



Priscila Bandeira de Albrecht Tapajós

**Estudo da Mobilidade e da Biodegradação de um Óleo
Mineral em Solos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Júnior
Co-orientadora: Patricia Österreicher-Cunha

Rio de Janeiro, abril de 2008



Priscila Bandeira de Albrecht Tapajós

**Estudo da Mobilidade e da Biodegradação de um Óleo
Mineral em Solos**

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

Eurípedes do Amaral Vargas Júnior
Orientador
PUC-Rio

Patricia Österreicher-Cunha
Co-orientadora
PUC-Rio

Franklin dos Santos Antunes
PUC-Rio

Maria Isabel Pais da Silva
PUC-Rio

Raquel Silva Peixoto
UFRJ

José Eugênio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de abril de 2008

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

Priscila Bandeira de Albrecht Tapajós

Graduou-se em Engenharia Civil com ênfases em Geotecnia e em Meio Ambiente, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio - em 2004. Foi bolsista da ANP de 2001 a 2003. Concluiu Cursos de Extensão em Direito Ambiental para Não Advogados (2002), Recuperação de Áreas Degradadas (2006) e Perícia Ambiental e suas Áreas de Atuação (2007) pela CCE/PUC-Rio. Apresentou trabalhos em congressos na área ambiental.

Ficha Catalográfica

Tapajós, Priscila Bandeira de Albrecht.

Estudo da mobilidade e da biodegradação de um óleo mineral em solos / Priscila Bandeira de Albrecht Tapajós; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Júnior; co-orientadora: Patricia Österreicher-Cunha, 2007.

205 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Mobilidade. 3. Biodegradação. 4. Óleo Mineral. 5. Solo arenoso inerte. 6. Solo residual indeformado. 7. Ensaio de coluna. I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Österreicher-Cunha, Patricia. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

À minha família com todo o meu amor...

Agradecimentos

À minha família por todo o amor. Por todo apoio e confiança, sempre. Pela enorme paciência e compreensão nos momentos mais difíceis. Muito obrigada por estarem ao meu lado em todos os momentos, compartilhando emoções e alegrias. Cada risada, cada lágrima, cada abraço apertado me deram forças para estar hoje escrevendo os agradecimentos desta dissertação. Muito obrigada pelas palavras sábias, pelo silêncio nas horas certas e por ouvir, ouvir e ouvir mais um pouquinho. Pela companhia e amizade. Por acreditarem em mim e fazerem com que eu queira ser uma pessoa melhor. Pelo incentivo aos estudos mas também ao esporte, a manifestações musicais e artísticas e à cultura. Vocês são minha inspiração, tenho um pedacinho de cada um de vocês no meu eu. Achei que seria fácil colocar em palavras os meus sentimentos de eterna gratidão por todo o sempre. Engano meu. Sem vocês eu não teria conseguido. Dinds tin mt!

Ao CNPq, ao PRONEX/CNPq e à PUC-Rio pelo apoio financeiro e pela paz dos ambientes de estudo e de um Campus “verde” e agradável.

Ao meu orientador, Eurípedes do Amaral Vargas Jr., pelo conhecimento transmitido e pela orientação.

À minha co-orientadora, Patricia Österreicher-Cunha, pelos ensinamentos transmitidos durante o desenvolvimento do trabalho e pela co-orientação.

Ao Professor Franklin dos Santos Antunes, por todo o carinho sempre. Pelo saber transmitido ao longo dos anos.

Ao Professor Tácio Mauro Pereira de Campos, pelo conhecimento transmitido na área experimental.

À Professora Denise Mano, pelos conhecimentos e momentos de descontração no laboratório.

À Professora Maria Isabel Pais, pela grande ajuda nas análises químicas e pela

disponibilidade.

Ao Professor Carlos Penna por me iniciar na área ambiental. Por transmitir uma visão de meio ambiente apaixonada.

À Professora Hedy Vasconcellos, por ajudar na construção da humanização da minha visão de meio ambiente.

Ao Tio Tato, por acompanhar com carinho a minha trajetória. Você é muito querido!

À Teresa, pela cantoria e pela amizade. Pela batata-frita mais gostosa e pela torcida.

Às amigas, Priscilla e Jermann, pelo carinho desde o colégio. Por crescermos e nos tornarmos mulheres com características diferentes e marcantes, mas nada mudar! A amizade cresce a cada dia e, gostos musicais e noturnos à parte, vocês são minhas grandes companheiras. Muito obrigada pela confiança e pelas longas conversas, essenciais para descontrair um pouquinho. Quero vocês bem pertinho, sempre!

Ao Roberto Corchito, por todos os “renegonas” me dando força para continuar! Você é um amigo muito especial. Muito obrigada pela enorme paciência comigo e pelo companheirismo.

Aos amigos, Jhoan e Leo, tão longe, mas sempre tão perto. Muito obrigada por estarem sempre dispostos a festejar. Pelo enorme carinho e pela companhia.

A meu grande amigo, Felipinho, pela amizade desde o início da faculdade. Pelos conselhos. Pela viola e cantoria!

Às meninas do laboratório, em especial à Thaís, Mônica, Taíse e Bernadete, pela amizade e pelo carinho. Por poder contar com todas vocês.

Ao Pará, pela amizade e carinho! Sempre muito bem-vindo na minha casa! Muito

obrigada pelos biscoitinhos de castanha-do-pará e pelos bombons de cupuaçu, querido!

Aos amigos “gringos” que tive a oportunidade de conhecer, maioria esmagadora de peruanos, muito obrigada por trazer ao Rio um pouquinho da cultura e da simpatia do seu povo.

A todos que entraram comigo no mestrado, por passarem comigo pela árdua tarefa de resistir à pressão das disciplinas e pelos momentos de descontração, afinal de contas, nós merecemos.

À Jô pelo carinho e pela amizade!

À Alê pelo alto-astral mineiro inconfundível e pela enorme simpatia!

À Geórgia, pela ajuda com as esferas de vidro e parte das análises de FDA.

À Rosana Garrido, por realizar a RMN das amostras de solo. Muito obrigada!

Ao pessoal da acrobacia, por compartilharem o ver o mundo sob outra “perspectiva”. Em especial à Natha e Lú pela grande amizade e pelo jeitinho especial de ser.

A todos os meus companheiros de interação máxima com a natureza e de radicalidade!

Ao pessoal do volley. Em especial à Nanda, amiga de todo o sempre. Te adoro, querida!

Ao Josué, por trazer música ao laboratório e especialmente pela cantoria! Muito obrigada pela disponibilidade e por toda a ajuda, sempre.

Ao Amaury, por toda a prestatividade. Pela companhia nas coletas de solo.

Ao Engenheiro William, pela atenção, conversas e palavras animadoras a cada

chegada ao laboratório.

Ao Sr. José, pela vontade de aprender e compartilhar conhecimentos. Pelas habilidades mecânicas.

Ao pessoal da Secretaria do DEC. Em especial à Rita pela prestatividade e ao Lenilson pelo carinho e simpatia, sempre!

Resumo

Tapajós, Priscila Bandeira de Albrecht; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral. **Estudo da Mobilidade e da Biodegradação de um Óleo Mineral em Solos**. Rio de Janeiro, 2008. 205p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A mobilidade dos hidrocarbonetos de petróleo e os processos de remediação aos quais estão sendo submetidos são de fundamental importância para o gerenciamento de áreas contaminadas. A biorremediação é uma tecnologia multidisciplinar, que envolve ciências como a microbiologia, a engenharia, a geologia e a química, baseada na habilidade dos microrganismos de utilizar o contaminante como fonte exclusiva de energia para o funcionamento de seu metabolismo. O estudo de solos residuais tropicais é de valiosa contribuição para a comunidade científica brasileira por serem encontrados poucos trabalhos na literatura a respeito do comportamento de contaminantes orgânicos nestes solos. O objetivo desta dissertação de mestrado foi estudar a mobilidade de um óleo mineral em um solo arenoso inerte e em um solo residual indeformado. Neste último, em se tratando de um solo microbiologicamente ativo, foram também analisadas a biodegradação do contaminante e a influência da temperatura na atividade degradadora e na descida do óleo. Os ensaios com o solo arenoso inerte, representado por esferas de vidro industrializadas, contaram com uma etapa inicial de testes no intuito de desenvolver as metodologias de adensamento, de saturação e de drenagem. A contaminação somente se deu após a delimitação do perfil dos ensaios. Com a finalidade de avaliar a mobilidade do contaminante na coluna de solo, após 24 horas foram realizadas as análises por extração e determinação gravimétrica de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) e a ressonância magnética nuclear (RMN) das amostras de solo de cada segmento. Os resultados obtidos mostraram que o contaminante migrou facilmente através da coluna de solo arenoso. Os ensaios com o solo residual consistiram na contaminação de colunas de solo indeformado pelo mesmo óleo utilizado nos ensaios com o solo inerte, sob duas condições distintas: sob a ação de refletores e em condições normais de temperatura. Foram realizadas análises químicas (TPH e RMN) e de atividade degradadora microbiana a cada 5cm, a fim de avaliar a influência dos

microorganismos do solo no processo de degradação do contaminante ao longo dos 157 dias de monitoramento. Os resultados obtidos indicaram que o óleo é susceptível aos processos de biodegradação pela microbiota nativa, mostrando uma relação direta entre a atividade degradadora dos microorganismos do solo e a queda na concentração de hidrocarbonetos de petróleo.

Palavras-chave

mobilidade; biodegradação; óleo mineral; solo arenoso inerte; solo residual indeformado; ensaios de coluna

Abstract

Tapajós, Priscila Bandeira de Albrecht; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral (Advisor). **Study of the mobility and biodegradation of a mineral oil in soils**. Rio de Janeiro, 2008. 205p. MSc. Thesis – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Petroleum hydrocarbons' mobility and remediation processes to which they are submitted are of great importance to the management of contaminated areas. The investigation of tropical residual soils is of valuable contribution to the scientific community, not only in Brazil but also across the world, once there is little research work concerning the behavior of organic contaminants in these soils. The main goal of the present thesis was to study the mobility of a mineral oil in sandy and tropical residual silty soils. Since the latter constitutes a microbiologically active soil, both the biodegradation processes of the contaminant and the influence of temperature on its mobility through the porous media and on the degrading activity of the microbial population inhabiting the soil have been evaluated. The experiments regarding the sandy idle soil, represented by perfect industrialized spheres, counted on a initial stage of tests, in order to develop the methodologies most adequate to a situation where the capillary fringe does not represent a considerable portion of the column's height. The contamination itself only took place after the outline of the whole experiment. With the purpose of analyzing the contaminant's mobility after 24 hours, every sample of soil from each different section of the column has been chemically and microbiologically analyzed. The results have shown that the mineral oil migrated easily through the porous media. The experiments making use of the tropical residual soil consisted on the contamination of soil columns through their top by the same mineral oil applied to the first experiment. However the experiment took place under two distinct conditions: under an increase of temperature (represented by the influence of reflectors) and under natural conditions of temperature. The bioremediation of soils contaminated by petroleum hydrocarbons is a multidisciplinary technology which involves sciences such as microbiology, engineering, geology and chemistry, and is based on the ability of microorganisms to utilize contaminants as an exclusive source of energy for the functioning of their metabolisms. Therefore, on the experiments in which the residual soil was

the object of investigation, soil samples from the columns' overture day have been subject to chemical (TPH and MNR) e microbiological (FDA) analysis in order to evaluate the influence of soil microorganisms on the biodegradation processes of the mineral oil throughout the 157 days of experiments. The results have shown that the tropical residual soil studied in the present work is susceptible to the biodegradation processes and is characterized by a direct relationship between the degradative activity and the loss of petroleum hydrocarbons.

Keywords

mobility; biodegradation; mineral oil; sandy idle soil; residual soil; column experiments

Sumário

1	Introdução	25
2	Revisão Bibliográfica	30
2.1.	Água no Solo	30
2.2.	Transporte de Contaminantes	30
2.3.	Biodegradação	31
2.3.1.	O Papel dos Microrganismos da Biodegradação	32
2.3.2.	Como os Microrganismos Degradam os Contaminantes	34
2.3.3.	Química da Biodegradação de Hidrocarbonetos de Petróleo	36
2.3.3.1.	Biodegradação de Hidrocarbonetos Alifáticos	37
2.3.3.2.	Biodegradação de Hidrocarbonetos Aromáticos	38
2.3.4.	Química da Biodegradação de Asfaltenos de Petróleo	39
2.3.5.	Fatores de Influência na Biodegradação	39
2.4.	Técnicas para Verificar a Ocorrência da Biorremediação <i>in Situ</i>	47
2.5.	A Problemática do Óleo	48
3	Materiais e Métodos	49
3.1.	Projeto Experimental	49
3.2.	Caracterização dos Solos	50
3.2.1.	Caracterização Física	51
3.2.1.1.	Esferas de Vidro	51
3.2.1.2.	Solo Residual	53
3.2.2.	Caracterização Microbiológica	59
3.3.	Caracterização do Óleo	60
3.4.	Ensaio Realizados e Metodologias Empregadas	61
3.4.1.	Esferas de Vidro	61
3.4.1.1.	Altura da Coluna de Acrílico	62
3.4.1.2.	Diâmetro Interno da Coluna de Acrílico	62
3.4.1.3.	Base da Coluna de Acrílico	63
3.4.1.4.	Metodologias de Adensamento da Coluna	63

3.4.1.4.1. Adensamento Camada por Camada	63
3.4.1.4.2. Adensamento Coluna Inteira	64
3.4.1.5. Saturação das Colunas com Esferas de Vidro	64
3.4.1.6. Metodologias de Drenagem	65
3.4.1.6.1. Drenagem Natural	66
3.4.1.6.2. Bomba de Sucção	66
3.4.1.6.3. Drenagem com Areia Grossa	66
3.4.1.6.4. Drenagem com Tubo	68
3.4.1.7. Contaminação das Esferas de Vidro	69
3.4.1.8. Abertura das Colunas	71
3.4.2. Solo Residual Indeformado	71
3.4.2.1. Amostragem do Solo Residual Indeformado	71
3.4.2.2. Metodologia de Contaminação do Solo Residual Indeformado	73
3.4.2.3. Abertura das Colunas	76
3.4.3. Análises Químicas	79
3.4.3.1. Análise de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH)	79
3.4.3.1.1. Solução Clorofórmio/Metanol 1:1	80
3.4.3.1.2. Metodologia de Ensaio	80
3.4.3.2. Ressonância Magnética Nuclear (RMN)	81
3.4.4. Análise Microbiológica	82
3.4.4.1. Preparo de Soluções e Reagentes	83
3.4.4.1.1. Solução Clorofórmio/Metanol 2:1	83
3.4.4.1.2. Solução Tampão Fosfato	83
3.4.4.1.3. Solução FDA	83
3.4.4.2. Metodologia de Ensaio	83
3.4.5. Controle da Temperatura	86
4 Apresentação e Discussão dos Resultados	87
4.1. Esferas de Vidro	87
4.1.1. Definição da Metodologia de Ensaio	87
4.1.1.1. Altura da Coluna de Acrílico	87
4.1.1.2. Diâmetro Interno da Coluna de Acrílico	88
4.1.1.3. Base da Coluna de Acrílico	88

4.1.1.4. Adensamento das Esferas de Vidro	88
4.1.1.5. Drenagem	88
4.1.2. TPH	89
4.1.3. Ressonância Magnética (RMN)	93
4.2. Ensaio com Solo Residual Indeformado	96
4.2.1. Atividade Degradadora Total	97
4.2.1.1. Atividade Degradadora Total (com refletor)	97
4.2.1.2. Atividade Degradadora Total (sem refletor)	101
4.2.1.3. Atividade Degradadora Total (com refletor x sem refletor)	104
4.2.2. TPH	107
4.2.2.1. TPH (com refletor)	108
4.2.2.2. TPH (sem refletor)	114
4.2.2.3. TPH (com refletor x sem refletor)	120
4.2.3. Atividade Degradadora Total (com refletor) x TPH (com refletor)	122
4.2.4. Atividade Degradadora Total (sem refletor) x TPH (sem refletor)	128
4.2.5. Ressonância Magnética Nuclear (RMN)	132
4.2.5.1. Hidrocarbonetos Aromáticos x Hidrocarbonetos Alifáticos	132
4.2.6. Temperatura e Umidade	136
4.2.6.1. Temperatura (com refletor)	136
4.2.6.2. Temperatura e Umidade (sem refletor)	137
4.2.7. Temperatura x TPH	138
4.2.8. Temperatura x Atividade Degradadora Total	140
4.2.9. Volatilização / Perda de Umidade	141
4.2.9.1. Volatilização / Perda de Umidade (com refletor)	141
4.2.9.2. Volatilização / Perda de Umidade (sem refletor)	143
4.2.9.3. Volatilização (com refletor) x Volatilização (sem refletor)	144
4.2.10. Volatilização (com refletor) x TPH (com refletor)	145
4.2.11. Volatilização (sem refletor) x TPH (sem refletor)	146
4.2.12. Esferas de Vidro x Solo Residual Indeformado	147
5 Conclusões e Sugestões	152
5.1. Ensaio com Esferas de Vidro	152
5.2. Ensaio com Solo Residual Indeformado	155

6 Referências Bibliográficas	160
Apêndice A	173
A.1 Adensamento Camada por Camada	173
A.1.1 Drenagem Natural	173
A.1.2 Bomba de Sucção	176
A.1.3 Areia	179
A.1.4 Drenagem Natural x Bomba de Sucção x Areia	182
A.2 Adensamento Coluna Inteira	184
A.2.1 Drenagem Natural	184
A.2.2 Bomba de Sucção	188
A.2.3 Areia	190
A.2.4 Tubo	195
A.2.5 Comparação das Diferentes Metodologias de Drenagem	200
Apêndice B	202
B.1 Análises Estatísticas	202

Lista de figuras

Figura 1.1 - Contaminação por NAPL (<i>apud</i> Bicalho, 1997).	26
Figura 2.1 – Durante o processo de biodegradação, os microrganismos obtêm energia para sua reprodução e seu crescimento através da quebra de ligações químicas e da transferência de elétrons do contaminante para aceptores de elétrons tais como O ₂ (National Research Council, 1993).	35
Figura 3.1 – Curva granulométrica das esferas de vidro (A-072).	52
Figura 3.2 – Perfil de solo de onde foi retirada a feição areno-siltosa S1 do solo residual do talude de corte de Duque de Caxias.	53
Figura 3.3 – Zoom na feição areno-siltosa S1.	54
Figura 3.4 – Curva granulométrica da feição areno-siltosa S1 do solo residual.	55
Figura 3.5 – Amostragem da feição areno-siltosa S1 para análise de hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA).	59
Figura 3.6 – Óleo utilizado nos ensaios de contaminação das esferas de vidro e do solo residual.	61
Figura 3.7 – Saturação das esferas de vidro pós-adensamento.	65
Figura 3.8 – Metodologia de drenagem através da utilização de areia grossa como material drenante.	67
Figura 3.9 – Etapas do procedimento de drenagem através de metodologia baseada no princípio dos vasos comunicantes (drenagem com tubo).	68
Figura 3.10 – Etapa de contaminação da coluna com as esferas de vidro (40cm).	70
Figura 3.11 – Detalhe do óleo mineral no topo da coluna no início da contaminação.	70
Figura 3.12 – Início da etapa de amostragem das colunas de solo residual indeformado.	72
Figura 3.13 – Cravação da coluna de PVC com auxílio de um bisel.	73
Figura 3.14 – Colunas de solo indeformado momentos antes da contaminação.	74

Figura 3.15 – Estrutura suporte aos refletores de 300W e de 500W. No topo da figura à esquerda destaque à vista lateral da caixa de disjuntores por meio da qual se fez o controle dos refletores.	75
Figura 3.16 – Tenda do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, onde foram realizados ensaios de contaminação de 157 dias.	76
Figura 3.17 – Retirada do solo indeformado da coluna de PVC ao final do intervalo de tempo estipulado para o monitoramento da contaminação e da atividade microbiana.	77
Figura 3.18 – Solo indeformado contaminado momentos antes de sua segmentação.	78
Figura 3.19 – Segmentação da coluna de solo indeformado.	78
Figura 3.20 – Retirada de amostras compostas de solo amolgado para posteriores análises químicas e microbiológicas.	79
Figura 3.21 – Interrupção da reação através de solução clorofórmio / metanol.	84
Figura 3.22 – Destaque para o volume de filtrado nas provetas e sua coloração esverdeada devido à presença de fluoresceína nas amostras.	85
Figura 4.1 – Avanço da frente de contaminação do óleo mineral nos diferentes ensaios.	89
Figura 4.2 – Contaminação em PPM em cada segmento de solo artificial na coluna.	91
Figura 4.3 – Contaminação expressa em gramas de óleo por segmento.	92
Figura 4.4 – Concentração de óleo normalizada nas diferentes repetições de ensaios de contaminação.	93
Figura 4.5 – Concentração normalizada dos compostos aromáticos do óleo mineral estudado nos diferentes segmentos da coluna.	94
Figura 4.6 – Concentração normalizada de alifáticos.	94
Figura 4.7 – Resumo das concentrações normalizadas médias de compostos aromáticos e alifáticos.	95
Figura 4.8 – Atividade degradadora total nos segmentos das colunas com refletor.	99
Figura 4.9 – Curvas representativas da atividade degradadora total nos diferentes segmentos plotadas em um mesmo gráfico.	100

Figura 4.10 – Ilustração gráfica dos resultados das análises de atividade degradadora total dos microrganismos do solo nos diferentes segmentos das colunas sem refletor.	103
Figura 4.11 – Atividade microbiana dos segmentos de solo indeformado em um mesmo gráfico.	104
Figura 4.12 – Comparação da atividade degradadora total nas colunas com refletor e nas colunas sob condições normais de temperatura.	105
Figura 4.13 – Contaminação inicial das colunas com refletor em ppm.	109
Figura 4.14 – Resultados das análises químicas por extração e determinação gravimétrica de TPH dos segmentos de solo indeformado das colunas com refletor ao longo dos 157 dias de monitoramento.	110
Figura 4.15 – Contaminação total das colunas com refletor.	111
Figura 4.16 – Resultados normalizados das análises por extração e determinação gravimétrica de TPH dos segmentos das colunas com refletor.	112
Figura 4.17 – Colunas 100% empilhadas representativas da contaminação normalizada dos diferentes segmentos das colunas com refletor.	113
Figura 4.18 – Contaminação inicial das colunas sem refletor.	115
Figura 4.19 – Contaminação em ppm dos segmentos das colunas sem refletor no intervalo de tempo referente ao final do monitoramento de cada uma delas.	116
Figura 4.20 – Contaminação total em ppm das colunas sem refletor.	117
Figura 4.21 – Ilustração gráfica da contaminação normalizada das colunas sem refletor.	118
Figura 4.22 - Contaminação em ppm dos segmentos representada através de colunas 100% empilhadas.	119
Figura 4.23 – Colunas 100% empilhadas a partir da concentração normalizada de contaminante em cada segmento de solo indeformado.	119
Figura 4.24 – Contaminações iniciais em ppm das colunas com refletor e sem refletor.	120
Figura 4.25 – Comparação das contaminações normalizadas dos segmentos das colunas com e sem refletor.	121

Figura 4.26 – Resultados das análises de TPH e de atividade microbiana das colunas com refletor. TPH em [óleo final (g) / óleo inicial (g)]*100 (%), FDA em µg/g/min e tempo de monitoramento em dias.	123
Figura 4.27 – Resultados das análises de TPH e de atividade microbiana das colunas sem refletor. TPH em [óleo final (g) / óleo inicial (g)]*100 (%), FDA em µg/g/min e tempo de monitoramento em dias.	129
Figura 4.28 – Concentrações normalizadas de hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos.	133
Figura 4.29 – Comparação dos resultados da RMN das colunas com e sem refletor.	135
Figura 4.30 – Monitoramento da variação de temperatura nas colunas sob influência dos refletores.	137
Figura 4.31 – Monitoramento da temperatura e da umidade ambiente.	138
Figura 4.32 – Cruzamento dos dados normalizados da concentração de TPH do primeiro segmento das colunas e dos dados referentes ao monitoramento da temperatura com e sem refletor.	139
Figura 4.33 – Atividade degradadora total do primeiro segmento das colunas x temperatura.	140
Figura 4.34 – Perdas umidade / volatilização das colunas com refletor.	142
Figura 4.35 – Perdas umidade / volatilização das colunas sem refletor.	143
Figura 4.36 – Volatilização com refletor x volatilização sem refletor.	144
Figura 4.37 – Correlação dos dados de volatilização com o percentual de entrada de óleo nas colunas com refletor.	145
Figura 4.38 – Correlação das perdas por volatilização com o percentual de entrada de óleo nas colunas sem refletor.	146
Figura A.1 – Umidade dos segmentos da coluna após a drenagem natural.	174
Figura A.2 – Saturação dos segmentos após a drenagem natural.	175
Figura A.3 – Peso específico dos segmentos da coluna nos diferentes ensaios.	176
Figura A.4 – Umidade dos segmentos após drenagem com bomba.	177
Figura A.5 – Saturação dos segmentos após drenagem com bomba.	178
Figura A.6 – Peso específico dos segmentos.	179

Figura A.7 – Umidade dos segmentos após drenagem com areia.	180
Figura A.8 – Saturação dos segmentos após drenagem com areia.	181
Figura A.9 – Pesos específico dos segmentos.	182
Figura A.10 – Umidade nos diferentes tipos de drenagem.	182
Figura A.11 – Saturação dos segmentos nos diferentes tipos de drenagem.	183
Figura A.12 – Umidade dos segmentos após a drenagem natural.	185
Figura A.13 – Saturação do segmentos após a drenagem natural.	186
Figura A.14 – Peso específico dos segmentos.	187
Figura A.15 – Umidade dos segmentos após drenagem com bomba de sucção.	188
Figura A.16 – Saturação dos segmentos após drenagem com bomba de sucção.	189
Figura A.17 – Peso específico dos segmentos.	190
Figura A.18 – Umidade dos segmentos após drenagem com areia.	191
Figura A.19 – Umidade dos segmentos da coluna de 40cm após drenagem com areia.	192
Figura A.20 – Saturação dos segmentos após drenagem com areia.	193
Figura A.21 – Saturação dos segmentos da coluna de 40cm após drenagem com areia.	194
Figura A.22 – Peso específico dos segmentos.	195
Figura A.23 - Umidade dos segmentos após drenagem com tubo.	196
Figura A.24 - Umidade dos segmentos da coluna de 40cm após drenagem com tubo.	197
Figura A.25 - Saturação dos segmentos após drenagem com tubo.	198
Figura A.26 - Saturação dos segmentos da coluna de 40 cm após drenagem com tubo.	199
Figura A.27 – Umidade dos segmentos nas diferentes metodologias de drenagem.	200
Figura A.28 – Saturação dos segmentos nas diferentes metodologias de drenagem.	201

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Resumo da granulometria das esferas de vidro (A-072).	52
Tabela 3.2 – Resumo da granulometria da feição areno-siltosa S1 do solo residual.	55
Tabela 3.3 – Peso específico das colunas de solo indeformado (feição areno-siltosa) em g/cm ³ .	56
Tabela 3.4 – Umidade higroscópica das feições A1, A2, S1 e S2 do solo residual.	56
Tabela 3.5 – Índice de vazios das colunas de solo residual indeformado (feição areno-siltosa).	57
Tabela 3.6 – Porosidade das colunas de solo residual indeformado (feição areno-siltosa).	58
Tabela 3.7 – Saturação das colunas de solo residual indeformado (feição areno-siltosa).	58
Tabela 3.8 – Atividade microbiana das diferentes feições de solo residual no dia de coleta de material no campo experimental.	60
Tabela 3.9 – Caracterização do óleo em função da temperatura.	60
Tabela 3.10 – Condições para obtenção do espectro ¹ H.	81
Tabela 3.11 – Tipos de hidrogênios e respectivos deslocamentos no espectro (PPM).	82
Tabela 4.1 – Contaminação em PPM dos segmentos de coluna nas várias repetições do ensaio.	90
Tabela 4.2 – Massa de óleo em gramas por segmento da coluna nos diferentes ensaios.	92
Tabela 4.3 – Contaminação normalizada dos segmentos da coluna de solo artificial.	93
Tabela 4.4 – Altura das colunas de solo indeformado alocadas para cada intervalo de tempo monitorado.	96
Tabela 4.5 – Resultados da atividade degradadora total nos segmentos de solo das colunas sob influência de refletores durante os 157 dias de monitoramento.	98

Tabela 4.6 – Resultados das análises de atividade microbiana das colunas sem refletor.	102
Tabela 4.7 – Resultados em ppm das análises químicas por extração e determinação gravimétrica de TPH dos segmentos de solo residual indeformado.	108
Tabela 4.8 – Concentração normalizada de TPH com refletor.	111
Tabela 4.9 – Contaminação em ppm das colunas sem refletor.	114
Tabela 4.10 – Concentração normalizada de contaminante nas colunas sem refletor.	117
Tabela 4.11 – Perdas por umidade / volatilização das colunas com refletor.	142
Tabela 4.12 – Perdas por umidade / volatilização das colunas sem refletor.	143
Tabela A.1 – Umidade dos segmentos após a drenagem natural	173
Tabela A.2 – Saturação dos segmentos após a drenagem natural.	174
Tabela A.3 – Peso específico seco dos segmentos da coluna nos diferentes ensaios.	175
Tabela A.4 – Umidade dos segmentos após drenagem com bomba de sucção.	176
Tabela A.5 – Saturação dos segmentos após drenagem com bomba de sucção.	177
Tabela A.6 – Peso específico dos segmentos nos diferentes ensaios.	178
Tabela A.7 – Umidade dos segmentos após drenagem com areia.	179
Tabela A.8 – Saturação dos segmentos após drenagem com areia.	180
Tabela A.9 – Peso específico dos segmentos.	181
Tabela A.10 – Umidade dos segmentos após drenagem natural.	185
Tabela A.11 – Saturação dos segmentos após a drenagem natural.	186
Tabela A.12 – Peso específico dos segmentos.	187
Tabela A.13 – Umidade dos segmentos após drenagem com bomba de sucção.	188
Tabela A.14 – Saturação dos segmentos após drenagem com bomba de sucção.	189
Tabela A.15 – Peso específico dos segmentos.	190

Tabela A.16 – Umidade dos segmentos após drenagem com areia.	191
Tabela A.17 – Umidade dos segmentos da coluna de 40cm após drenagem com areia.	192
Tabela A.18 – Saturação dos segmentos após drenagem com areia.	193
Tabela A.19 – Saturação dos segmentos da coluna de 40cm após drenagem com areia.	194
Tabela A.20 – Peso específico dos segmentos.	195
Tabela A.21 – Umidade dos segmentos após drenagem com tubo.	196
Tabela A.22 - Umidade dos segmentos da coluna de 40cm após drenagem com tubo.	197
Tabela A.23 – Saturação dos segmentos após drenagem com tubo.	198
Tabela A.24 - Saturação dos segmentos da coluna de 40cm após drenagem com tubo.	199
Tabela B.1 – Análise estatística AREIA (colunas).	202
Tabela B.2 - Análise estatística AREIA (colunas).	203
Tabela B.3 - Análise estatística TUBO (colunas).	203
Tabela B.4 - Análise estatística TUBO (colunas).	203
Tabela B.5 - Análise estatística AREIA (linhas).	204
Tabela B.6 - Análise estatística AREIA (linhas).	204
Tabela B.7 - Análise estatística TUBO (linhas).	204
Tabela B.8 - Análise estatística TUBO (linhas).	204