



Patrício José Moreira Pires

**Desenvolvimento de um Sistema de Dessorção Térmica
In Situ para Remediação de Materiais Contaminados por
Hidrocarbonetos de Petróleo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro

Maio de 2004



Patrício José Moreira Pires

**Desenvolvimento de um Sistema de Dessorção Térmica
In Situ para Remediação de Materiais Contaminados por
Hidrocarbonetos de Petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão
Examinadora abaixo assinada.

José Tavares Araruna Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Tácio Mauro Perreira de Campos

Departamento de Química – PUC-Rio

Maria Isabel Paes da Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Ana Paula Lougon Duarte

Universidade Federal Fluminense – UFF

Eng. Carlos António M. dos Santos

REDUC / Petrobrás

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de Maio de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Patrício José Moreira Pires

Engenheiro Civil formado pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB – em Maio de 2002.

Ficha Catalográfica

Pires, Patrício José Moreira

Desenvolvimento de um Sistema de Dessorção Térmica *In Situ* para Remediação de Materiais Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo . Patrício José Moreira Pires; orientador: José Tavares Araruna Júnior - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

v. , [20] 189 f. :il ;29.7 cm.

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Dessorção Térmica. 3. Remediação. 4. Cobertor Térmico. 5 Hidrocarbonetos de Petróleo. I Araruna, José Tavares II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título

A meus sobrinhos, Camilla, Tito Lívio e Gabriella, as figurinhas mais divertidas que conheço. E em especial a meu sobrinho Ciro José, a mais nova alegria de minha família.

Aos meus queridos pais, Pola (*in memoriam*) e Terezinha, maiores incentivadores desse trabalho. A eles todo o meu amor, respeito e minha eterna gratidão.

Agradecimentos

Antes de mais nada, quero agradecer a Deus, por estar sempre a meu lado a iluminar o meu caminho.

Ao Professor Araruna pela excelente orientação deste trabalho, por sua paciência e dedicação.

A professora Maria Isabel Paes e Henrique, pela valiosa ajuda nas análises químicas realizadas.

A Refinaria Duque de Caxias, pelo fornecimento das amostras indispensáveis para realização dos ensaios, em especial ao Engenheiro Carlos Antonio M. Santos.

Aos professores, Tácio, Franklin, Vargas, Cláudio Amaral, Fontoura, Romanel, e Sayão pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso de mestrado.

Ao professor Giuseppe e os funcionários do laboratório de estruturas, pela amizade e ajuda na confecção da calha em concreto.

A professora Roberta Ziolli e a Wilson, pela ajuda nas análises de determinação de TPH.

A Grace Mary, por sua competência e ajuda, com respeito a relatórios e bolsas da ANP.

Aos companheiros do Laboratório de Geotecnia, Willian, “Seu” José, Josué e Amaury, pela essencial ajuda no desenvolvimento desse trabalho.

A Vitor Hugo, pela ajuda na montagem dos controladores de temperatura.

A Mariana Nogueira pelo fornecimento da Manta Asfáltica.

Aos companheiros do apartamento 202 nos Oitis, Laerte, Julio, Aldo, Zé Roberto e o Rato, pelos bons momentos de descontração vividos e que muitas vezes terminavam no BG.

Aos amigos de pós graduação, Ana Paula, Ciro (mental), Ataliba, Bello, Janaina, Fernando, Zé Roberto, Mônica, Jorge, Flávio, Renato, Hugo, Leandro (Bob Esponja), Patrícia e Gisele, pelos papos e amizade. Em especial a Rafael e Ricardo (Playboy), pelas longas horas de estudo em grupo e por tê-los como amigos e a Juliana por sua indispensável amizade e por sua companhia tão agradável.

Aos companheiros , Aellington, Joabson e Leonardo Andrade, pela excelente convivência e pela indispensável amizade.

Aos amigos distantes, nem por isso esquecidos, Airton, Wibergson, Aroldo, Messias, Reno, Luis, Uraíto, Júnior, Atenágoras, Erika e Carlangelo, pelos muitos anos de amizade.

A Carolina Macedo, pelos bons momentos juntos.

Ao tio Assis e dona Carmem, minha família no Rio, pela excelente acolhida em sua casa.

A minha irmã Lisieux, aos meus irmãos, Ranieri e Romero, as minhas cunhadas, Lêda e Bemare, a meu cunhado Tito e a Dé, que mesmos distantes sempre se fizeram presentes nesses anos fora de casa.

A ANP, PRONEX e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Resumo

Pires, Patrício José Moreira; Araruna, José Tavares. **Desenvolvimento de um Sistema de Dessorção Térmica *In Situ* para Remediação de Materiais Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2004. 190p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho avaliou a eficácia da dessorção térmica *in situ* em remediar materiais contaminados por hidrocarbonetos de petróleo em refinarias. Paralelamente, foi projetado e construído um novo sistema modular para ser empregado sob dutovias para remediação de britas contaminadas.

Os resultados do programa experimental revelaram ser possível a remediação de pavimentos de concreto contaminados por óleo combustível. A aplicação de calor na superfície do pavimento reduziu em até 65% a sua resistência, porém propiciou a restauração de sua cor original. Verificou-se que os resíduos do processo, após análises mineralógicas por difração de raios X e químicas por espectroscopia de fluorescência, apresentavam uma composição muito semelhante ao solo empregado como material de construção dos aterros da refinaria, sugerindo que o resíduo possa ser advindo de transporte eólico.

O sistema desenvolvido no presente trabalho apresentou um desempenho satisfatório. Verificou-se a necessidade de aeração do material remediado para eliminar a produção de coque. Adicionalmente, observou-se a importância de um bom isolamento térmico para minimizar o consumo energético e impedir a propagação de calor e das emissões para a atmosfera.

As emissões geradas pelo aquecimento consistiam de olefinas e parafinas que podem ser devidamente tratadas pelo oxidador térmico.

Palavras-chave

Dessorção Térmica *in situ*; Remediação; Cobertor térmico; hidrocarbonetos de petróleo.

Abstract

Pires, Patrício José Moreira Pires; Araruna, José Tavares (Advisor). **Development of an In Situ Thermal Desorption System for the Remediation of Petroleum Hidrocarbon Contaminated Materials.** Rio de Janeiro, 2004. 190p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation assessed the adequacy of *in situ* thermal desorption (istd) in cleaning oil contaminated debris from Refineries. A new modulated istd system was designed and built in order to remediate oiled cobbles under pipeways.

The experimental results revealed the possibility of cleaning concrete pavements contaminated by heavy oil. The thermal desorption process restored their original color but reduced their resistance up to 65%. It was observed that the resulting debris, after mineralogical analyses by X-ray diffraction and chemical analysis by X-Ray fluorescence, have a similar composition to the soil employed in the fills throughout the Refinery, indicating that the debris could well have been transported by the wind.

The system devised here had a satisfactory performance. It was observed the necessity of aeration during the treatment in order to avoid the production of coke. Additionally, it was also observed the importance of a good thermal insulation in order to minimize power consumption and the propagation of heat and gas emissions to the atmosphere.

The gases emissions consisted mainly of olefins and paraffins that had been reasonably been treated by the thermal oxidizer devised herein.

Keywords

In situ Thermal Desorption; Remediation; Thermal blanket; Petroleum hydrocarbons.

Sumário

1 Introdução	21
1.1. Justificativa e Objetivo	24
1.2. Organização da dissertação	24
2 Revisão bibliográfica	26
2.1. Do processo térmico de remediação e a escolha da técnica de mais adequada de descontaminação	26
2.2. A técnica de dessorção térmica e suas aplicações	28
2.3. Vantagens do uso da dessorção térmica in situ (DTIS)	36
2.4. Comportamento do fluxo de fluido e calor no processo de dessorção	39
2.5. Sistema de dessorção térmica e tratamento de gases	45
3 Desenvolvimento de um novo protótipo de dessorção térmica in situ	52
3.1. Características desejáveis	52
3.2. Equipamentos projetados, desenvolvidos e materiais especiais utilizados no NPTIS	53
3.2.1. Calha em concreto	54
3.2.2. Cobertor térmico	58
3.2.3. Isolante térmico	63
3.2.4. Manta asfáltica	66
3.2.5. Controlador de temperatura	68
3.2.6. Câmara de carvão ativado e bomba a vácuo	72
3.2.7. Oxidador térmico	75
3.2.8. Sistema de monitoramento e aquisição de dados	79
4 Avaliação da técnica de dessorção térmica	81
4.1. Considerações iniciais	81
4.2. Descrição do mini-sistema de dessorção térmica (MSDT)	82
4.2.1. Mini cobertor térmico	82
4.2.2. Controlador de temperatura	83
4.2.3. Tanque em tijolo refratário	84
4.2.4. Sistema de monitoramento e aquisição de dados	85
4.3. Ensaio 01 – Uso do MSDT na remediação de britas contaminadas com óleo	

	85
4.3.1. Metodologia do ensaio.	85
4.3.2. Monitoramento da temperatura e do consumo de energia	86
4.4. Ensaio 02 – Uso do MSDT na remediação de britas contaminadas com óleo	91
4.4.1. Metodologia do ensaio	92
4.4.2. Monitoramento da temperatura e consumo de energia	94
4.4.3. Análise mineralógica por difração de raio-X	102
4.4.4. Análise química por fluorescência de raio-X	105
4.4.5. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais	106
4.5. Ensaio 03 – Uso do MSDT na remediação de placas em concreto contaminadas com óleo combustível	110
4.5.1. Metodologia do ensaio	111
4.5.2. Monitoramento da temperatura e do consumo de energia	112
4.5.3. Análise mineralógica por difração de raio-X	118
4.5.4. Análise química por fluorescência de raio-X	120
4.5.5. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais	121
4.5.6. Resistência do concreto submetido a altas temperaturas	122
5 Novo protótipo de dessorção térmica in situ	127
5.1. Considerações iniciais	127
5.2. Ensaio 01 - PDTIS	127
5.2.1. Metodologia do ensaio	128
5.2.2. Monitoramento da temperatura e do consumo de energia	133
5.2.3. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais	139
5.3. Ensaio 02 - PDTIS	143
5.3.1. Metodologia do ensaio	143
5.3.2. Monitoramento da temperatura e do consumo de energia	145
5.3.3. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais	150
5.4. Ensaio 03 - PDTIS	152
5.4.1. Metodologia do ensaio	152
5.4.2. Monitoramento da temperatura e do consumo de energia	155
5.4.3. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais	161
5.4.4. Cromatografia gasosa	162
5.5. Ensaio 04 – Oxidador térmico (OXT)	164
5.6. Ensaio 05 - PDTIS	166

5.6.1. Metodologia do ensaio	166
5.6.2. Monitoramento da temperatura e do consumo de energia	168
5.6.3. TPH – Hidrocarbonetos de petróleo totais	174
5.6.4. Cromatografia gasosa	176

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros **179**

6.1. Conclusões	179
6.1.1. Sugestões para trabalhos futuros	180

Referências Bibliográficas **182**

Apêndice A - Programação do controlador de temperatura Incon CNT-110

	185
A.1. Apresentação	185
A.2. Parâmetros de programação do controlador	186
A.3. Programação para realização de um ensaio de dessorção térmica.	187
A.4. Ciclo de operação	189

Lista de figuras

Figura 1 – Controle das concentrações iniciais de PCB, Vinegar et al. (1997).	34
Figura 2 – Cobertor térmico e bastonetes térmicos, TerraTherm (2004).	35
Figura 3 – Esquema do fluxo de calor que atravessa um material	42
Figura 4 – Esquema do sistema de dessorção térmica in situ, Terratherm.	47
Figura 5 – Detalhes do cobertor térmico.	47
Figura 6 – Fluxo de ar provocado pelo bombeamento a vácuo.	48
Figura 7 – A química do tratamento, oxidação. (TerraTherm,1999)	49
Figura 8 – Esquema do novo sistema de dessorção térmica a ser desenvolvido.	52
Figura 9 - Perspectiva de calha em concreto (desenho não está em escala).	54
Figura 10 – Distribuição transversal da armadura da calha em concreto	55
Figura 11 - Forma e armadura da calha.	55
Figura 12 – Detalhe da armadura e forma da calha.	56
Figura 13 – Calha concretada.	56
Figura 14 - Calha em concreto.	57
Figura 15 – Esqueleto do cobertor térmico com os perfis em “L”, vista em planta.	59
Figura 16 – Esqueleto do cobertor térmico com os perfis em L e a tela tipo moeda.	59
Figura 17 – Cobertor térmico (grade, tela e resistência).	60
Figura 18 - Cobertor térmico (grade, tela e resistência), corte lateral.	60
Figura 19 – Detalhe inferior da estrutura do cobertor térmico.	61
Figura 20 – Estrutura metálica do cobertor térmico	61
Figura 21 – Vista inferior do cobertor térmico	62
Figura 22 – Detalhe das resistências e isolantes refratários do cobertor térmico.	62
Figura 23 – Fibra cerâmica.	63
Figura 24 – Condutividade térmica de mantas de fibra cerâmica, FiberFrax (2003).	64
Figura 25 – Manta asfáltica de 4mm, com uma face revestida com alumínio.	66
Figura 26 – Manta asfáltica, após utilizada em alguns ensaio	67
Figura 27 – Controlador de temperatura, Incon CNT 110.	68

Figura 28 – Controlador de potência, série mini, bifásico até 40A, vista superior.	70
Figura 29 – Controlador de potência, série mini, bifásico até 40A, vista lateral.	70
Figura 30 – Detalhe da chave e do controlador de temperatura.	71
Figura 31 – Câmara de carvão ativado.	72
Figura 32 – Câmara e tampa.	72
Figura 33 – Câmara de carvão ativado adaptado para amostragem de gases.	73
Figura 34 – Bomba a vácuo.	74
Figura 35 – Aquecedor (tubo em alumina revestido com resistência).	74
Figura 36 – Detalhe do aquecedor.	75
Figura 37 - Aquecedor revestido com fibra cerâmica fixada com fita de amianto (frente).	75
Figura 38 - Aquecedor revestido com fibra cerâmica fixada com fita de amianto (lateral).	76
Figura 39 – Oxidador térmico (vista da alimentação)	76
Figura 40 – Oxidador térmico (lado do termopar)	77
Figura 41 – Controlador de temperatura do oxidador térmico.	78
Figura 42 – Termopares tipo k do data logger.	78
Figura 43 - Data logger	79
Figura 44 – Janela do AMR-Control.	79
Figura 45 – Mini cobertor térmico	82
Figura 46 – Diagrama esquemático do mini cobertor térmico (adaptado de Portes, 2002)	82
Figura 47 – Controlador de temperatura do mini-sistema de dessorção térmica	83
Figura 48 – Ensaio 01, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.	87
Figura 49 – Suporte para colocação de material contaminado no tanque refratário	93
Figura 50 – Ensaio 02, britas contaminadas por óleo	94
Figura 51– Ensaio 02, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.	97
Figura 52 – Ensaio 02, brita a 100º C.	98
Figura 53 - Ensaio 02, brita a 200º C.	98
Figura 54 - Ensaio 02, brita a 300º C.	99
Figura 55 - Ensaio 02, brita ao término do ensaio.	100
Figura 56 – Ensaio 02, britas lavadas para retirada do material fino	100
Figura 57 – Ensaio 02, brita macerada.	103

Figura 58 – Difratoograma de raio-X do macerado da brita.	104
Figura 59 – Ensaio 02, resíduo sobre a brita.	104
Figura 60 - Difratoograma de raio-X do resíduo sobre a brita.	105
Figura 61 – TOG/TPH Analyzer.	107
Figura 62 – Calibração do TOG/TPH	108
Figura 63 – Faixa linear do TOG/TPH	109
Figura 64 – Ensaio 03, placa em concreto contaminadas por óleo	110
Figura 65 – Ensaio 03, placa em concreto contaminada, preparação do ensaio.	111
Figura 66 - Ensaio 03, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento	114
Figura 67– Ensaio 03, placa em concreto a 150° C.	115
Figura 68 - Ensaio 03, placa em concreto a 250° C.	116
Figura 69 - Ensaio 03, placa em concreto depois de tratada (vista superior).	117
Figura 70 -Ensaio 03, placa em concreto depois de tratada (vista inferior).	117
Figura 71 -Ensaio 03, placa em concreto depois de tratada (vista lateral).	117
Figura 72 – Ensaio 03, placa em concreto macerada.	118
Figura 73 – Difratoograma de raio-X do macerado da placa em concreto.	119
Figura 74 – Ensaio 03, resíduo sobre a placa em concreto.	119
Figura 75 – Difratoograma de raio-X do resíduo sobre a placa em concreto.	120
Figura 76 – Corpos de prova em concreto (10x20cm).	123
Figura 77 – Corpos de prova sobre suporte no tanque refratário	124
Figura 78 - % de perda de resistência para corpos de prova em concreto submetidos a altas temperaturas.	126
Figura 79 – Ensaio 01 - PDTIS , pesagem das britas contaminadas	128
Figura 80 – Ensaio 01 - PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto.	129
Figura 81 - Ensaio 01 - PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto, vista lateral.	129
Figura 82 – Ensaio 01 - PDTIS , cobertor térmico apoiado sobre vergalhões dentro da calha em concreto.	130
Figura 83 – Ensaio 01 - PDTIS, colocação da fibra cerâmica.	130
Figura 84 – Ensaio 01 - PDTIS, detalhe de cantoneiras e cabos de aço para fixação da manta asfáltica	131
Figura 85 – Ensaio 01 - PDTIS , termopares	132
Figura 86 – Ensaio 01 - PDTIS, bancada de ensaio montada.	133

Figura 87 - Ensaio 01 - PDTIS, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento	135
Figura 88 – Ensaio 01 - PDTIS, cabo desconectado do cobertor térmico	137
Figura 89 – Ensaio 01 - PDTIS, óleo endurecido sobre as britas	137
Figura 90 - Ensaio 01 - PDTIS, fim do ensaio.	138
Figura 91 – Ensaio 01 - PDTIS, brita macerada impregnada com coque após o aquecimento.	140
Figura 92 – Ensaio 01 - PDTIS, coque impregnado as britas após o aquecimento.	141
Figura 93 – Ensaio 02 - PDTIS, britas contaminadas dentro da calha em concreto.	143
Figura 94 – Ensaio 02 - PDTIS, termopares.	144
Figura 95 - Ensaio 02 - PDTIS, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.	147
Figura 96 – Ensaio 02 - PDTIS, britas após o processo de dessorção térmica.	149
Figura 97 – Ensaio 02 - PDTIS, detalhe de britas contaminadas e após descontaminação.	150
Figura 98 – Ensaio 02 - PDTIS, brita macerada depois tratamento.	151
Figura 99 – Ensaio 02 - PDTIS – resíduo sobre a brita após a descontaminação.	151
Figura 100 – Ensaio 03 – PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto.	153
Figura 101 – Ensaio 03 – PDTIS, detalhe da fixação da manta asfáltica com parafuso.	153
Figura 102 – Ensaio 03 – PDTIS, bancada de ensaio.	154
Figura 103 - Ensaio 03 - PDTIS, comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.	157
Figura 104 – Ensaio 03 - PDTIS, britas após o processo de dessorção térmica.	159
Figura 105 – Ensaio 03 - PDTIS, detalhe de britas contaminadas e após descontaminação.	160
Figura 106 – Ensaio 03 - PDTIS , britas após o processo de dessorção térmica.	160
Figura 107 – Ensaio 03 -PDTIS, brita macerada depois do aquecimento.	161
Figura 108 – Ensaio 03 - PDTIS – resíduo sobre a brita após a descontaminação.	162
Figura 109 – Ensaio 04 – Esquema do teste com o oxidador térmico	164

Figura 110 – Ensaio 04 – teste do oxidador térmico	165
Figura 111 – Ensaio 05 - PDTIS , britas contaminadas dentro da calha em concreto.	166
Figura 112 – Ensaio 05 - PDTIS , bancada de ensaio montada.	168
Figura 113 - Ensaio 05 - PDTIS , comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento.	171
Figura 114 – Ensaio 05 - PDTIS , britas após o processo de dessorção térmica.	173
Figura 115 – Ensaio 05 - PDTIS , brita macerada depois do aquecimento.	174
Figura 116 – Ensaio 05 - PDTIS – Coque sobre a brita após o aquecimento.	175
Figura 117 – Ensaio 05 - PDTIS – resíduo sobre a brita onde não houve formação de coque.	176
Figura 118 – Painei frontal do controlador de temperatura Incon CNT-110	185

Lista de tabelas

Tabela 1 - Técnicas para Controle e Remediação de Áreas Contaminadas(Evans, 1991).	27
Tabela 2 - Propriedades de alguns químicos orgânicos encontrados em áreas contaminadas (Davis,1997).	30
Tabela 3 – Resumo das temperaturas versus profundidade, Stegemeier e Vinegar (1995)	35
Tabela 4 – Percentual de n-hexadecano removido e quantidade residual desse por camada de solo, Stegemeier e Vinegar (1995)	35
Tabela 5 – Locais onde foram aplicado a dessorção térmica (Baker e Kuhlman, 2002).	36
Tabela 6 – Comparativo de preços entre diferentes técnicas de remediação (Wood, 1997).	38
Tabela 7 - Propriedades Térmicas do Solo (adaptada de Mitchell, 1993).	42
Tabela 8 – Mecanismos de remoção dos contaminantes versus temperatura (Baker e Kuhlman, 2002).	47
Tabela 9 – Características do concreto da calha	54
Tabela 10 - Resistência à corrosão (NBR 6847/81)	58
Tabela 11 – Características das fibra cerâmicas (FiberFrax, 2003).	63
Tabela 12 – Características da manta asfáltica (Denver, 2004)	66
Tabela 13 – Características do controlador Incon CNT 110	68
Tabela 14 – Resumo dos ensaios realizados e análises desenvolvidas para cada ensaio.	80
Tabela 15 – Ensaio 01, temperaturas máximas e mínimas registradas.	86
Tabela 16 – Variações máximas das temperaturas ao longo do ensaio 01	89
Tabela 17 – Percentual de temperatura transmitida para os pontos 0, 1, 2, 3 e 4.	90
Tabela 18 - Pontos de ignição de combustíveis transportados em dutovias	91
Tabela 19 – Ensaio 2, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia	95
Tabela 20 – Desvios padrões nos pontos de medição de temperatura do ensaio 02.	100
Tabela 21 - Ensaio 02, temperatura transmitida do cobertor térmico para sua superfície externa	101

Tabela 22 – Ensaio 02, fluorescência de raio-X	104
Tabela 23 - Valores de adsorbância (sinal) e concentração de TPH	107
Tabela 24– Ensaio 3, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia.	112
Tabela 25 – Ensaio 03, fluorescência de raio-X	119
Tabela 26 – Verificação da perda de resistência de concreto submetidos a altas temperaturas.	124
Tabela 27 – Resumo dos ensaios realizados e análises desenvolvidas para ensaios com o PDTIS.	127
Tabela 28 - Ensaio 01 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia	134
Tabela 29 - Ensaio 02 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia.	146
Tabela 30 - Ensaio 03 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de	156
Tabela 31 - Ensaio 04 – PDTIS, resumo do monitoramento da temperatura e consumo de energia.	170
Tabela 32 – Concentração dos compostos	177
Tabela 33 – Ciclos de programação	186
Tabela 34 – Programação do controlador de temperatura.	189

Lista de símbolos e abreviaturas

CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
IPIECA	International Petroleum Industry Environmental Conservation Association
LIGTH	Companhia Fornecedora de Energia do Estado do Rio de Janeiro
MMA	Ministério do Meio Ambiente
OSDIR	Oil Spill Intelligence Report
USEPA	United States Environmental Protection Agency
PCBs	Bifenilas Policloradas
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
EPA	Environmental Protection Agency
TCE	Tricloroetileno
PCE	Tetracloroetileno
IR	Radiação infravermelha
TPH	Hidrocarbonetos de Petróleo Totais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CO	Monóxido de Carbono
CO2	Dióxido de Carbono
CH4	Metano
ppm	Partes Por Milhão
V	Volts
A	Ampere
W	Watts
C	Celsius
Q	Vazão
mg	Miligrama
L	Litro
mL	mililitro
kg	quilograma
k	Permeabilidade absoluta
k_r	Permeabilidade relativa
A	Área
p	Pressão
l	Comprimento

μ	Viscosidade
r_e	Raio externo
r_w	Raio do poço (bastonetes)
h	Comprimento do poço
λ	condutividade térmica
α	difusividade térmica
c	calor específico
ρ	densidade
S	constante de Stephan-Boltzmann
e	emissividade
f	fator de forma