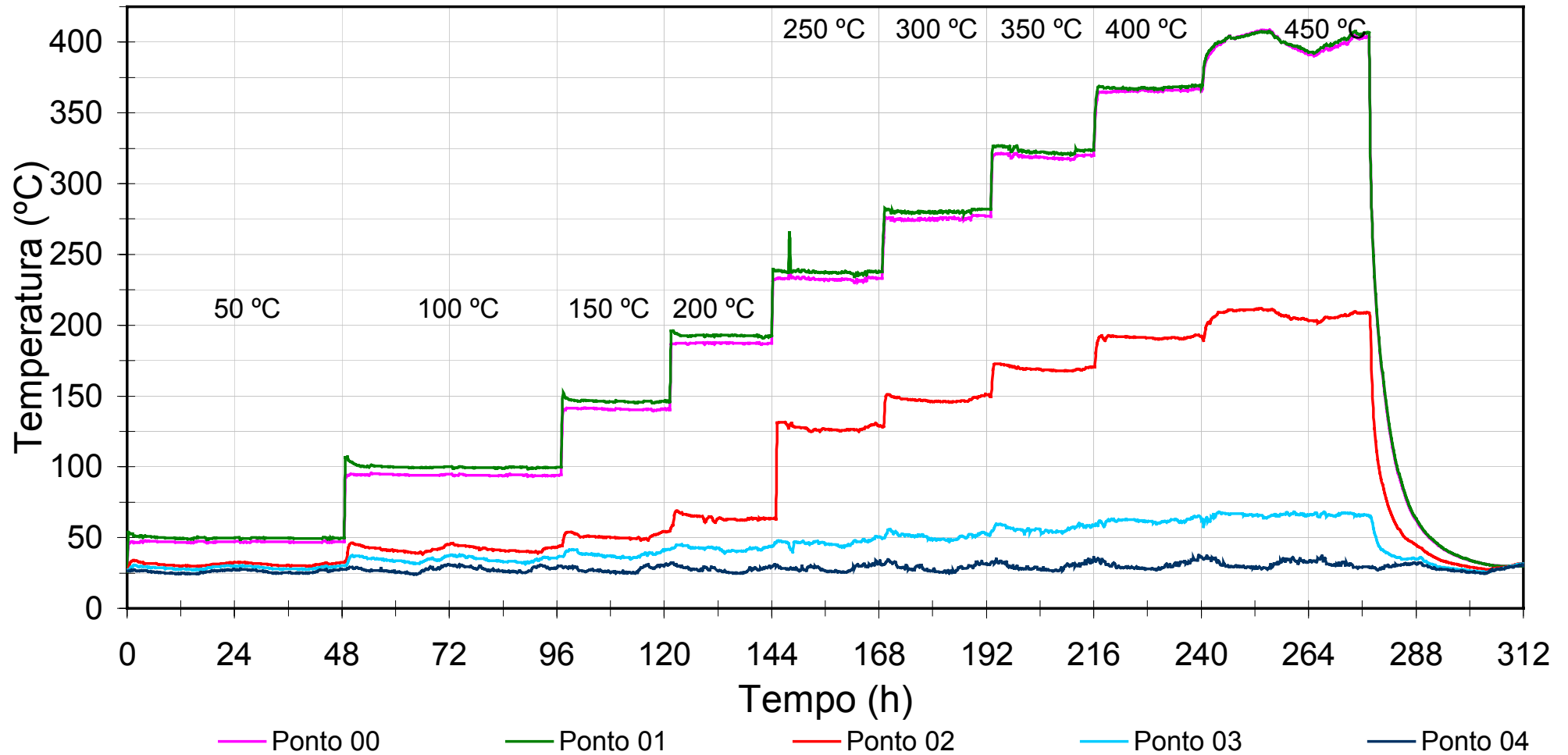


Figura 113 - Ensaio 05 - PDTIS , comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.

O controlador de temperatura Incon CNT-110 funcionou bem, atingindo as temperaturas e os intervalos de tempo programados para as mesmas. É possível verificar no gráfico da Figura 113 o desempenho desse controlador. Observe que os intervalos de tempo estão bem definidos. Embora os pontos 0 e 1 não tenham atingido as temperaturas programadas, é possível verificar que o acréscimo de temperatura nesses pontos coincidem com os intervalos de tempo programados.

Comparando-se as máximas temperaturas verificadas nos pontos 0 e 1, na Tabela 31, com as do ensaio 03 – PDTIS, observa-se que foram registradas temperaturas maiores para o ensaio 03 – PDTIS. Também foram observadas elevadas temperaturas no pontos 02, como pode ser visto na Tabela 31. Essas observações evidenciam que a fibra cerâmica perde sua capacidade de isolamento com o desenvolver dos ensaios.

Como visto na Tabela 31, atingiu-se uma temperatura de 211,8°C entre a fibra cerâmica e a manta asfáltica. Assim, sugere-se que a vida útil da fibra cerâmica é de 3 ensaios.

O ponto de monitoramento 4, como também observado nos ensaios anteriores, permanece com temperaturas oscilando em torno da ambiente. Observe na Figura 113, que no ramo final do gráfico quando desligado o cobertor térmico, todos os pontos convergem para o ponto 04.

A partir da temperatura de 150°C foi ligado o oxidador térmico que foi programado para uma temperatura constante de 900°C. O oxidador só foi ligado a partir deste estágio, pois era observado que a partir desse ponto se verificava a maior saída de voláteis, conforme visto nos outros ensaios.

Durante o ensaio observou-se pouca saída de voláteis pelo oxidador térmico. Foi observado um vazamento das emissões gasosas ao pé do tubo de saída do cobertor térmico. Esse vazamento foi controlado vedando esse local com massa de calafetar.

Sempre quando desconectava-se a mangueira do oxidador térmico, para amostragem dos voláteis, observava-se um líquido que escorria pela mangueira do oxidador. Isso provavelmente deveria ser pelos voláteis estarem condensando na linha que vai da saída do coberto térmico até o oxidador térmico.

O consumo total na realização desse ensaio foi de 277kW.h. A primeira vista, o consumo é abaixo do esperado, visto estar sendo utilizado o oxidador térmico e o cobertor térmico juntos. Pode ser que o uso do controlador de potência do controlador de temperatura Incon-CNT-110, tenha reduzido o

consumo do sistema. Era observado que o oxidador térmico demorava muito para baixar da temperatura o qual estava programado, ficando a chave contactora a maioria do tempo com o circuito aberto, sem que houvesse um consumo de energia. Isto pode ser também pelo o isolamento térmico do oxidador ser bem eficiente conforme mostrado no Ensaio 04 – Oxidador térmico. Esse isolamento térmico não permitia a dissipação fácil da temperatura do oxidador, o que reduz o seu consumo.

Depois do processo de aquecimento e desmontado a bancada de ensaio foi observado um comportamento atípico no material. Como mostrado na Figura 114, é possível verificar a presença de material limpo sem óleo como também a formação de coque em outras partes do material.



Figura 114 – Ensaio 05 - PDTIS , britas após o processo de dessorção térmica.

O aspecto encontrado no material acima é característico de que não houve fluxo dos voláteis produzidos para fora da bancada de ensaio. É possível que a diferença de temperatura entre o oxidador térmico e o cobertor térmico impeça o fluxo de ar para fora da bancada de ensaio, o que poderia estar provocando uma concentração desses voláteis no tubo que sai do cobertor térmico até o oxidador. Isso também pode justificar a condensação dos voláteis nesse trecho, conforme era encontrado o líquido nesse tubo quando desconectado do cobertor térmico.

Esse material foi retirado de dentro da calha em concreto e devidamente pesado. Observou-se um aumento de 1,4kg o que corresponde a um aumento percentual de 5,60% da massa inicial do material. A formação do coque justifica o aumento de peso desse material. Embora tenha sido formado coque houve um aumento de massa bem menor que no ensaio 01, onde também foi observada formação de coque. Neste ensaio houve um aumento percentual de 18,90% de sua massa inicial. O menor percentual de aumento de peso nesse ensaio pode ser atribuído à bancada de ensaio não estar hermeticamente fechada como no ensaio 01 - PDTIS, o que permitiu a limpeza de partes do material, como mostrado na Figura 114.

5.6.3.

TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais

Ao término deste ensaio foram feitas análises para a brita macerada, para o coque sobre a brita e para o material sobre as britas onde não houve formação de coque.

A Figura 115 mostra a brita macerada, na qual foi encontrado um valor de TPH igual a 6mg/L. Esse valor se encontra abaixo do limite de detecção do aparelho.



Figura 115 – Ensaio 05 - PDTIS , brita macerada depois do aquecimento.

Para o coque sobre as britas, apresentado na Figura 116, deu-se o mesmo procedimento adotado no ensaio 01 - PDTIS, no qual também foi feito TPH para o coque.

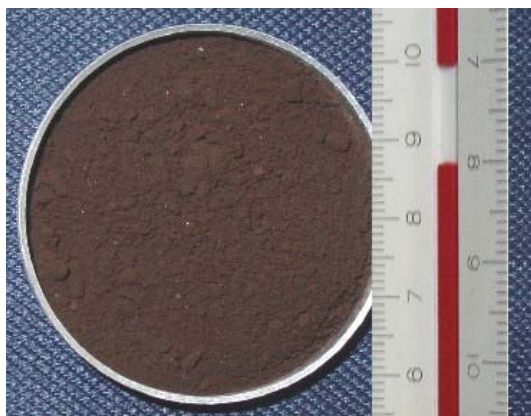


Figura 116 – Ensaio 05 - PDTIS – Coque sobre a brita após o aquecimento.

Nesta análise foi utilizada uma massa de 0,203g desse material para ser submetido à extração com tetracloretileno.

O valor de TPH para essa amostra foi de 410mg/L, diferentemente do ensaio 01 – PDTIS. Este valor de TPH encontra-se dentro do trecho linear.

A massa de hidrocarbonetos na solução é calculada da seguinte forma:

$$\begin{array}{rcl} 410\text{mg} & - & 1 \text{ L} \\ X \text{ mg} & - & 25\text{mL} (25 \times 10^{-3}\text{L}) \text{ (avolumado)} \end{array} \quad (30)$$

$$X = 10,25\text{mg} \text{ (massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução)}$$

A amostra do macerado da placa a qual foi extraída para análise pesava 0,203g.

Dividindo-se X pelo peso da amostra de solo temos:

$$TPH = \frac{10,25\text{mg}}{0,203 \times 10^{-3} \text{kg(solo)}} = 50492,61\text{mg} / \text{kg} = 50492,61\text{ppm} \quad (31)$$

$$TPH = 50492,61\text{ppm}$$

Esse valor de TPH encontra-se muito além dos limites de intervenção da lista holandesa (CETESB, 2001).

Para o material sobre as britas onde não houve formação de coque, apresentado na Figura 117, foi encontrado um valor de TPH igual a 22 mg/L.



Figura 117 – Ensaio 05 - PDTIS – resíduo sobre a brita onde não houve formação de coque.

A massa de hidrocarbonetos na solução é calculada da seguinte forma:

$$\begin{array}{rcl} 22\text{mg} & - & 1 \text{ L} \\ X \text{ mg} & - & 25\text{mL} (25 \times 10^{-3}\text{L}) \text{ (avolumado)} \end{array} \quad (32)$$

$X = 0,55\text{mg}$ (massa de hidrocarbonetos presente no volume da solução)

A amostra desse material que foi extraída para análise pesava 2,499 g.

Dividindo-se X pelo peso da amostra de solo temos:

$$TPH = \frac{0,55\text{mg}}{2,499 \times 10^{-3} \text{kg(solo)}} = 220,08\text{mg / kg} = 220,08\text{ppm} \quad (33)$$

$$TPH = 220,08\text{ppm}$$

Esse valor de TPH encontra-se fora do limite de intervenção para solos contaminados com hidrocarbonetos segundo a lista holandesa (CETESB, 2001).

5.6.4. Cromatografia gasosa

A amostragem dos voláteis para esse ensaio foi modificada. Reduziu-se o volume da câmara de carvão ativado, conforme explicado no item 3.2.6, para que houvesse menos carvão ativado e assim pudesse aumentar a concentração dos compostos adsorvidos. Entretanto, o procedimento para amostragens do

ensaio 03 - PDTIS, com pausas para evitar o sobre aquecimento da bomba a vácuo, foi mantido.

A amostragem dos voláteis iniciou-se apenas quando aplicado a temperatura de 200°C. Era colhida uma amostra do carvão ativado para cada estágio de temperatura para análise. A cada nova amostragem fazia-se a substituição do carvão ativado da câmara.

O resultado dessas análises revelou que os compostos adsorvidos ao carvão ativado eram também apenas parafinas, olefinas e naftênicos na faixa de C₅ a C₈. As concentrações desses compostos para cada temperatura estão apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 – Concentração dos compostos

Temperatura do ensaio (°C)	Concentração dos compostos (% por grama de carvão ativado)
200	1,64
250	2,08
300	1,61
350	1,54
400	1,97
450	1,80

Esses compostos são hidrocarbonetos leves. Como observado para o ensaio 03 – PDTIS, é possível que a ausência dos hidrocarbonetos pesados, indique que esses tivessem sido oxidados e transformados em CO₂ e água, ou ainda, é possível que estes tivessem craqueado em hidrocarbonetos de menor peso molecular ou ainda aderidos ao coque formado sobre as britas ao fim do ensaio.

Foi feita uma amostragem dos voláteis conectando o conjunto câmara de carvão ativado e bomba a vácuo, a saída do oxidador térmico durante o estágio de 200 °C. Durante a amostragem verificou-se um aumento excessivo da temperatura do câmara de carvão ativado e da bomba a vácuo.

A análise de cromatografia gasosa para essa amostragem não indicou a presença de compostos adsorvidos ao carvão ativado. A ausência de compostos nesse carvão ativado, pode ser atribuída a elevada temperatura, que atingiu a câmara ter prejudicado a adsorção dos compostos ao carvão ativado, ou ainda, pode ter ocorrido a oxidação desses compostos no oxidador térmico.

Não foi dada sequência a amostragem dos voláteis no oxidador térmico para os demais estágios devido as elevadas temperaturas poderem comprometer a bomba a vácuo.