

4 Avaliação da técnica de dessorção térmica

4.1. Considerações iniciais

A avaliação da eficácia do uso da dessorção térmica na remediação de britas e placas de pisos em concreto contaminados é realizada neste capítulo. As britas estão contaminadas por um óleo de natureza desconhecida, já as placas em concreto estão contaminadas por óleo combustível. Foi realizado uma bateria de ensaios com o mini sistema de dessorção térmica (MSDT) para remediação desse material. O MSDT foi desenvolvido por Portes (2002) no Laboratório de Geotecnia da PUC-RIO, sendo usado inicialmente na remediação de solos contaminados por derrame de óleo.

A Tabela 14 apresenta um quadro resumo dos ensaios realizados com o MSDT.

Tabela 14 – Resumo dos ensaios realizados e análises desenvolvidas para cada ensaio.

Ensaio	Análises			
	1	2	3	4
1 – Remediação de britas contaminadas com óleo	X			
2– Remediação de britas contaminadas com óleo	X	X	X	X
3– Remediação de placas em concreto contaminadas com óleo	X	X	X	X

(1) Monitoramento da temperatura e consumo de energia;

(2) Análise mineralógica por difração de raios-x (DRX);

(3) Análise química por fluorescência de raios-x (FRX);

(4) Determinação do teor de hidrocarbonetos de petróleo totais (TPH) por espectroscopia na região do infravermelho.

4.2.

Descrição do mini-sistema de dessorção térmica (MSDT)

O mini-sistema de dessorção térmica, desenvolvido por Portes (2002), é constituído basicamente por quatro unidades:

- Mini cobertor térmico para o aquecimento do meio contaminado;
- Um controlador de temperatura que define a temperatura do mini cobertor térmico;
- Um tanque feito em tijolo refratário no qual é colocado o material a ser ensaiado e
- Um sistema de aquisição e monitoramento de dados de temperatura do ensaio.

4.2.1.

Mini cobertor térmico

O mini cobertor térmico, ilustrado na Figura 45 e cujo diagrama esquemático pode ser visto na Figura 46, foi confeccionado em aço inoxidável 316, com chapa de 1 mm de espessura, nas dimensões de 415x425mm na base. Internamente à estrutura feita em aço, foram fixadas duas placas cerâmicas vazadas de dimensões 400x200mm. Dentro das placas cerâmicas foram inseridas resistências elétricas que são a fonte geradora de calor do mini cobertor térmico. As resistências estão ligadas em paralelo à rede elétrica e alimentadas com uma tensão de 220V. Segundo Portes (*op. cit.*), a placa cerâmica foi utilizada com a finalidade de proteger a resistência e distribuir mais uniformemente o calor.

O isolamento térmico do cobertor é feito com amianto encapsulado, preenchendo o espaço entre as placas cerâmicas e topo da estrutura em aço.

Saindo do centro do cobertor térmico, entre as placas aquecedoras, existe um tubo em aço de 25mm de diâmetro que se estende até o topo do cobertor. Esse tubo funciona como o escape dos voláteis, gerados pelo processo de dessorção. Conectado ao tubo existe uma câmara de carvão ativado para adsorção de contaminantes presentes nas emissões gasosas. Esta câmara é feita em alumínio em um formato cilíndrico com altura de 120mm e com um diâmetro interno de 75mm. Dentro da câmara é colocado carvão ativado em pó.



Figura 45 – Mini cobertor térmico

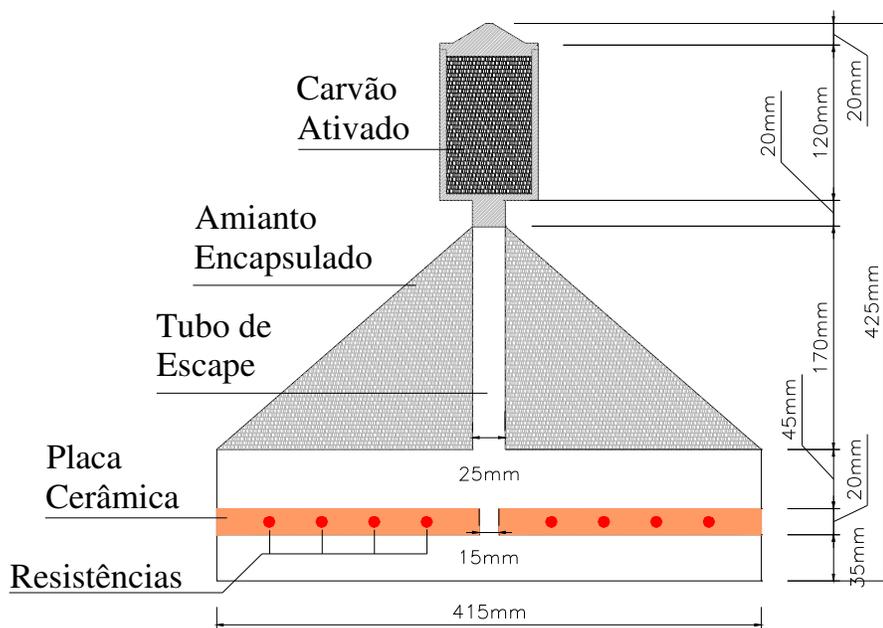


Figura 46 – Diagrama esquemático do mini cobertor térmico (adaptado de Portes, 2002)

4.2.2. Controlador de temperatura

Para controle e programação da temperatura do mini cobertor térmico foi empregado um controlador de temperatura, visto na Figura 47, marca Coel, modelo HW-1440, que possibilita a aplicação de até 1000°C, desenvolvido por

Portes (*op. cit.*). Esse controlador é alimentado numa faixa de 85 a 265V, a uma frequência de 48 a 62Hz, possuindo dois displays com quatro dígitos cada, permitindo visualização simultânea das temperaturas que se encontra o cobertor e a temperatura programada (*set point*), com uma resolução de 0,1°C.

A este aparelho está conectado um termopar tipo K, modelo NiCr, que trabalha numa faixa de -200°C a 1250°C. O termopar possui uma haste de 400mm de comprimento, sendo do tipo isolado; ou seja, o ponto onde se mede a temperatura é apenas na extremidade da haste.

O controlador de temperatura possui uma chave contactora de 20A, indicada na Figura 47, que funciona da seguinte forma: quando o mini cobertor térmico atinge a temperatura programada a chave contactora abre o circuito elétrico e automaticamente o mini cobertor térmico deixa de ser alimentado, assim a temperatura no cobertor começa a diminuir e quando reduz cerca de 3°C, a chave contactora fecha novamente o circuito, e novamente o mini cobertor térmico volta ser alimentado voltando a aumentar sua temperatura.

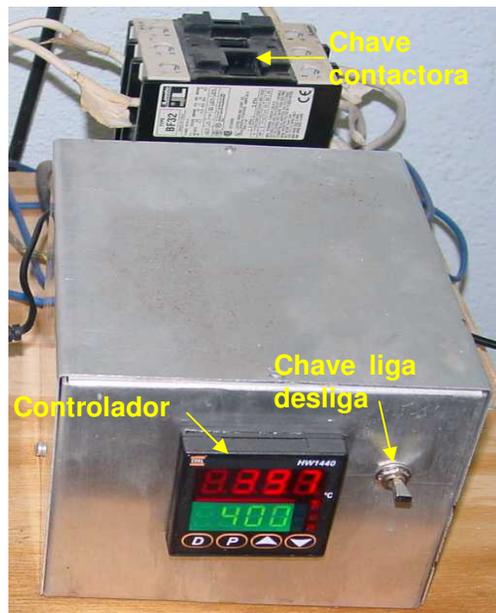


Figura 47 – Controlador de temperatura do mini-sistema de dessorção térmica

4.2.3. Tanque em tijolo refratário

Um tanque em tijolo refratário foi construído para realização dos ensaios. O tijolo refratário possui uma baixa condutividade térmica, evitando a dissipação

de calor para o meio externo. Foi utilizado tijolo refratário de 229x114x63mm, assentados com argamassa refratária. O tanque possui 400x400x470mm de dimensões internas e 630x630x550mm de dimensões externas.

Dentro do tanque é colocado o material a ser ensaiado. Para drenagem de óleo, que pode ocorrer com as elevadas temperaturas durante o ensaio, existe um dreno na parte inferior do tanque.

4.2.4. Sistema de monitoramento e aquisição de dados

O sistema de monitoramento e aquisição de dados utilizado nesta campanha de ensaios é idêntico ao descrito no item 3.2.8.

4.3. Ensaio 01 – Uso do MSDT na remediação de britas contaminadas com óleo

O primeiro ensaio realizado para avaliação da eficácia da técnica de dessorção térmica foi realizado em britas contaminadas com óleo. Para esse ensaio foi utilizado o mini sistema de dessorção térmica (MSDT). A brita contaminada possuía um diâmetro médio em torno de 50mm. Esse pedregulho estava fortemente contaminado com óleo.

4.3.1. Metodologia do ensaio.

Inicialmente seguiu-se o mesmo procedimento adotado por Portes (*op. cit.*) quando utilizou o MSDT na remediação de areia de praias atingidas por derrame de óleo em janeiro de 2000 na Baía de Guanabara.

O material contaminado foi primeiramente colocado diretamente dentro do tanque refratário, preenchendo todo o tanque até uma altura de 40cm a partir da base. Foram distribuídos ao longo da altura do tanque os termopares, dispostos da seguinte forma:

- O termopar do controlador de temperatura estava localizado na superfície do material contaminado, a uma distância de 7cm das placas aquecedoras do cobertor térmico;

- Os demais termopares eram do sistema de monitoramento e aquisição de dados, e estavam inseridos dentro do material contaminado, dispostos em relação à superfície das britas a uma distância de 6cm (ponto 00), 12cm (ponto 01), 18cm (ponto 02), 24cm (ponto 03) e 30cm (ponto 04).

Com os termopares instalados, o mini cobertor térmico sobre o tanque, e feita a programação do *data logger*, o ensaio foi iniciado.

O *data logger* foi programado para fazer leituras a cada 5 minutos. Diariamente os dados eram coletados e transferidos para um computador PC, através do programa AMR-Control citado no item 3.2.8.

4.3.2.

Monitoramento da temperatura e do consumo de energia

Com respeito à programação das temperaturas nas quais seria procedido o ensaio, foi estabelecido que o ensaio seria iniciado com uma temperatura de 50°C e a cada 24 horas acrescidos mais 50°C até atingir a temperatura de 450°C. Os acréscimos de temperatura eram feitos manualmente.

As temperaturas, máximas e mínimas, registradas durante todos os incrementos de temperatura do ensaio 01, são listadas na Tabela 15.

A Figura 48 apresenta o comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento da bancada de ensaio. Os dados para cada incremento de temperatura foram coletados separadamente e posteriormente unidos em uma planilha e plotados em um só gráfico, conforme é apresentado na Figura 48.

Tabela 15 – Ensaio 01, temperaturas máximas e mínimas registradas.

Estágio (°C)	50		100		200		250		300		350		400		450 (1º)		450 (2º)	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Temperatura																		
Ponto 00 (°C)	49	32,7	94,6	43,9	217,8	142,8	249,1	182,9	273,4	261,4	318,1	308,3	360,1	349,7	400,5	388	405,5	361,7
Ponto 01 (°C)	35,7	31	61,9	35,4	83,2	68,2	106,5	84,9	131,6	109,6	153,9	132,5	181,5	156,7	210,6	183,9	197,4	194,1
Ponto 02 (°C)	32,5	29,6	50,7	32,3	58,9	50,4	75,3	65,5	93,1	76,8	111,7	95,5	133,1	113,5	155,7	134,1	144,3	140
Ponto 03 (°C)	30	29,1	41,2	29,8	43,8	39,9	51,4	45	59,8	52,3	67,6	60,7	78,1	68,7	89,2	78,4	82,1	79,1
Ponto 04 (°C)	27,5	25,9	30,8	27,1	36,9	34,7	42,4	37,9	48,4	42,9	54,1	49,2	60,5	54,6	67,3	60,7	62,6	60,7

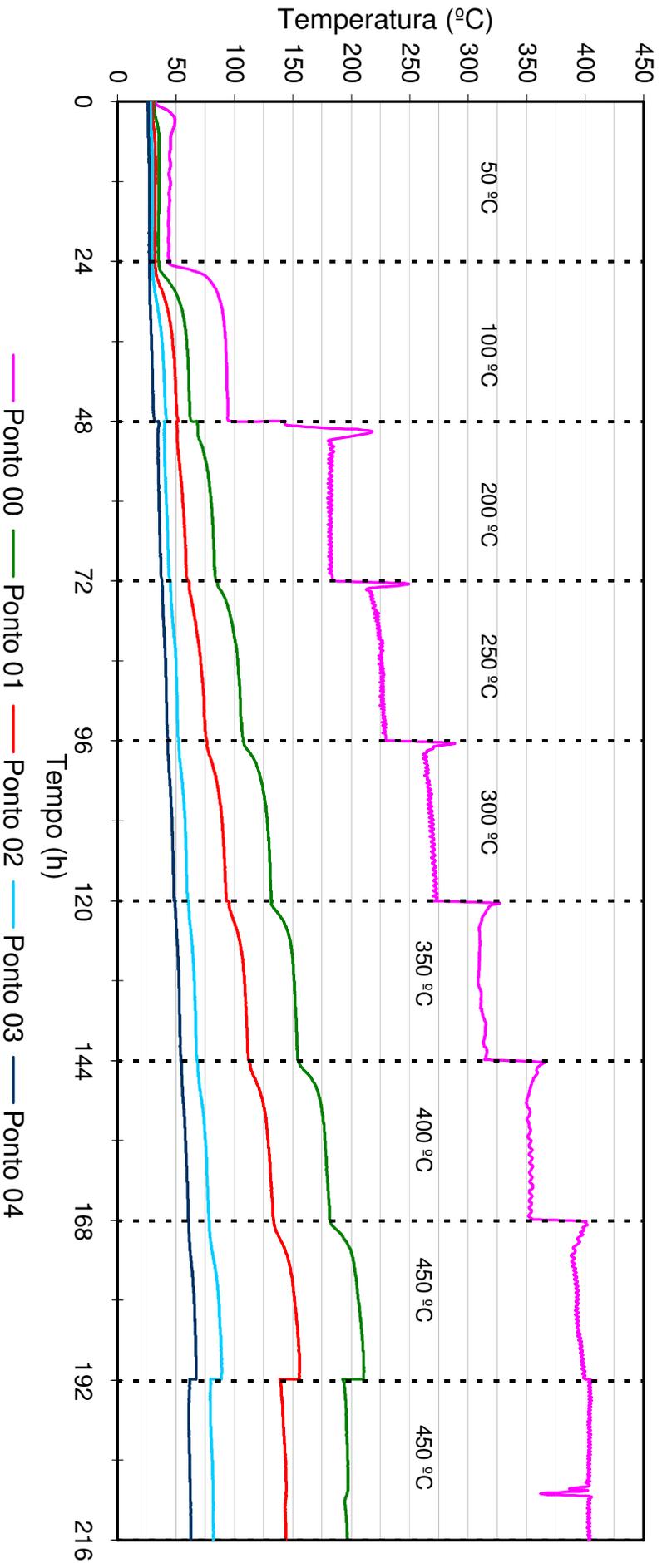


Figura 48 – Ensaio 01, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.

Conforme pode ser visto na Tabela 15 e na Figura 48, não estão registrados os dados referentes a temperatura de 150°C. Isto foi devido a problemas na coleta dos dados armazenados no *data logger*.

De acordo com a Tabela 15, nos pontos 0, 1 e 2 foram verificadas as maiores temperaturas. É observado que o ponto 0 atinge patamares mais próximos da temperatura programada no controlador de temperatura do MSDT, visto que, esse ponto se encontra mais próximo do mini cobertor térmico. De acordo com a Figura 48, é notado que, a medida que se aumenta a temperatura do MSDT, as temperaturas registradas no ponto 0, cada vez mais se afastam das temperaturas registradas nos outros pontos de monitoramento.

Os pontos 3 e 4 sofreram pequenas variações em relação a temperatura inicial, conforme pode ser vista na Figura 48. A pequena variação de temperatura para pontos mais distantes do mini cobertor térmico é devido a baixa condutividade térmica do material ensaiado não permitir o fluxo de calor para pontos mais afastados do mini cobertor térmico.

Estando o sucesso dessa técnica de remediação diretamente associada em fazer com que os contaminantes atinjam seus pontos de ebulição, a não propagação de calor para pontos mais afastados do cobertor térmico pode ter um efeito negativo na remediação desse material ensaiado.

Durante a aplicação do estágio de temperatura de 150°C foi observado que houve um aumento acentuado das emissões gasosas geradas no processo. Isso foi devido a ter sido atingido e ultrapassado o ponto de vaporização da água e de produtos presente no óleo, os quais têm seus pontos de ebulição acima de 100°C. É verificado que as emissões gasosas produzidas escapam pela bancada de ensaio direto para atmosfera.

Observa-se na Figura 48, que no início de cada novo estágio de temperatura, ocorre o aparecimento de picos no ponto 0 durante as primeiras horas de cada estágio, sem afetar os demais pontos de monitoramento. Esse foi um comportamento atípico, verificado apenas durante a realização desse ensaio. O aparecimento do pico foi devido ao controlador de temperatura demorar a estabilizar a temperatura do mini cobertor térmico em torno da temperatura programada.

A partir da temperatura de 250°C houve um pequeno escoamento de óleo pelo dreno do tanque devido ao aumento da temperatura ter diminuído a viscosidade do óleo, facilitando assim o seu escoamento.

Quando atingido as primeiras 24 horas de aquecimento com a temperatura de 450°C, foi dada seqüência ao ensaio para essa mesma temperatura por mais 24 horas.

No início da aplicação do segundo estágio de temperatura de 450°C, houve uma interrupção no fornecimento de energia, ficando algumas horas sem que houvesse aquecimento. Isto fez com que houvesse uma dissipação de calor da bancada de ensaio. Quando reiniciado o ensaio o ponto 0, como visto na Figura 48, atingiu temperaturas próximas das registradas no final do primeiro estágio com 450°C. Entretanto, os pontos 1, 2, 3 e 4, mais afastados do mini cobertor térmico, não recuperaram tão rapidamente as temperaturas do estágio anterior, isto devido a baixa condutividade térmica do material ensaiado.

A queda de temperatura observada no ponto 0, conforme visto no segundo estágio de 450°C na Figura 48, ocorreu devido a mais uma interrupção no fornecimento de energia durante o ensaio.

Era observado através do visor digital do controlador de temperatura que sempre se atingia a temperatura programada.

As variações totais das temperaturas, nos pontos onde foram instalados os termopares do *data logger*, ao longo de todo ensaio, foram calculadas e estão apresentadas na Tabela 16, esse cálculo foi feito subtraindo-se a temperatura mínima registrada da máxima registrada nos pontos 0, 1, 2, 3 e 4.

Tabela 16 – Variações máximas das temperaturas ao longo do ensaio 01

Ponto	00	01	02	03	04
Máxima (°C)	405,5	210,6	155,7	89,2	67,3
Mínima (°C)	32,7	31	29,6	29,1	25,9
Varição (°C)	372,8	179,6	126,1	60,1	41,4

Como a máxima variação do cobertor térmico foi de 400°C, é observado que quanto mais distante o ponto do cobertor térmico menor a temperatura atingida por esse.

É possível concluir que o sistema de aplicação de calor não foi adequado para transmitir o calor até os pontos mais distantes.

Fazendo um cálculo simples, dividindo a variação total nos termopares (0 – 4) pela variação total do mini cobertor térmico, verifica-se que o percentual de temperatura que foi transmitido para estes pontos.

Tabela 17 – Percentual de temperatura transmitida para os pontos 0, 1, 2, 3 e 4.

Termopar	00	01	02	03	04
Varição (°C)	372,8	179,6	126,1	60,1	41,4
% de temperatura transmitida	93,2	44,9	31,52	15,02	10,35

Depois de encerrado o ensaio foi dado um intervalo de 48 horas para que houvesse o total resfriamento do material.

Apenas uma camada superior de cerca de 12cm do material dentro do tanque foi totalmente limpo, isso é explicado observando o percentual de temperatura transmitida pelo mini cobertor térmico ao material contaminado na Tabela 17. Misturado a essa camada ficou um material fino semelhante à argila. Nos pontos abaixo dos 12cm encontrava-se um material ainda muito contaminado por óleo.

Os pontos mais afastados do mini cobertor térmico ainda se encontravam contaminados por óleo, posto que, não houve um aquecimento necessário para que nestes pontos pudesse haver a volatilização do óleo.

Ao término desse ensaio foi verificado um consumo total de 281kW.h.

4.4.

Ensaio 02 – Uso do MSDT na remediação de britas contaminadas com óleo

O material objeto desse ensaio foi, também, britas contaminadas por derrame de óleo. Para realização desse ensaio, foram feitas modificações na forma em que o material contaminado era colocado no tanque em tijolo refratário, visto que no ensaio 01 só houve sucesso na limpeza desse material até a profundidade de 12cm.

Além de avaliar o uso da dessorção térmica para limpeza desse material contaminado, esse ensaio tinha a finalidade de monitorar a temperatura externa ao mini cobertor térmico, com o objetivo de avaliar o desempenho do seu isolamento térmico. Isso é extremamente importante, uma vez da possibilidade da aplicação dessa técnica de remediação *in situ*, em locais onde possa existir risco de vazamento de combustíveis, como em refinarias ou em dutovias onde são encontrados materiais contaminados por derrame de óleo, como listados na Tabela 18. Esses combustíveis podem atingir seu ponto de ignição em contato com o cobertor térmico. Uma preocupação ainda maior deve-se ter para

vazamento de gases mais densos que o ar, como é o caso do GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), que possui densidade de $2,173\text{kg/m}^3$ à 15°C . Em decorrência de um eventual vazamento, esses tipos de gases se movimentam para baixo, devido sua densidade, e podem entrar em contato facilmente com a parte externa do cobertor térmico ou adentrar ao cobertor e ter contato direto com a fonte aquecedora, provocando explosão.

Tabela 18 - Pontos de ignição de combustíveis transportados em dutovias

Combustível	Gás Natural	GLP	Gasolina	Álcool Hidratado	Diesel
Ponto de Ignição ($^\circ\text{C}$)	630-750	300-490	280-430	390	250-340

4.4.1.

Metodologia do ensaio

O material contaminado foi depositado sobre um suporte feito em ferro, visto na Figura 49. Esse suporte é colocado dentro do tanque em tijolo refratário, e possui um sistema que permite regular sua altura, permitindo controlar a quantidade de material que se deseja ensaiar.

O suporte é composto de três partes:

- Base de altura regulável;
- Bandeja e
- Grelha.

Essas peças são sobrepostas, de forma que sobre a base de altura regulável é colocada a bandeja, e sobre esta é colocada a grelha onde o material contaminado é depositado.

Para este ensaio, o suporte foi ajustado para uma camada de 12cm de britas contaminadas.



Figura 49 – Suporte para colocação de material contaminado no tanque refratário

Os termopares foram dispostos da seguinte forma:

- O termopar do controlador de temperatura estava inserido no material contaminado a 6cm da superfície;
- Os termopares do 0 e 1 do *data logger*, estavam localizados entre a bandeja e a grelha onde estava depositado o material a uma distância de aproximadamente 12cm do topo do material contaminado;
- Os demais termopares 2, 3 e 4 estavam colocados externamente ao cobertor térmico a uma distância vertical de 5cm, 25cm, e 45cm, respectivamente.

A Figura 50 mostra o material contaminado sobre o suporte dentro do tanque refratário.



Figura 50 – Ensaio 02, britas contaminadas por óleo

Através de um termômetro digital, marca Minipa, modelo MT-511, com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$, eram feitas medições da temperatura ambiente e da superfície do cobertor térmico.

Os dados do *data logger* eram coletados e transferidos para um computador PC diariamente. Também realizava-se diariamente o monitoramento do consumo de energia do ensaio para cada intervalo de temperatura aplicada.

4.4.2.

Monitoramento da temperatura e consumo de energia

O ensaio foi iniciado com uma temperatura de 60°C , aplicada por um período de 48 horas. Em seguida, foi aplicada a temperatura de 100°C que também permaneceu durante 48 horas. A partir da temperatura de 100°C foi dado um incremento de 50°C a cada 24 horas, até atingir a temperatura de 400°C .

A Tabela 19 apresenta o resumo do monitoramento das temperaturas de todo ensaio. Estão apresentados as temperaturas: máximas e mínimas, registradas nos pontos de monitoramento com o *data logger*; a temperatura ambiente e a temperatura da superfície externa do mini cobertor térmico,

medidas com o termômetro digital e o consumo de energia para cada estágio de temperatura.

Na Figura 51 é apresentada a variação de temperatura para todos os estágios de aquecimento. O gráfico, apresentado na Figura 51, foi feito unindo-se os dados coletados diariamente para cada incremento de temperatura e condensados em uma só planilha.

Tabela 19 – Ensaio 2, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia

Estágio (°C)	60		100		150		200		250		300		350		400	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Temperatura																
Ponto 00 (°C)	38,6	22,4	76,8	73,7	116,7	100,5	150,7	117,5	214,5	180,6	250	244	278,6	247,3	300	269,3
Ponto 01 (°C)	38,6	22,4	69,8	63,9	108,4	97,4	142,0	113,8	208,9	169,8	251,8	241,8	283,2	253,1	306	276,7
Ponto 02 (°C)	37,8	23	47,0	38,7	52,6	45,1	60,7	49,7	76,4	64,4	84,4	44,8	88,2	65,3	84,60	44,8
Ponto 03 (°C)	27,5	19,8	30,4	21,6	32,1	22,4	36,1	20	42	24,3	48,4	26	47,3	21,7	48,4	26
Ponto 04 (°C)	26,7	20,4	29,9	20,4	30,9	21,1	34,9	21,3	40,6	23,1	41,1	24,7	46,1	20,7	47,1	24,7
Superfície externa (°C)	68,9		103,1		146,3		180,1		206		260,6		299		346,7	
Ambiente (°C)	23,7		27,4		29,4		32,3		27,5		28,7		28		27,6	
Consumo de energia (kW.h)	18		50		27		20		30		35		39		46	

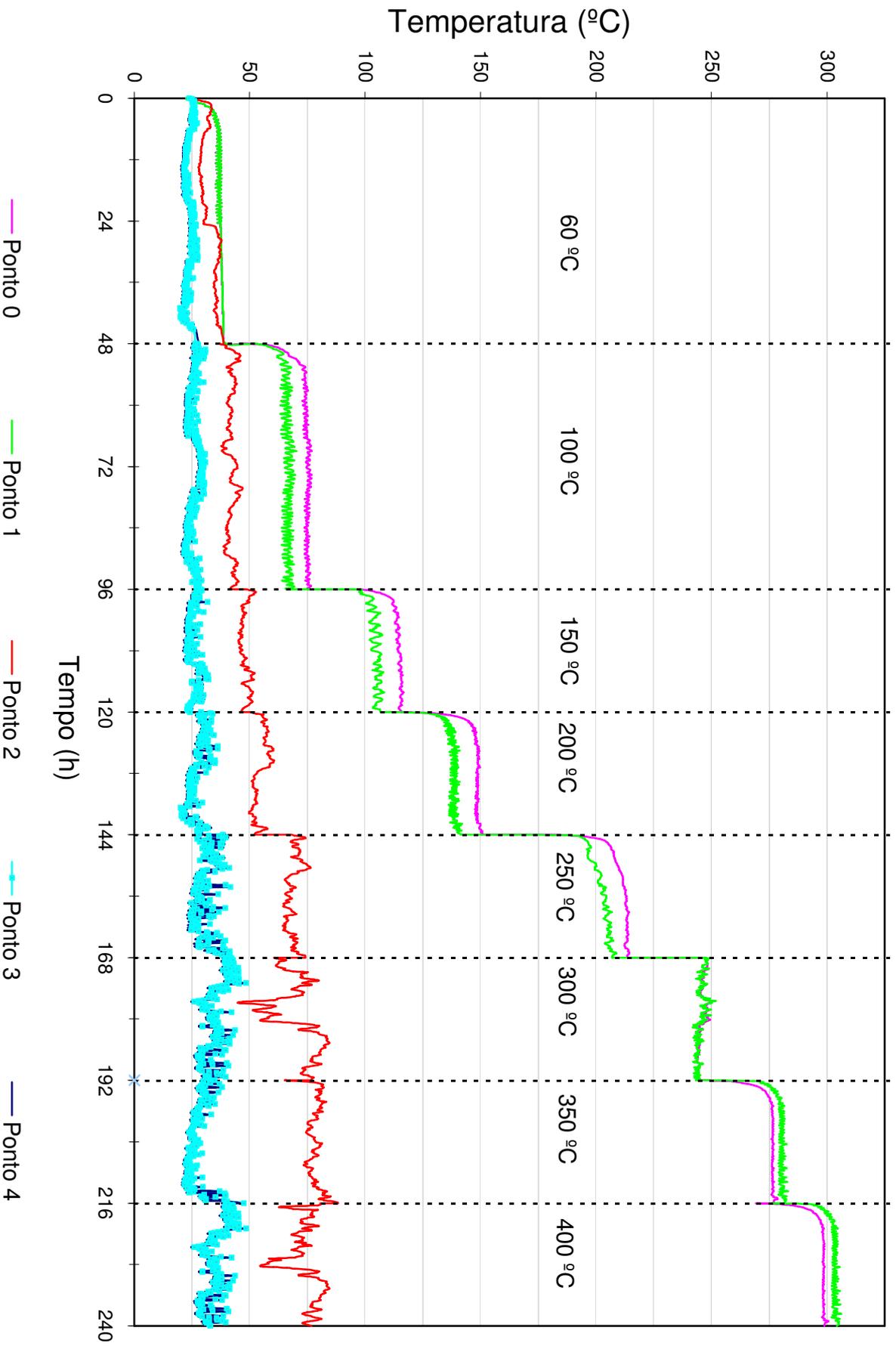


Figura 51 – Ensaio 02, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.

A temperatura de 60°C e de 100°C foram aplicadas por um período de 48 horas, conforme pode ser visto na Figura 51. Maior período de tempo para temperaturas entre 50°C e 100°C, tinha o objetivo de evitar a carbonização do material tratado, que para efeitos visuais torna impróprio o material tratado, conforme concluído por Portes (2002).

A Figura 52 mostra as britas contaminadas durante o aquecimento com 100°C.



Figura 52 – Ensaio 02, brita a 100°C.

Para a temperatura de 100°C, conforme pode verificar-se na Figura 52, iniciava-se a geração de muitos voláteis e observava-se que as emissões gasosas escapavam entre o mini cobertor térmico e o tanque refratário direto para atmosfera.

A Figura 53 apresenta o material sendo aquecido a 200°C.



Figura 53 - Ensaio 02, brita a 200°C.

Observa-se que na Figura 53 o material no centro do tanque já começa a mudar seu aspecto. Isto ocorre devido ao óleo estar sendo volatilizado.

Na Figura 54, a qual apresenta o material sendo tratado a 300°C, é observada uma mudança na coloração do material. Nesta fase, inicia-se o aparecimento de um material mais claro sobre as britas.



Figura 54 - Ensaio 02, brita a 300°C.

Conforme é possível observar na Figura 55, ao término do ensaio não existe nenhuma contaminação por óleo aderido a brita, restando apenas um material pulverulento sobre ela. Este material é idêntico ao encontrado ao término do ensaio 01. Os estudos para identificação deste material estão descritos no item 4.4.3 e 4.4.4.



Figura 55 - Ensaio 02, brita ao término do ensaio.

O material após o tratamento foi retirado do tanque, peneirado para coletar o material fino para as análises e logo em seguida lavado para retirada total do material fino sobre as britas.

A Figura 56 mostra as britas depois de lavadas para retirada do material fino que ficou sobre elas ao fim do ensaio.



Figura 56 – Ensaio 02, britas lavadas para retirada do material fino

Em observações feitas na Tabela 19, verifica-se que temperaturas máximas atingidas nos pontos 0 e 1 distantes 12cm da superfície do material foram de 300°C e 306°C. Como ao fim do ensaio o material apresentava-se

descontaminado, essas temperaturas podem ser consideradas suficientes para limpeza desse material contaminado com esse óleo.

Conforme é possível verificar na Figura 51, foram observadas oscilações nos pontos de medição em todos os gráficos. Os pontos 0 e 1 se mantêm praticamente constantes para uma mesma temperatura do cobertor térmico. Maiores oscilações são observadas para os pontos 2, 3 e 4.

Fazendo-se o cálculo dos desvios padrões de todos os pontos de medição de temperatura no ensaio, é possível melhor analisar a influência da temperatura nesses pontos. Os resultados estão listados na Tabela 20.

Tabela 20 – Desvios padrões nos pontos de medição de temperatura do ensaio 02.

Temperatura	Termopar				
	00	01	02	03	04
60°C	2,35	2,25	3,21	1,74	1,69
100°C	3,19	2,18	1,93	2,36	2,50
150°C	2,82	2,26	1,97	2,52	2,73
200°C	3,95	3,13	3,01	3,93	3,68
250°C	3,72	3,13	2,84	4,29	4,12
300°C	4,56	4,68	2,87	4,61	4,87
350°C	1,62	1,96	9,26	4,99	5,00
400°C	3,74	3,07	2,95	4,39	4,40

Verificamos que os pontos 0 e 1 possuem praticamente os mesmos desvios padrões; uma vez que os termopares nesses pontos estão instalados a uma mesma altura, sofrendo influência direta do cobertor térmico.

Os desvios padrões do ponto 2 são diferenciados de todos os outros pontos. Neste ponto, situado a 5cm da parte externa do cobertor térmico, é visível a influência do aquecimento externo do cobertor térmico. Nota-se um aumento da temperatura desse ponto à medida que aumenta a temperatura do cobertor térmico como visto na Figura 51.

Os desvios padrões dos pontos 3 e 4, distantes de 25 e 45cm, respectivamente, do cobertor térmico, são bem próximos em todos os estágios de temperatura, diferenciando apenas em algumas casas decimais. Isto evidencia que esses pontos estão sujeitos as mesmas variações de temperatura, ou seja, eles sofrem influência de uma mesma fonte de calor, que no caso leva a crer que seja a temperatura ambiente. As temperaturas medidas através do

termômetro digital estão bem próximas à temperatura ambiente. No entanto, são vistos alguns picos de temperaturas elevadas. Esses picos podem estar relacionados com o contato das emissões gasosas que escapam da bancada de ensaio e eventualmente atingem os termopares desses pontos, causando as oscilações no gráfico da Figura 51.

Foi verificado que as temperaturas medidas na superfície do cobertor térmico são elevadas, sugerindo a ineficiência de seu isolamento térmico. A Tabela 21 mostra o quanto foi transmitido de temperatura das placas aquecedoras do cobertor térmico para sua superfície externa.

Tabela 21 - Ensaio 02, temperatura transmitida do cobertor térmico para sua superfície externa

Temperatura do cobertor térmico (°C)	60	100	150	200	250	300	350	400
Temperatura da superfície externa (°C)	68,9	103,1	146,3	180,1	206	260,6	299	346,7
% transmitido	114,8	103,1	97,5	90,0	82,4	86,6	85,4	86,6

Uma eventual utilização de um cobertor térmico em uma aplicação real *in situ*, nos padrões do utilizado neste ensaio, poderia oferecer um risco elevado, visto a possibilidade de vazamento de combustíveis que entrassem em contato com a superfície externa, atingindo seu ponto de ignição devido as elevadas temperaturas atingidas na sua superfície. Para esse ensaio, as temperaturas atingidas na superfície externa do cobertor provocariam uma ignição na maioria dos combustíveis listados na Tabela 18.

Durante os 10 dias de realização do ensaio houve um consumo total de 265kW.h. Como exemplo ilustrativo, e tomando-se como base o valor cobrado pela LIGHT (concessionária na cidade do Rio de Janeiro) de R\$ 0,29235 por kW.h, para classe não residencial, no mês de março de 2004, sem acréscimos de impostos, o custo do ensaio seria de R\$ 77,47.

4.4.3. Análise mineralógica por difração de raios-x

A análise mineralógica por difração de raios-x fornece informações sobre a cristalinidade da substância, permitindo identificação de materiais quanto às suas características cristalinas e a quantificação de elementos de constituição desde que em faixa adequada de concentração (Bleicher e Sasaki, 2000). É

aplicável a substâncias orgânicas sólidas e principalmente aos minerais. Devido ao fenômeno da difração de raios-x, é possível estudar materiais a nível atômico, descobrindo e estudando sua estrutura.

A técnica de difração de raios-x foi aqui utilizada primeiramente para identificar o material que ficava sobre a brita após ser tratada. Tinha-se inicialmente dúvida a respeito desse material ser proveniente do próprio óleo ou esse ter sido transportado pelo vento e aderido ao óleo. Foi também feita análise mineralógica por difração de raios-x da brita limpa, para efeitos comparativos.

A brita limpa foi inicialmente macerada com auxílio de um martelo, de uma mão de gral e de um almofariz. Do material macerado, visto na Figura 57, foram confeccionadas lâminas que foram utilizados no difratômetro.



Figura 57 – Ensaio 02, brita macerada.

O difratograma das britas maceradas está apresentado na Figura 58. Os resultados revelam a presença de quartzo (Q), feldspato (F) e mica (M).

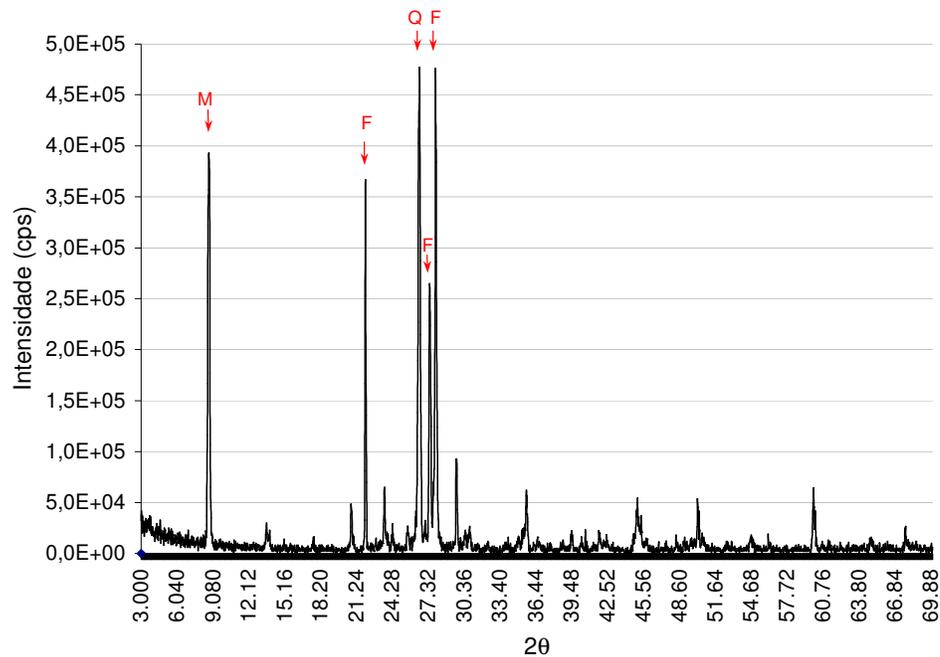


Figura 58 – Difratograma de raios-x do macerado da brita.

O resíduo aderido à brita, visto na Figura 59, também foi analisado segundo a mesma metodologia. Os resultados, vistos na Figura 60, revelaram a presença de caulinita, que não foi detectada no ensaio com a brita macerada. A análise comparativa sugere que o resíduo possa ser advindo de erosão eólica, que transportou o solo da refinaria e o impregnou no óleo.



Figura 59 – Ensaio 02, resíduo sobre a brita.

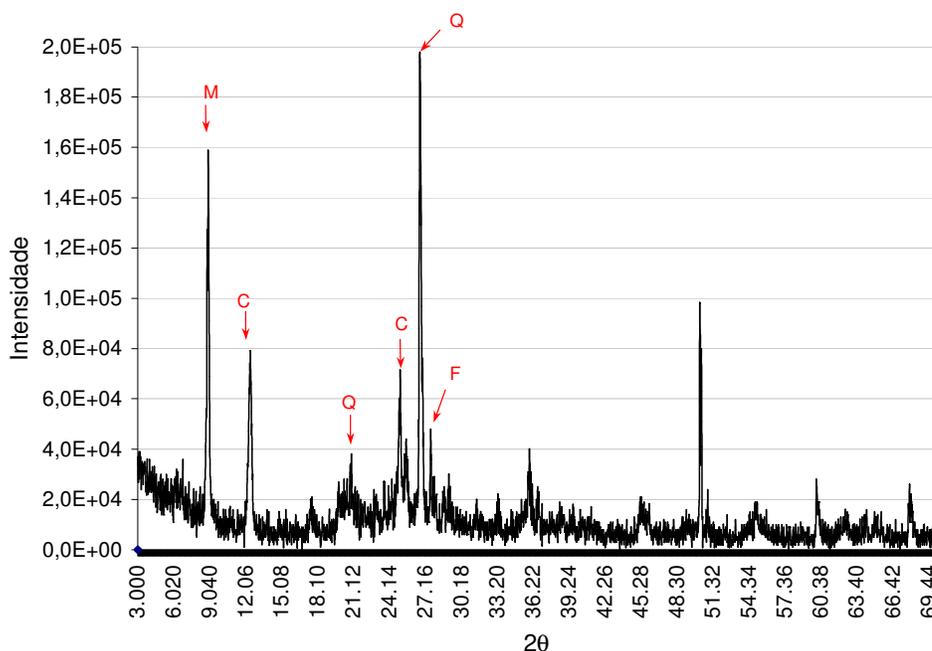


Figura 60 - Difratograma de raios-x do resíduo sobre a brita.

4.4.4.

Análise química por fluorescência de raios-x

A análise química por fluorescência de raios-x é adequada para análise de elementos maiores e menores, metálicos ou não metálicos, em amostras sólidas e líquidas (UNICAMP, 2004). É sensível a grande parte dos elementos da tabela periódica. As vantagens principais são: alta velocidade analítica e alta resolução, sendo um método não destrutivo (UNICAMP, *op. cit.*).

A Tabela 22 apresenta os resultados de fluorescência de raios-x nas amostras de britas macerada e do resíduo sobre a brita.

Tabela 22 – Ensaio 02, fluorescência de raios-X

Resíduo sobre a brita		Macerado da brita	
Óxido	%	Óxido	%
SiO ₂	41,967	SiO ₂	61,792
Al ₂ O ₃	35,139	Al ₂ O ₃	26,402
Fe ₂ O ₃	9,388	K ₂ O	5,219
SO ₃	6,954	Fe ₂ O ₃	3,071
CaO	2,506	CaO	2,664

Tabela 22 (continuação) – Ensaio 02, fluorescência de raios-x

Resíduo sobre a brita		Macerado da brita	
Óxido	%	Óxido	%
K ₂ O	1,520	TiO ₂	0,609
BaO	1,274	S	0,096
TiO ₂	0,297	MnO	0,062
V ₂ O ₅	0,229	SrO	0,030
PbO	0,148	ZnO	0,025
MnO	0,104	ZrO ₂	0,011
ZnO	0,118		
Sc ₂ O ₃	0,091		
SrO	0,039		
ZrO ₂	0,030		

Os resultados revelam um alto teor de óxidos de silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) e potássio (K).

A maior presença de Al₂O₃ na amostra do resíduo, pode ser atribuída, por analogia aos resultados de difração de raios-x, a presença de caulinita. Estes resultados reforçam a hipótese do resíduo encontrado após o tratamento ser de origem eólica.

4.4.5.

TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais

As análises de hidrocarbonetos de petróleo totais (TPH) são realizadas para determinar a quantidade total de hidrocarbonetos presentes numa amostra. Foi usado para determinação do TPH o analisador infravermelho TOG/TPH, visto na Figura 61. A determinação de TPH nesse aparelho utiliza radiação infravermelha e baseia-se na medida da absorvância da ligação C-H dos hidrocarbonetos presentes na amostra.



Figura 61 – TOG/TPH Analyzer.

As ligações C-H dos hidrocarbonetos alifáticos absorvem energia num comprimento de onda específico. Segundo Nascimento (2003), a intensidade de absorção é proporcional à quantidade de moléculas de hidrocarbonetos numa amostra. Isto pode ser diretamente convertido à quantidade total de óleo na amostra original se a razão do solvente com o óleo for cuidadosamente controlada, como por exemplo, através de uma calibração. Assim, em todos os métodos de determinação de TPH na região do IR, a quantificação é realizada comparando a absorbância da ligação C-H de uma determinada amostra com as absorbâncias de padrões de concentrações conhecidas através de uma curva de calibração (Nascimento 2003).

É válido ressaltar que os valores de concentração apresentados pelo equipamento estão expressos em massa (mg) por volume (L). Entretanto, esta unidade de concentração é representativa do extrato depois de diluído com o solvente, exatamente aquilo que é lido pelo *Infracal*, ou seja, é a massa de TPH presente em um dado volume de solvente.

Para a calibração, preparou-se uma solução do óleo em tetracloroetileno com concentração de 10.000mg/L, pesando 5,0g de petróleo em um balão volumétrico de 500mL, e posteriormente avolumado com o tetracloroetileno.

A partir desta solução foram feitas diluições para a obtenção das soluções com as concentrações padrões de 50mg/L, 100mg/L, 200mg/L, 300mg/L, 400mg/L, 500mg/L, 700mg/L, 1000mg/L, 1500mg/L e 2000mg/L. Estas soluções preparadas foram levadas ao aparelho TOG/TPH Analyzer, e para cada solução anotada a adsorbância (sinal do aparelho) correspondente. Em

seguida calibrava-se o aparelho, que consistia basicamente em, por meio do seu painel frontal, definir que o valor das adsorbâncias encontradas equivalem aos respectivos valores das concentrações padrões das soluções preparadas.

A Tabela 23 e a Figura 62 apresentam os resultados da calibração.

Tabela 23 - Valores de adsorbância (sinal) e concentração de TPH

Concentração Padrão (mg/L)	Adsorbância
50	38
100	74
200	108
300	158
400	195
500	250
700	264
1000	307
1500	347
2000	378

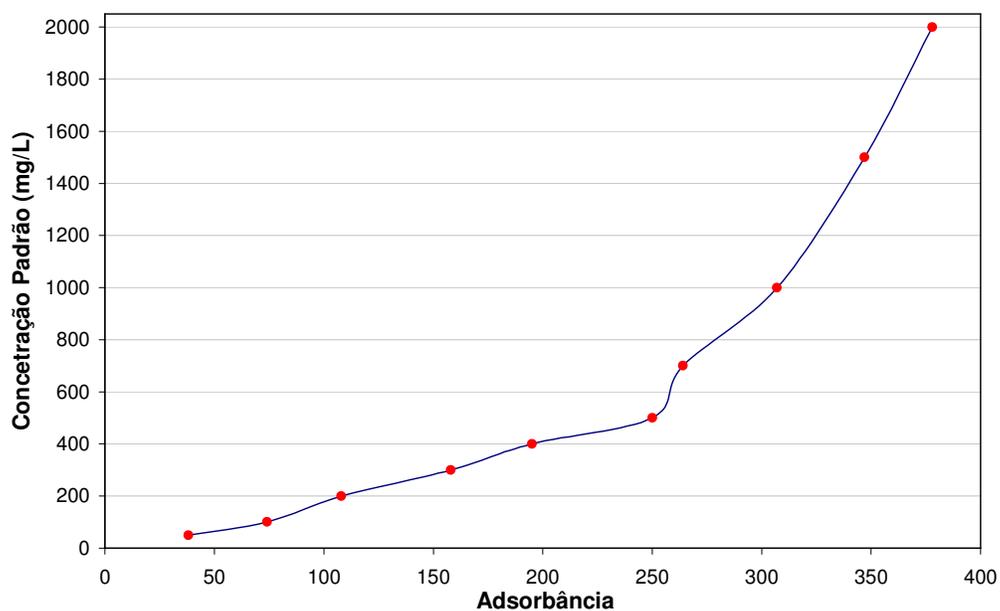


Figura 62 – Calibração do TOG/TPH

Observa-se no gráfico da Figura 62, um trecho compreendido entre 0 e 250 de adsorbância, possui uma maior linearidade. Apenas esse trecho linear é o considerado para as análises. Para valores que extrapolem esse trecho linear

é feita diluição na amostra para induzir que o valor fique dentro do trecho linear e, através de correção por um fator de diluição calculado, é encontrado o real valor para análise. O trecho linear é apresentado na Figura 63.

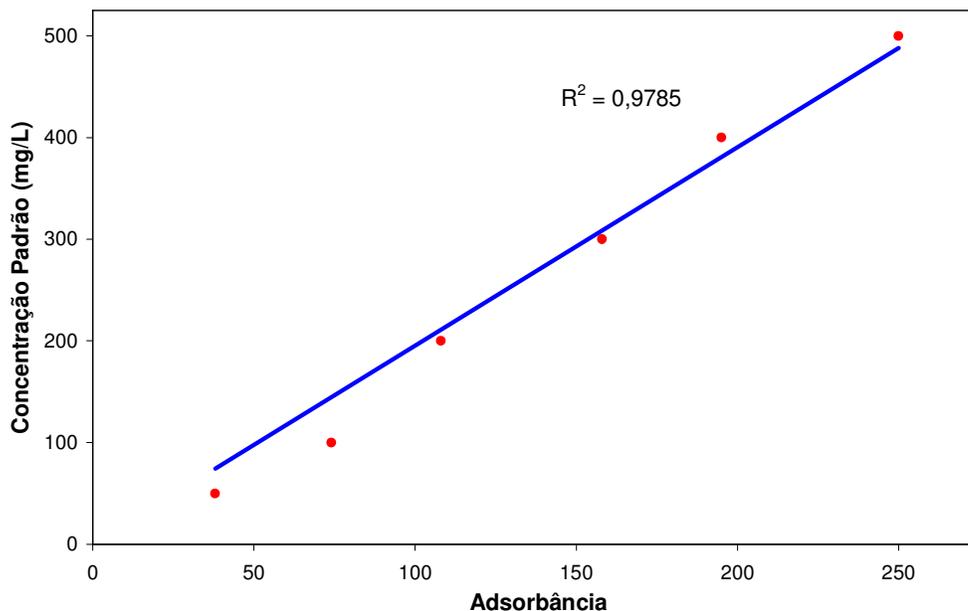


Figura 1 – Faixa linear do TOG/TPH

Foi calculado o limite de detecção desse aparelho e encontrado um valor de 11,33mg/L. Para análises feitas no TOG/TPH abaixo desse valor devem ser classificadas com valor abaixo do limite de detecção do aparelho.

Os mesmos materiais usados para as análises mineralógicas por difração de raios-x e análise química por fluorescência de raios-x foram usados para análise de TPH. Cerca de 2,5g de cada amostra foram pesados em balança analítica com resolução de 0,0001g e extraídos com 10mL de tetracloretileno (PCE), dentro de erlenmeyer com tampa de vidro, utilizando um agitador orbital a 160 rpm, por 2 horas a temperatura ambiente. Após esse período, o sobrenadante foi filtrado utilizando um funil de vidro com um pedaço de algodão contendo Na₂SO₄ (sulfato de sódio). Posteriormente, a amostra foi novamente extraída com mais 10mL de PCE por mais 2 horas, e filtrada. Os dois extratos orgânicos foram então somados e avolumados com PCE em balão volumétrico a 25mL. Uma alíquota dessa solução foi então transferida para a cubeta e efetuada a leitura na região do Infravermelho, no Aparelho TOG/TPH Infracal previamente calibrado.

O resultado de TPH encontrado para o resíduo sobre a brita e para o macerado estava abaixo do limite de detecção do aparelho. Este valor de TPH pode indicar ausência de hidrocarbonetos ou no mínimo em concentrações insignificantes.

4.5.

Ensaio 03 – Uso do MSDT na remediação de placas em concreto contaminadas com óleo combustível

O ensaio 03 foi realizado em uma placa de concreto, vista na Figura 64, de um pavimento de acesso de um tanque de armazenamento de óleo combustível de uma refinaria.

Estas placas em concreto quando contaminadas, são retiradas e substituídas por novas placas. As placas retiradas são armazenadas adequadamente até que se defina seu destino final. O objetivo deste ensaio foi avaliar a aplicabilidade da dessorção térmica *in situ*.

Foi usado para este ensaio o mesmo suporte para colocação do material contaminado no tanque refratário utilizado no ensaio 02.



Figura 64 – Ensaio 03, placa em concreto contaminadas por óleo

4.5.1. Metodologia do ensaio

O procedimento de execução do ensaio 03 foi similar ao empregado no ensaio 02. A placa contaminada, vista na Figura 65, foi colocada sobre o suporte dentro do tanque em tijolo refratário, a uma distância de cerca de 8cm das placas aquecedoras do cobertor térmico.



Figura 65 – Ensaio 03, placa em concreto contaminada, preparação do ensaio.

Os termopares de monitoramento das temperaturas foram dispostos da seguinte forma:

- Termopar do controlador de temperatura estava localizado acima da placa contaminada, conforme ilustra a Figura 65;
- Termopar 0 e 1 do *data logger* estavam localizados entre a bandeja e a grelha onde estava a placa contaminada, a uma distância de aproximadamente 12cm do topo do material contaminado, conforme destacado na Figura 65;
- Termopar 2 estava situado a uma distância de 5cm da parte externa do cobertor térmico;
- Termopar 3 localizado a 5cm da parte superior da câmara de carbono ativado do cobertor térmico.
- Termopar 4 localizado a 25cm da parte externa do cobertor térmico.

Através de um termômetro digital marca Minipa, modelo MT-511, eram feitas diariamente medições da temperatura ambiente.

Os dados do *data logger* eram coletados e transferidos a cada novo incremento de temperatura aplicado. O consumo de energia era medido a cada incremento de temperatura aplicado.

4.5.2.

Monitoramento da temperatura e do consumo de energia

O ensaio foi iniciado com uma temperatura de 60°C. Depois de 24 horas nesta temperatura, o cobertor térmico foi programado para 100°C, ficando 48 horas aquecendo o meio tratado nesta temperatura. A partir desta temperatura seguiu o padrão de incremento de 50°C a cada 24 horas, finalizando o ensaio com 400°C.

A Tabela 24 apresenta as temperaturas, máximas e mínimas, registradas nos pontos de monitoramento com o *data logger*, a temperatura ambiente e o consumo de energia para cada estágio de temperatura.

Na Figura 66 é apresentado a variação de temperatura para todos os estágios de aquecimento do ensaio 03.

Tabela 24 – Ensaio 3, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia.

Estágio (°C)	60		100		150		200		250		300		350		400	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Temperatura																
Ponto 00 (°C)	52,4	22,9	109,8	106,7	141,7	125,5	175,7	142,5	208,8	176,2	239,5	205,6	274,9	268,5	303,6	272,3
Ponto 01 (°C)	49,5	24,5	102,8	96,9	133,4	122,4	167	138,8	201,4	168,4	233,9	194,8	276,8	266,8	308,2	278,1
Ponto 02 (°C)	39,8	23,6	47,5	39,5	52,6	45,1	60,9	49,9	67,4	49,0	75,4	64,1	85,6	44,6	89,3	64,1
Ponto 03 (°C)	31,7	20,8	39,8	29,2	45	28,3	49,4	28,9	56,6	31	59,8	38,3	66,1	35,8	69,1	36,3
Ponto 04 (°C)	27,4	20,7	30,4	20,9	30,4	20,9	33,9	20,3	37,5	22,8	41,3	23,9	48,1	23,3	47,1	20,0
Ambiente (°C)	26,6		28,7		29,7		29,2		32,7		34,3		29,7		28,6	
Consumo de energia (kW.h)	5		14		9		17		26		33		40		45	

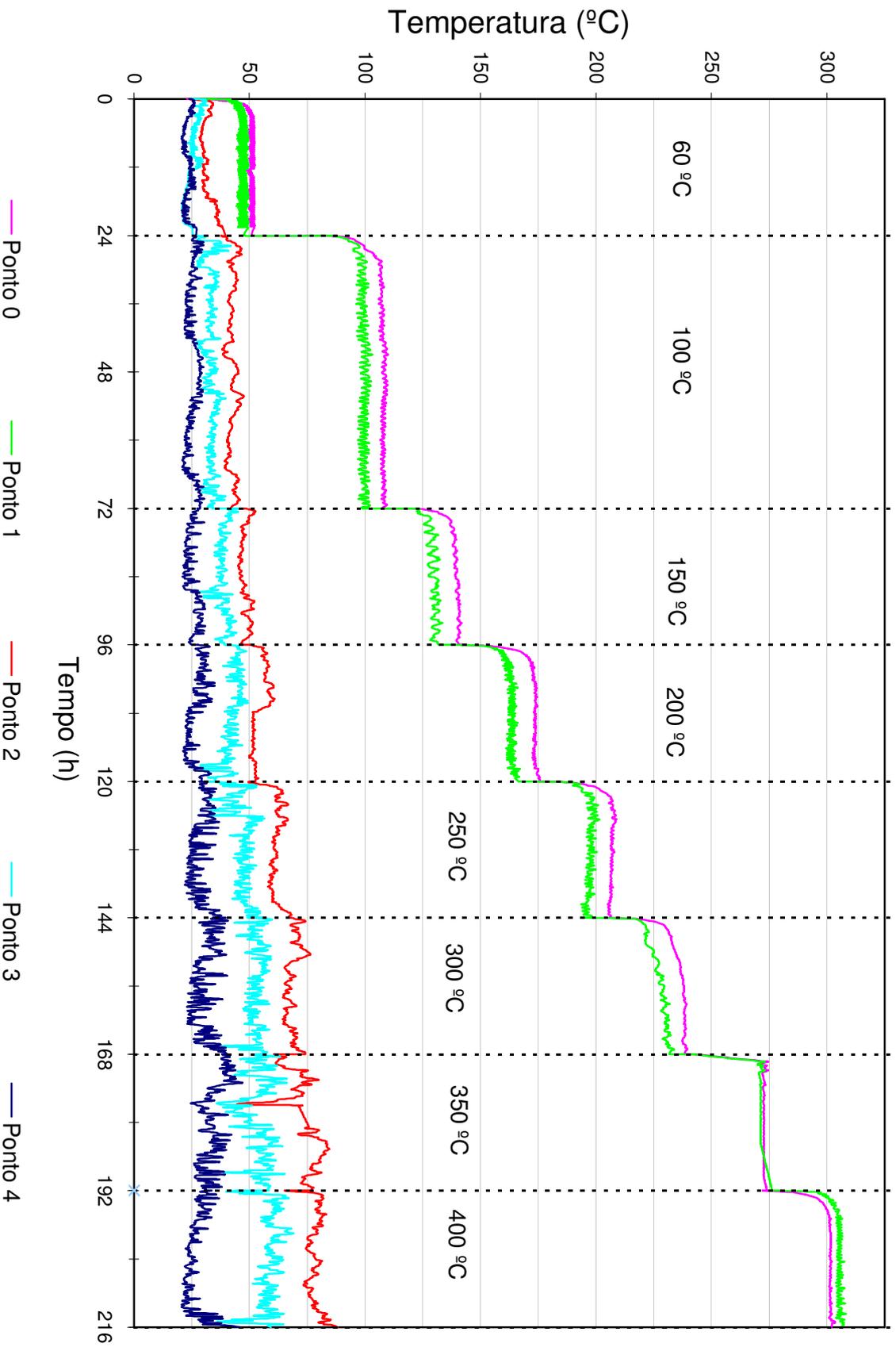


Figura 66 - Ensaio 03, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento

O comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento desse ensaio foi semelhante ao do ensaio 02. Observa-se que os pontos 0 e 1, apresentam um comportamento semelhante, embora tenham uma pequena defasagem entre si, conforme se verifica na Figura 66. Esses pontos de monitoramento estão localizados a uma mesma altura, que tinha a finalidade de avaliar a distribuição de temperatura no interior da bancada de ensaio. Conforme é observado, esses pontos não atingem a temperatura programada do mini cobertor térmico.

A Figura 67 mostra a placa em concreto durante o aquecimento de 150°C. Observe nesta Figura que ocorre um desprendimento da capa de óleo da placa em concreto. O material de coloração clara que aparece sobre a capa de óleo, aparenta ser o mesmo material fino que se encontrou ao fim dos ensaios 2 e 3.



Figura 67– Ensaio 03, placa em concreto a 150°C.

O processo de transmissão de calor nesse sistema se dá por condução térmica. Visto o ar não ser um bom condutor de calor, é razoável que esse seja o possível motivo de não se atingir as temperaturas programadas no cobertor térmico. A placa ocupa pouco espaço do tanque refratário, conforme visto na Figura 65, fazendo com que o calor se propague pelo ar.

O termopar do ponto 2, localizado a 5cm externamente ao cobertor térmico, é influenciado pela propagação de calor do mini cobertor térmico. Observa-se na Figura 66 o aumento da temperatura desse ponto à medida que aumenta a temperatura do cobertor térmico.

O ponto 3, localizado a 5cm da câmara de carbono ativado, sofre influência do cobertor, visto ter apresentado temperaturas superiores ao ponto 4 que estava oscilando em torno da temperatura ambiente.

O ponto 4, posicionado a 25cm do cobertor térmico, apresenta comportamento semelhante ao ensaio 02, com pequenas variações de temperatura ao longo de todo ensaio. As temperaturas registradas oscilam em torno da temperatura ambiente, com alguns picos causados provavelmente pelas emissões gasosas que escapam da bancada de ensaio conforme foi explicado no ensaio 02.

A Figura 68 mostra a placa durante o aquecimento de 250°C. Observa-se uma maior quantidade do material de coloração clara sobre a placa.



Figura 68 - Ensaio 03, placa em concreto a 250°C.

As Figuras 69, 70 e 71, apresentam a placa de concreto em diversas vistas após o tratamento.



Figura 69 - Ensaio 03, placa em concreto depois de tratada (vista superior).



Figura 70 -Ensaio 03, placa em concreto depois de tratada (vista inferior).



Figura 71 -Ensaio 03, placa em concreto depois de tratada (vista lateral).

Ao término do ensaio verifica-se que não existia mais presença de óleo sobre a placa em concreto, restando apenas um material pulverulento semelhante ao encontrado nos ensaios 01 e 02.

A placa em concreto após o tratamento foi retirada do tanque em tijolo refratário e, com auxílio de uma escova, coletou-se o material fino sobre a placa para análises.

O consumo total de energia medido para a realização desse ensaio foi de 189kW.h. Este consumo representaria um custo energético de R\$ 55,25, tomando como base o valor do kW.h cobrado pela LIGHT no mês de março de 2004.

4.5.3. Análise mineralógica por difração de raios-x

A técnica de difração de raios-x foi aqui utilizada para identificar o resíduo sobre a placa em concreto após o processo de tratamento. Com o propósito comparativo, também se analisou o material constituinte da placa em concreto.

A Figura 72 apresenta uma foto do material constituinte da placa após o processo de maceração. Observa-se a inexistência de óleo neste material, cuja cor é característica de um concreto. O difratograma desta amostra está apresentado na Figura 73. Destacam-se os picos de feldspato (F), mica (M), caulinita (C) e quartzo (Q).



Figura 72 – Ensaio 03, placa em concreto macerada.

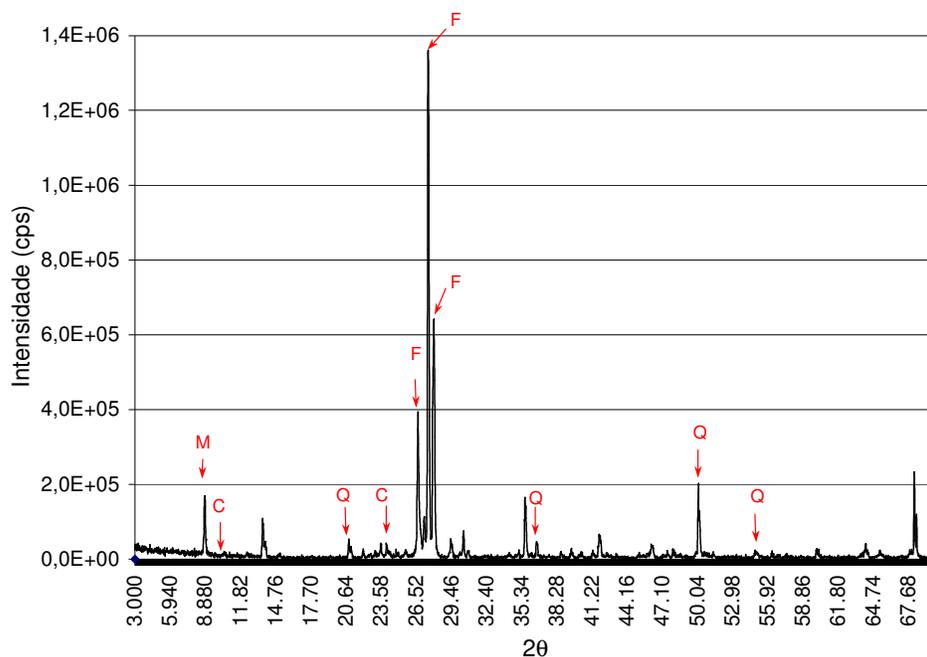


Figura 73 – Difratoograma de raios-x do macerado da placa em concreto.

A Figura 74 apresenta uma foto do resíduo que ficou sobre a placa de concreto após o tratamento. Observa-se a inexistência de óleo e uma coloração típica de um material rico em óxidos de ferro. O difratograma apresentado na Figura 75 apresenta picos de caulinita (C), quartzo (Q) e feldspato. Ressalta-se neste difratograma a inexistência do pico associado à presença de mica. Além disso, percebe-se que a intensidade dos picos associados a caulinita são bem mais pronunciados do que os vistos na Figura 73. Estas duas observações levam a duas hipóteses: 1) os materiais não são idênticos e 2) há uma presença de caulinita no resíduo. Estas hipóteses, associadas a coloração do resíduo, sugerem que o material foi transportado, provavelmente pelo vento.



Figura 74 – Ensaio 03, resíduo sobre a placa em concreto.

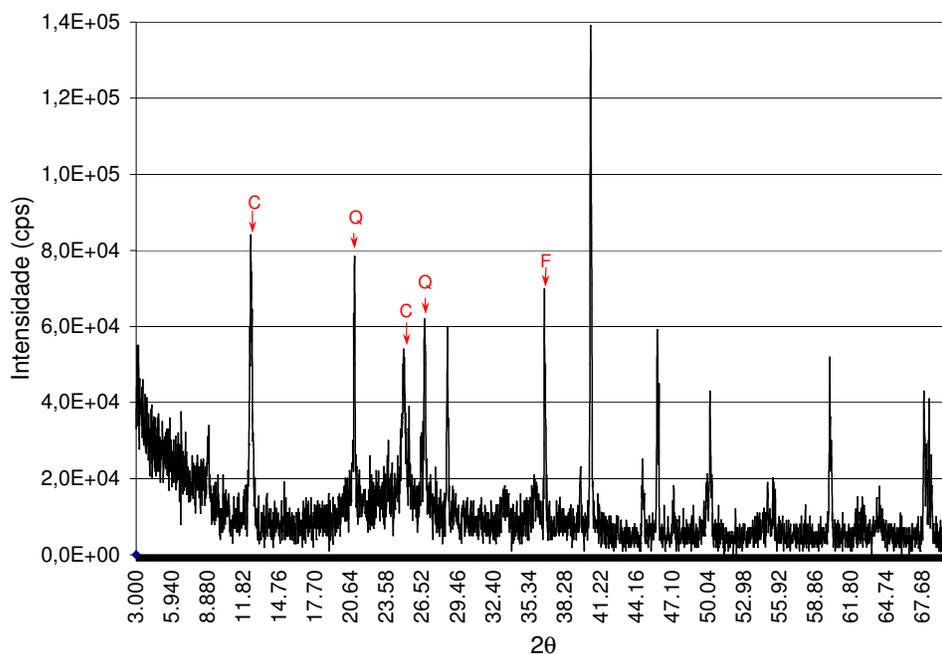


Figura 75 – Difratograma de raios-x do resíduo sobre a placa em concreto.

4.5.4. Análise química por fluorescência de raios-x

Foram feitas análises química por fluorescência de raios-x no resíduo sobre a placa em concreto e no macerado da placa em concreto tratada. A Tabela 25 apresenta os resultados.

Tabela 25 – Ensaio 03, fluorescência de raios-x

Resíduo sobre da placa		Macerado da Placa	
Oxido	%	Oxido	%
SiO ₂	52,190	SiO ₂	47,144
Al ₂ O ₃	41,971	Al ₂ O ₃	23,991
Fe ₂ O ₃	3,821	CaO	20,274
Cão	0,736	K ₂ O	4,107
K ₂ O	0,479	Fe ₂ O ₃	3,345
TiO ₂	0,295	TiO ₂	0,512
S	0,284	S	0,216
V ₂ O ₅	0,097	MnO	0,134
MnO	0,038	ZrO ₂	0,069

Tabela 25 (continuação) – Ensaio 03, fluorescência de raios-x

Resíduo sobre da placa		Macerado da Placa	
Oxido	%	Oxido	%
ZrO ₂	0,025	SrO	0,052
Sc ₂ O ₃	0,023	V ₂ O ₅	0,051
ZnO	0,022	ZnO	0,036
SrO	0,008	Ga ₂ O ₃	0,024
		Rb ₂ O ₃	0,022
		Y ₂ O ₃	0,012

Os resultados para o resíduo sobre a placa apresentam, semelhantemente a análise de fluorescência de raios-x no resíduo sobre a brita no ensaio 02, a presença de altos valores de Al₂O₃, que por analogia ao difratograma desse material, podem indicar que esse óxido esteja associado aos picos de caulinita. Ainda por analogia, encontra-se no difratograma do resíduo sobre a brita picos de feldspato e mica, esses minerais têm em sua constituição ferro, alumínio, potássio e silício, todos estes elementos foram identificados na análise de fluorescência desse material.

Os altos valores de SiO₂ encontrado no macerado da placa em concreto pode está associado ao quartzo, presente na areia e na brita que são materiais constituintes e abundantes do concreto. A presença do quartzo pode ser confirmada pelos picos encontrados no difratograma desse material. Os elevados teores de CaO, no macerado da placa em concreto, evidencia a presença de um constituinte do cimento, utilizado na confecção do concreto.

4.5.5. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais

Nas análises de hidrocarbonetos de petróleo totais (TPH) foi usada a mesma curva de calibração do ensaio 02.

O resultado de TPH encontrado para o resíduo sobre a placa em concreto foi inferior ao limite de detecção do aparelho, *i.e.* 11,43mg/L.

Para o macerado da placa em concreto foi determinado um valor de TPH igual a 16mg/L. Calculando a massa de hidrocarbonetos presentes da amostra do macerado da placa temos:

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

$X = 0,4\text{mg}$ (massa presente no volume da solução)

A amostra do macerado da placa a qual foi extraída para análise pesava 2,5054g.

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

$$TPH = \frac{0,4\text{mg}}{2,5054 \times 10^{-3} \text{ kg}(\text{solo})} = 159,65\text{mg} / \text{kg} = 159,65 \text{ ppm} \quad (17)$$

O valor de TPH igual a 159,65ppm está abaixo do valor de intervenção da lista holandesa (CETESB, 2001). De acordo com a lista holandesa o limite de TPH para intervenção em solos contaminados por hidrocarbonetos é de 5000ppm.

O valor de intervenção é que indica um nível de qualidade do solo e água, acima do qual existem riscos para a saúde humana e para o ambiente. A ultrapassagem desse valor em um volume de solo de 25m³ ou em 100m³ de água subterrânea, indica a necessidade de implementação na área avaliada de ações voltadas para a sua remediação (CETESB, *op. cit.*).

4.5.6. Resistência do concreto submetido a altas temperaturas

Visto a possibilidade da utilização dessa técnica de descontaminação para a limpeza de pisos em concreto contaminados, foi questionada a perda de resistência desse material quando submetidos às altas temperaturas utilizadas no processo de dessorção térmica. Não foram encontrados na literatura artigos referentes à perda de resistência do concreto submetidos ao aquecimento da forma que é aplicado na técnica de dessorção térmica. Por outro lado, há uma série de artigos que correlacionam a perda de resistência do concreto com o acréscimo de temperatura (CHAN *et. al.* 2000; VELASCO, 2003).

Neste sentido, foi então realizado um ensaio a fim de avaliar a perda de resistência do concreto submetido ao aquecimento semelhante ao ocorrido no processo de dessorção térmica.

O ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos com 10cm de diâmetro por 20cm de altura, vistos na Figura 76. Utilizou-se para o aquecimento o mini sistema de

dessorção térmica. O traço do concreto dos corpos de prova foi calculado para uma resistência de 25000kPa pelo método do ACI, *American Concret Institute*, conforme descrito por Metha (1994).



Figura 76 – Corpos de prova em concreto (10x20cm).

Seguindo o mesmo procedimento de execução de um ensaio de dessorção térmica, foram aquecidos os corpos de provas, e rompidos ao chegarem a temperatura de 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C.

A Figura 77 mostra os corpos de prova sobre o suporte em ferro dentro do tanque em tijolo refratário, prontos para serem aquecidos.

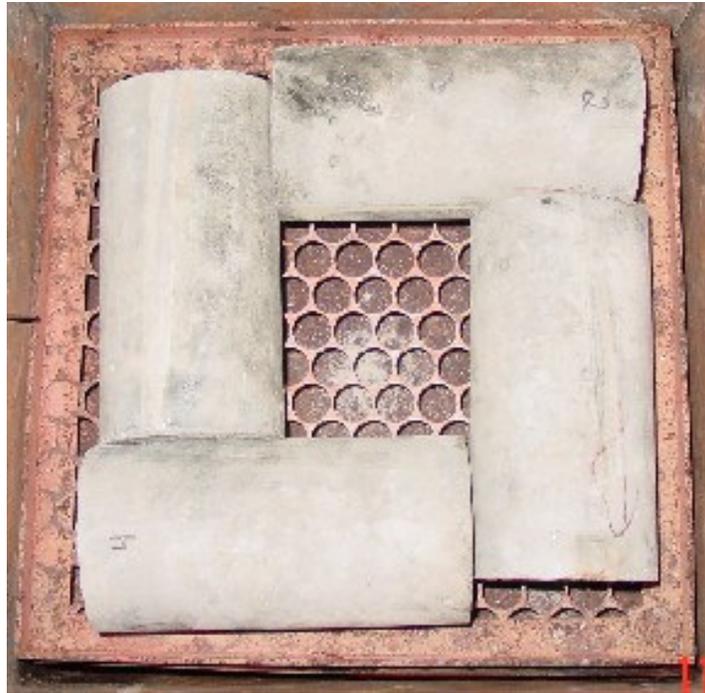


Figura 77 – Corpos de prova sobre suporte no tanque refratário

Sempre se rompiam 2 corpos de prova de mesma idade e submetidos ao mesmo aquecimento. A perda de resistência foi considerada como sendo a média das resistências encontradas para esses corpos de prova. O cálculo da perda de resistência foi referente a um corpo de prova de mesma idade que não foi submetido ao aquecimento.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados das resistências dos corpos de provas rompidos, bem como, a perda de resistência associada aos corpos de prova que foram submetidos ao aquecimento.

Na Figura 78 é apresentado um esquema demonstrando a perda de resistência com a temperatura para os corpos de provas ensaiados.

Tabela 26 – Verificação da perda de resistência de concreto submetidos a altas temperaturas.

Corpo de prova	Temperatura atingida	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	perda de resistência (%)	Idade no rompimento (dias)
1	Ambiente	24,81	-	-	34
2	200°C	21,39	23,10	6,89	34
3	200°C	24,81			
4	250°C	20,88	22,15	10,72	36
5	250°C	23,43			
6	Ambiente	33,01	-	-	42
7	300°C	23,43	23,30	29,41	42
8	300°C	23,18			
9	350°C	16,71	18,92	42,68	44
10	350°C	21,14			
11	Ambiente	33,62	-	-	52
12	400°C	18,34	19,46	42,11	52
13	400°C	20,58			
14	450°C	11,72	12,22	63,65	54
15	450°C	12,73			
16	Ambiente	32,85	-	-	64
17	500°C	17,83	17,70	46,11	64
18	500°C	17,57			
19	550°C	13,65	12,73	61,24	66
20	550°C	11,82			

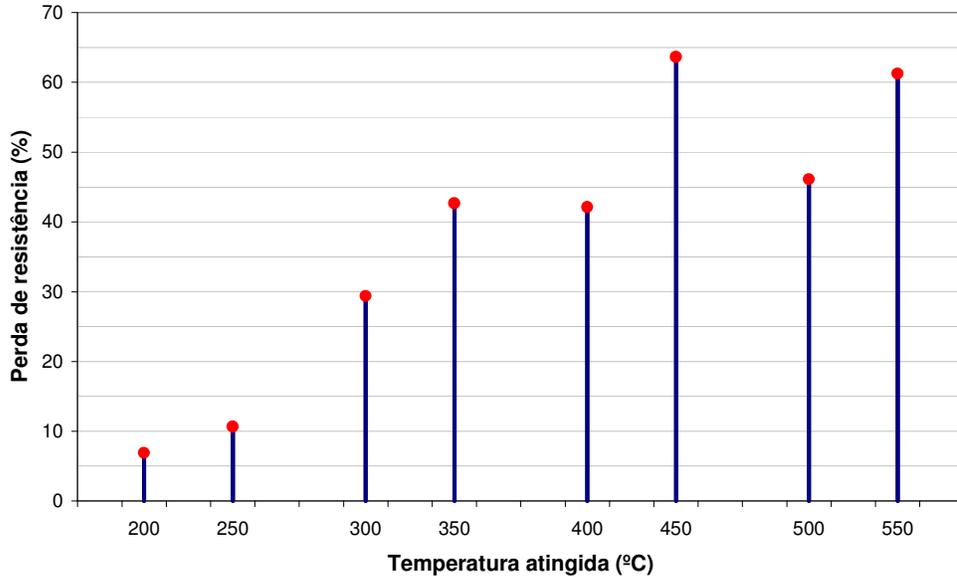


Figura 78 - % de perda de resistência para corpos de prova em concreto submetidos a altas temperaturas.

A perda de resistência observada é elevada, atingindo 63,65% a 450°C. Essa perda de resistência ocorre devido ao rompimento do material cimentante do concreto. O concreto, por ser composto por materiais heterogêneos (brita, areia e cimento), cada qual com coeficientes de dilatação distintos, sofre uma dilatação diferencial quando submetido a um processo de aquecimento. A elevação da temperatura rompe o material cimentante que liga o agregado graúdo ao miúdo e com isto reduz a resistência do material como um todo. Quanto mais alto e prolongado for o aquecimento, maior a deformação e maior a dilatação, conseqüentemente maior a perda de resistência.