



**Betzabé Yajaira Tafur Borjas**

**Desenvolvimento de um Sistema de  
Dessorção Térmica “*Ex situ*”**

**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: José Tavares Araruna Júnior



**Betzabé Yajaira Tafur Borjas**

**Desenvolvimento de um Sistema de  
Dessorção Térmica “*Ex situ*”**

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.

**Prof. José Tavares Araruna Júnior**

Orientador

Departamento de PUC - Rio

**Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos**

PUC – Rio

**Profª. Maria Claudia Barbosa**

COPPE - UFRJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC - Rio

Rio de Janeiro, 19 de maio de 2009

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

### **Betzabé Yajaira Tafur Borjas**

Graduou-se em Engenharia Geológica na (UNI) Universidade Nacional de Engenharia - Lima-Peru em 2004. Ingressou em 2007 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa de Geotecnia Ambiental.

#### **Ficha Catalográfica**

Borjas, Betzabé Yajaira Tafur

Desenvolvimento de um sistema de dessorção térmica “Ex situ” / Betzabé Yajaira Tafur Borjas ; orientador: José Tavares Araruna Júnior. – 2009.

104 f. : il.(color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Dessorção térmica. 3. Remediação de solo. 4. Unidade de aeração. 5. Temperatura. 6. Analisador de gases. 7. Contaminação. I. Araruna Júnior, José Tavares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

À Deus, pelo amor, bondade e benção para seguir adiante.

Ao professor José Araruna, pela sua valiosa orientação e ajuda no desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu noivo Enrique, companheiro e amigo pelo apoio, compreensão e carinho.

A meus queridos pais pelo amor, carinho e confiança plena.

A meus irmãos pelo carinho, apoio e confiança.

Ao Patrício pela amizade, ajuda e orientação durante o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Raphael pela ajuda para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC - Rio pela infra-estrutura e suporte.

Aos Funcionários do Departamento de Geotecnia e Meio Ambiente e do Departamento de Estruturas pela ajuda no desenvolvimento de este estudo.

Aos Funcionários do Departamento de Estruturas e Materiais pela ajuda no desenvolvimento de este estudo.

À FAPERJ e à PUC, pelo apoio financeiro.

## Resumo

Tafur Borjas, Betzabé Yajaira; Araruna, José. **Desenvolvimento de um Sistema de Dessorção Térmica “Ex situ”**. Rio de Janeiro, 2009. 104p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho descreve o desenvolvimento e avaliação de um sistema de dessorção térmica *ex situ* desenhado na PUC - Rio destinado a remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo. Trata-se de um sistema modular que emprega altas temperaturas para volatilizar o contaminante do meio poroso. O principal módulo do sistema consiste de caixas metálicas onde o solo escavado é disposto e submetido ao tratamento. No interior de cada caixa são inseridas resistências que permitem a aplicação de altas temperaturas através da rede elétrica. A temperatura durante o ensaio é controlada por um sistema que permite a aplicação de rampas e patamares. O sistema também possui uma unidade de aeração que evita o coqueamento do material a ser tratado. A avaliação do sistema foi realizada com o tratamento *ex situ* de um solo contaminado oriundo de um antigo posto de serviços no Bairro do Grajaú, Rio de Janeiro. O sistema mostrou ter um bom desempenho reduzindo a contaminação do solo a valores abaixo do limite de detecção do analisador de gases Thermo modelo GasTech Innova SV. O tratamento realizado apresentou um custo de R\$ 0,43 por quilograma de solo tratado, valor este bem abaixo do cobrado por unidades de incineração do Estado do Rio de Janeiro (*i.e.*, cerca de R\$ 3,00/kg).

## Palavras-chave

Dessorção térmica, remediação de solo, unidade de aeração, temperatura, analisador de gases, contaminação.

## Abstract

Tafur Borjas, Betzabé Yajaira; Araruna, José. **Development of an *Ex situ* thermal desorber system**. Rio de Janeiro, 2009. 104p. MSc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation describes the development and assessment of an *ex situ* thermal desorption system designed at PUC - Rio aimed on treating petroleum hydrocarbon contaminated soils. The modular system employs high temperatures to volatilize the contaminants presented in the porous media. The main component of this system comprises steel boxes where the contaminated soil is disposed and treated. In each box, electrical resistances are inserted enabling the application of very high temperature. The temperature during testing is controlled by a system that allows the use of ramps and steps. The system also has a unit of the aeration which prevents coking of the material to be treated. The system was assessed employing a contaminated soil excavated from a former gas station in Grajaú, Rio de Janeiro. The system showed a good performance reducing the contamination to levels below the limit detection of a Thermo GasTech Innova SV gas analyzer. The treatment presented a cost of R\$ 0,43/kg, well below the average cost charged by incineration units in the State of Rio de Janeiro (i.e., circa R\$ 3,00/kg).

## Keywords

Thermal desorption, treatment of soil, unit of the aeration, temperature, gas analyzer, contamination.

## Sumário

Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	11
Lista de Símbolos e abreviaturas	12
1 Introdução	16
1.1. Objetivos	18
1.2. Organização da dissertação	18
2 Revisão Bibliográfica	19
2.1. Contaminantes	19
2.2. Casos de Vazamento de Óleo	23
2.2.1. Composição e quantidade de produtos derramados	26
2.2.2. Propriedades toxicológicas do óleo	26
2.2.3. Propriedades físicas e químicas do óleo	27
2.3. Processos Térmicos	29
2.3.1. Dessorção Térmica	31
2.3.2. Tecnologias <i>In situ</i> – <i>Ex situ</i>	35
2.4. Aquecimento do solo	46
2.4.1. Propriedades Térmicas dos materiais	48
2.4.2. Fenômenos de Transferência de calor	51
3 Sistema de Dessorção Térmica <i>Ex Situ</i>	54
3.1. Considerações iniciais	54
3.2. Componentes do Sistema de Dessorção Térmica <i>Ex situ</i>	55
3.2.1. Caixa de Dessorção Térmica	56
3.2.2. Isolante Térmico	64
3.2.3. Controladores de Temperatura	67
3.2.4. Sistema de Armazenamento e Aquisição de Dados	70

3.2.5. Sistema Exaustor de Ar	71
3.2.6. Fonte de Alimentação Elétrica	71
3.2.7. Guincho Hidráulico	73
4 Obtenção da Amostra de Solo Contaminado	75
4.1. Metodologia da Amostragem	76
4.2. Coleta da Amostra	78
4.3. Análise da Amostra	81
4.4. Caracterização do solo	83
5 Avaliação do Sistema de Dessorção Térmica <i>Ex Situ</i>	85
5.1. <i>Lay out</i> do Experimento	87
5.2. Condução do Experimento	89
5.3. Avaliação do Experimento	92
5.4. Custo do Experimento	94
6 Conclusões e Sugestões	96
Referências Bibliográficas	100



## Lista de figuras

Figura 1 - Relação entre temperatura e pressão de vapor (EPA, 1998).	22
Figura 2 - Processo de Dessorção Térmica (NFESC, 1998).	33
Figura 3 - Dessorção Térmica <i>in situ</i> (Stegemeier e Vinegar, 2001 ).	34
Figura 4 - Ações de remediação: projetos de controle de tratamentos (1982 - 2002).	36
Figura 5 - Dessorção térmica <i>Ex-Situ</i> – Tanapag, Saipan (Stegemeier & Vinegar, 2001).	38
Figura 6 - Estrutura do sistema de dessorção térmica HTTD (EPA, 1999).	39
Figura 7 - Estrutura do sistema de dessorção térmica LTDD (EPA, 1999)	40
Figura 8 - Sistema de dessorção térmica, (TerraTherm, 1997).	41
Figura 9 - Química do tratamento por oxidação (TerraTherm, 1997).	42
Figura 10 - Condução através de um sólido ou fluido estacionário (Incropera, 2002).	52
Figura 11 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento (Incropera, 2002).	53
Figura 12 - Transferência líquida de calor por radiação entre duas superfícies (Incropera, 2002).	53
Figura 13 - Caixa de Dessorção Térmica.	55
Figura 14 - Tampa da caixa de dessorção térmica.	56
Figura 15 - Tampa da Caixa Dessorção Térmica	56
Figura 16 - Tampa da Caixa Dessorção Térmica	57
Figura 17 - Resistências montadas dentro da Caixa de dessorção térmica.	58
Figura 18 - Resistência elétrica.	59
Figura 19 - Resistência elétrica.	59
Figura 20 - Adaptador do Termopar.	61
Figura 21 -Termopar com adaptador.	61
Figura 22 - Estrutura anilhada tipo ajustável.	62
Figura 23 - Termopares.	63
Figura 24 - Distribuição dos termopares na caixa térmica.	63

Figura 25 - Localização dos termopares no interior da caixa térmica.	64
Figura 26 - Fibra cerâmica	65
Figura 27 - Condutividade térmica das mantas de fibra cerâmica (FiberFrax, 2003).	66
Figura 28 - Fibra cerâmica colocada dentro da tampa da Caixa térmica.	66
Figura 29 - Controladores de temperatura.	67
Figura 30 - Controlador de temperatura - Incon CNT 110.	68
Figura 31 - Controlador de potência -Vista superior.	69
Figura 32 - Data Logger	70
Figura 33 – Soprador de Ar	71
Figura 34 - Caixa de passe.	72
Figura 35 - Medidor de consumo.	72
Figura 36 - Quadro de distribuição.	73
Figura 37 - Guincho Hidráulico.	74
Figura 38 - Imagem do local (Google Imagens, 2009).	75
Figura 39 - Planta de localização do antigo posto de serviço	76
Figura 40 - Detalhe do amostrador de gás	77
Figura 41 - Medidor de hidrocarboneto total de petróleo.	77
Figura 42 - Esquema da amostragem de gases na zona vadosa de um meio poroso.	77
Figura 43 - Tambores com material contaminado	78
Figura 44 - Determinação de TPH nos materiais contidos nos tambores metálicos	79
Figura 45 - Local onde foi determinada a maior concentração de TPH.	79
Figura 46 - Demarcação da área para escavação	80
Figura 47 - Acondicionamento e transporte do solo contaminado	80
Figura 48 - Determinação do TPH na amostra contaminada utilizando o procedimento CETESB.	81
Figura 49 - Curva granulométrica do solo	83
Figura 50 - Diagrama esquemático do sistema PUC-Rio de dessorção térmica <i>ex situ</i> .	85
Figura 51 - Diagrama esquemático da unidade de dessorção térmica	86
Figura 52 - Equipamento de avaliação do sistema de dessorção térmica.	87

Figura 53 - <i>Layout</i> da instrumentação do ensaio: a) disposição espacial dos termopares e b) termopares instalados	88
Figura 54 - Detalhe de instalação do soprador.	89
Figura 55 - Detalhe do sistema em operação	89
Figura 56 - Detalhe da colocação do solo contaminado na caixa de dessorção térmica	90
Figura 57 - Detalhe da instalação das mantas isolantes	90
Figura 58 - Variação da temperatura no decorrer do ensaio	91
Figura 59 - Solo contaminado após o tratamento	92
Figura 60 - Determinação da concentração de TPH no solo tratado	93
Figura 61 - Solo coqueado	93
Figura 62 - Consumo elétrico	94

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades de alguns compostos químicos orgânicos encontrados em áreas contaminadas (Modificado de Davis, 1997).	20
Tabela 2(cont.) - Propriedades de alguns compostos químicos orgânicos encontrados em áreas contaminadas (Modificado de Davis, 1997).	21
Tabela 3 - Principais derrames de petróleo no litoral de Brasil (modificado de Poffo, 2000).	24
Tabela 4 - Porcentagens de acidentes em diferentes atividades no período de 1978 até outubro 2008, acessado em 18 de dezembro de 2008, CETESB (2008).	25
Tabela 5 - Classe de risco, acessado em 18 de dezembro de 2008, CETESB (2008).	26
Tabela 6 - Classificação dos tipos de óleo, acessado em 18 de dezembro de 2008, CETESB (2008).	28
Tabela 7 - Comparação das características físicas de vários tipos de óleo, acessado em 18 de dezembro de 2008 CETESB (2008)	29
Tabela 8 - Vantagens e desvantagens de processos térmicos (WOOD, 1997).	30
Tabela 9 - Efetividade da dessorção térmica em grupos gerais de contaminantes para solos, sedimentos, lamas e filter cake (NAVAL FACILITIES ENGINEERING SERVICE CENTER, 1998).	44
Tabela 10 - Custo estimado na aplicação da dessorção térmica <i>ex situ</i> (FRTR, 2009)	46
Tabela 11 - Analogias de Fluxo (Mitchell, 1993).	48
Tabela 12 - Propriedades Térmicas de Materiais distintos (modificado de Mitchell, 1993).	49
Tabela 13 - Características físico-elétricas da resistência.	57
Tabela 14 - Resistência à corrosão (NBR 6847/81).	60
Tabela 15 - Tipos de termopares.	61
Tabela 16 - Características da Fibra cerâmica (FiberFrax, 2003) .	65

Tabela 17 - Especificações técnicas do controlador de temperatura Incon CNT 110.	68
Tabela 18 - Especificações técnicas	73
Tabela 19 - Valores de TPH determinados	82
Tabela 20 - Caracterização Geotécnica do solo	83

## Lista de Símbolos e abreviaturas

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas  
API American Petroleum Institute  
CETESB Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
CO Monóxido de Carbono  
CO<sub>2</sub> Dióxido de Carbono  
CH<sub>4</sub> Metano  
EPA Environmental Protection Agency  
FY Fiscal year  
HPAs Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos  
HTTD High Temperature Thermal Desorption  
ITOPF The International Tanker Owners Pollution Federation  
LIGTH Companhia Fornecedora de Energia do Estado do Rio  
MMA Ministério do Meio Ambiente  
LTDD Low Temperature Thermal Desorption  
NFESC Naval Facilities Engineering Service Center  
PCBs Bifenilas Policloradas  
PCE Tetracloroetileno  
RACER Remedial Action Cost Engineering and Requirements  
SVOCs Compostos orgânicos semivoláteis  
TCE Tricloroetileno  
USEPA United States Environmental Protection Agency  
VOCs Compostos orgânicos voláteis  
A Ampere  
A Área  
c Calor específico  
c<sub>a</sub> Calor específico do ar  
c<sub>n</sub> Calor específico do solo  
c<sub>s</sub> Calor específico dos sólidos  
C Capacidade de aquecimento volumétrica

°C Graus Celsius

$\gamma$  Peso específico

$\gamma_d$  Peso específico seco

$\gamma_w$  Peso específico da água

$i_h$  Gradiente hidráulico

$i_t$  Gradiente térmico

k Condutividade hidráulica

Kg Quilograma

L Litro

$L_i$  Coeficiente de condutividade para um dado fluxo.

mg Miligrama

$\lambda$  Condutividade térmica

$\lambda_s$  Condutividade térmica do solo

$\lambda_w$  Condutividade térmica da água

$\mu$  Viscosidade

p Pressão

$q_h$  Fluxo de água

$q_t$  Fluxo de calor

Q Vazão

$P_w$  Densidade da água

$\rho$  Massa específica seca

t Tempo

T Temperatura

$\Delta T$  Variação de temperatura

V Volume de fluido

V Voltios

W Watts

w Umidade gravimétrica em porcentagem

$\Omega$  Ohmios