



**Anna Paula Lougon Duarte**

**Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos  
Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito  
parcial para a obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos  
José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro, 13 de fevereiro de 2004.



**Anna Paula Lougon Duarte**

## **Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Tácio Mauro P. de Campos**

Presidente/Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. José T. Araruna Jr.**

Co-Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Manoel de Melo M. Nobre.**

UFAL

**Prof. Roberto F. de Azevedo**

UFV

**Prof. Eurípedes do A. Vargas Jr.**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Franklin dos S. Antunes**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de fevereiro de 2004.

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

## **Anna Paula Lougon Duarte**

Engenheira Civil, formada pela UNB em 1995. Especialista em Geotecnia pela UnB em 1996. Especialista em Geotecnia pela Universidade de Brasília em 1996. Realizou o curso de extensão em Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações pelo CEDEX-Madrid em 1998. Concluiu o Mestrado em Engenharia Civil em 1999, com o estudo do mecanismo de ruptura da encosta em solo não saturado da Vista Chinesa. Atuante na área de Geotecnia Ambiental desde 1998.

### Ficha Catalográfica

Duarte, Anna Paula Lougon.

Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica / Anna Paula Lougon Duarte; orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos e José Tavares Araruna Júnior. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

v., [33], 290f. :il. ; 30cm

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

Inclui referências Bibliográficas

1. Geotecnia ambiental. 2.Dessorção térmica. 3.Fluxo acoplado de calor e umidade em solos. 4.Efeitos de temperatura em solos. 5.Ensaio de laboratório 6.Solos não-saturados. I.de Campos, Tácio M. P. (Tácio Mauro Pereira). II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Ao meu amado companheiro e grande amigo que me preenche a vida com tantas alegrias, meu marido Mário.

Aos meus PAIS, Edson e Anna, pelo apoio irrestrito, confiança incondicional e amor pleno.

## Agradecimentos

À Deus, por sua infinita bondade e amor, pois somente com sua benção foi possível a realização deste trabalho.

Aos Professores Tácio e Araruna pela valiosa orientação.

As instituições CAPES, PRONEX/CNPq e a PUC-Rio pelo apoio financeiro.

Aos professores do Departamento, pelos conhecimentos transmitidos e pela agradável convivência, em especial aos meus amigos Celso Romanel, Franklin Antunes e Vargas.

Um agradecimento todo especial a turma do laboratório, que com dedicação e competência foram imprescindíveis neste trabalho: “Mestre” William, “Seu” José, Amaury e Josué.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil pela disponibilidade, atenção e amizade, em especial a Ana Roxo, Fátima, Lenilson e Cristiano.

Ao professor Gusmão pela grande ajuda. Ao Victor Hugo pela participação na montagem dos equipamentos eletrônicos.

A Rosane Maia Nobre que muito colaborou dividindo os seus conhecimentos sobre fluxo de calor em solos.

Ao casal Ana Valéria e Luís Bertolino pela presteza e simpatia, na ajuda com o microscópio eletrônico.

Aos meus pais incentivadores, os quais são meu palco e minha platéia, dizer obrigada é pouco diante de tudo o que vocês fizeram por mim! Essa conquista é de vocês.

A minha doce irmã e afilhada, que mesmo à distância foi primordial nesta caminhada. Você é muito importante e querida!

Aos meus familiares que me receberam no Rio com os braços abertos, ajudando a tornar a minha estadia aqui cada vez mais prazerosa, com carinho todo especial aos Tios com açúcar, Adinet e Egberto, Liese e Eduardo. E a prima que a vida transformou em irmã, Renata, com sua adorada família Flávio e Felipe.

À Dona Ayr, Seu Mário, Cristina e Conrado por agora sermos uma única família, obrigada pelo apoio e incentivo.

A todos os professores de Geotecnia da UnB, que plantaram em mim a semente da vida acadêmica. Em especial a memória do professor Feitosa, figura ímpar, sempre disposto a ajudar e a ensinar.

Ao grande amigo Sérgio Tibana, mais uma vez incansável no apoio, na colaboração e no carinho, e que ainda me presenteou com o convívio de sua doce família.

Aos amigos de todas as horas, com quem pude contar para dividir as muitas alegrias e os momentos angustiantes, Raquel e João Luíz, Ana Ghislaine e Paul, Andreia e Thadeu, Suzana e Rodrigo, Lenita e Renato, Lúcio Flávio; saibam que vocês ocupam um lugar todo especial em meu coração.

Aos amigos que estão distante, mais nem por isso menos amados ou esquecidos: Alvane, a toda família Cajaty Barbosa Braga, Liliam, Evaldo, Eduardo, Deinha e Maurício, Paulinha, Simone e Héctor, Lúcio Flávio e, Carlos Carillo.

Aos amigos da Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil pela prazerosa convivência e pelas ajudas preciosas: Ana Cristina, Ciro, Ataliba, Ana Júlia, Suzana Costa, Cleide e Eudes, Leonardo Bello, Patrício, Luciana, e, Mônica. Ainda assim é impossível citar todos aqueles que foram importantes para a realização desta tese.

Ao meu amor, Mário, que participou deste “projeto” desde o início, não me restam dúvidas que você foi a melhor parte desta pesquisa, obrigada pela paciência, pelo apoio, pela dedicação e sobretudo por ter se tornado meu esposo.

## Resumo

Duarte, Anna Paula Lougon; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Araruna, José Tavares. **Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**. Rio de Janeiro, 2004. 290p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente tese apresenta uma abordagem sobre a técnica de dessorção térmica na remediação de áreas contaminadas, esta tecnologia se baseia no aquecimento direto do solo. A propagação de calor num solo é simulada matematicamente pelo fluxo acoplado de calor. Para que esta simulação seja possível é necessário a identificação dos parâmetros relevantes para o problema: condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica, condutividade térmica em função da umidade volumétrica, capacidade de aquecimento volumétrico, e, curva característica de sucção. Uma discussão técnica é apresentada sobre estes parâmetros.

Foram estudados dois tipos de solos, uma argilo-arenoso (Campo Experimental da PUC-Rio) e um areno-argiloso (Cidade dos Meninos). É apresentado um estudo físico-químico sobre os efeitos da temperatura nos solos, com ensaios de RaiosX, Microscopia Eletrônica, CTC, Ataque Sulfúrico e de Caracterização para solos não aquecidos e previamente aquecidos até a temperatura de 300°C.

São apresentadas metodologias e equipamentos que foram desenvolvidos e/ou adaptados de para o estudo das propriedades termo-hidráulicas necessárias. Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica, curvas características de sucção e deformabilidade, levando-se em conta a temperatura. Todos os parâmetros mostraram-se altamente dependente desta. Os parâmetros térmicos, condutividade térmica e calor específico, foram determinados para estes dois de solos.

## Palavras-chave

Geotecnia ambiental; dessorção térmica; fluxo acoplado de calor e umidade em solos; efeitos de temperatura em solos; ensaios de laboratório; solos não-saturados.



## Abstract

Duarte, Anna Paula Lougon; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Araruna, José Tavares. **A Study of Soil Thermo-Hydraulics Properties Required at the Application of the Thermal Desorption**. Rio de Janeiro, 2004. 290p. DSc. Thesis –Civil Eng. Dept., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents an introduction on the use of the thermal desorption technique that is based on the direct heating of the soil, for the remediation of contaminated areas. Heat propagation through soils can be mathematically simulated using coupled heat-moisture transfer theories. In order to make this simulation possible it is necessary to identify the required parameters: hydraulic conductivity as a function of volumetric water content, thermal conductivity as a function of volumetric water content, volumetric heat capacity, and soil-water characteristic curve. One technical description of such parameters is presented.

Two different kinds of soils were used, one clay-sand (CH) and one sand-clay (SC). A study physico-chemical was done taking into consideration the temperature effect on the soils with X-Ray, electron microscopic investigation, CTC, Atterberg Limits and at the particle size distribution. The study was done on pre-heated soils with temperatures ranging from 20°C to 300°C.

Equipments and methodologies have been especially developed for the study of the thermo-hydraulics properties. The laboratory tests program consisted of hydraulic conductivity, retention curves and deformability, taking into account the temperature effects. During the tests it was observed that all parameters were temperature dependent. The thermal parameters, thermal conductivity and heat capacity were studied for both soils.

## Keywords

Environmental geotechnical; thermal desorption; coupled heat-moisture transfer; effects of the temperature on soils; laboratory tests; unsaturated soils.

## Sumário

1	Introdução	34
1.1	Estrutura da Tese	36
2	Dessorção Térmica	38
2.1.	Contaminantes	50
3	Modelagem Matemática do Aquecimento de um Solo	53
3.1.	Condutividade térmica e capacidade de aquecimento volumétrico	54
3.2.	Fenômenos de Transferência de Calor	61
3.3.	Fluxos Acoplados	64
4	Efeitos da variação de temperatura nas propriedades dos solos	74
4.1.	Efeitos da Temperatura no Comportamento Hidráulico	77
4.2.	Propriedades da água nos solos e a influência da temperatura	82
5	Características dos Solos e dos Corpos de Prova Utilizados	84
5.1.	Solos Utilizados	84
5.1.1.	Localização, Clima e Geologia	84
5.1.1.1.	Solo Coluvionar – Campo Experimental	84
5.1.1.2.	Solo Sedimentar Arenoso – Cidade dos Meninos	86
5.1.2.	Caracterização Física dos Materiais	88
5.1.3.	Análises Mineralógicas e Geoquímica	94
5.2.	Preparação e Confecção das amostras	99
5.2.1.	Confecção das amostras - Compactação	99
6	Equipamentos e Metodologias de Ensaios	105
6.1.	Condutividade Hidráulica Saturada	107
6.1.1.	Metodologia de Ensaio	109
6.2.	Condutividade Térmica e Calor Específico	110
6.2.1.	Metodologia de Ensaio	120

6.1.1.1. Condutividade Térmica	120
6.2.1.2. Calor Específico	121
6.3. Curvas Características de Sucção	121
6.3.1. Metodologia de Ensaio	123
6.4. Condutividade Hidráulica Saturada com Temperatura Controlada	125
6.4.1. Metodologia de Ensaio	131
6.5. Célula de Compressão Isotrópica com Temperatura Controlada	132
6.5.1. Metodologia de Ensaio	133
7 Apresentação e Análise dos Resultados	135
7.1. Condutividade Hidráulica Saturada	135
7.2. Condutividade Térmica e Calor Específico	144
7.2.1. Condutividade Térmica	144
7.2.2. Calor Específico	155
7.3. Curvas Características de Sucção	162
7.3.1. Curvas de Condutividade Hidráulica Não Saturada	175
7.4. Ensaio de Condutividade Hidráulica Saturada com Temperatura Controlada	179
7.5. Célula de Compressão Isotrópica com Temperatura Controlada	190
8 Conclusões e Sugestões	198
8.1 Conclusões	198
8.1.1 Propriedades Físicas, Físico-Químicas e Mineralógicas	199
8.1.2 Condutividade Hidráulica Saturada	200
8.1.3 Condutividade Térmica e Calor Específico	202
8.1.4 Curvas Características de Sucção	204
8.1.5 Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica	205
8.2 Sugestões para pesquisas futuras	206
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	208
Apêndice A – Calibração da Instrumentação	218
A.1 Calibrações para Permeâmetro de Parede Flexível e Carga Constante	

	219
A.1.1. Transdutores de Pressão	219
A.1.2. Medidor de Variação Volumétrica	220
A.2. Calibrações para Permeâmetro de Temperatura Controlada	220
A.2.1. Transdutores de Pressão	220
A.2.2. Medidor de Variação Volumétrica	223
A.2.3. Calibração dos Termopares	223
Apêndice B Gráficos dos Ensaios de Permeabilidade Saturada	228
B.1. Ensaios com o Permeâmetro de Parede Flexível e Carga Constante	228
B.1.1. Solo do Campo Experimental	229
B.1.2. Solo da Cidade dos Meninos	236
B.2. Ensaios de Permeabilidade Saturada com Temperatura Controlada	240
B.2.1. Solo do Campo Experimental	241
B.2.2. Solo da Cidade dos Meninos	248
Apêndice C Dados para a obtenção do Calor Específico	255
C.1. Solo do Campo Experimental	256
C.2. Solo da Cidade dos Meninos	259
Apêndice D Dados para a Obtenção da Curva Característica	262
D.1. Solo do Campo Experimental	263
D.1.1. Curva do Material Seco ao Ar	263
D.1.2. Curva do Material Natural	263
D.1.3. Curva do Material Saturado	264
D.1.4. Curva do Material Submetido a Temperatura de 50°C	265
D.1.5. Curva do Material Submetido a Temperatura de 100°C	265
D.1.6. Curva Característica do Material Submetido a 200°C.	272
D.1.7. Curva Característica do Material Submetido a 300°C.	273
D.1.8. Curva Característica do Material Submetido a 100°C e Saturado.	273

D.1.9. Curva Característica do Material Submetido a 300°C e Saturado.	274
D.2. Solo da Cidade dos Meninos	275
D.2.1. Curva do Material Natural	275
D.2.2. Curva do Material Submetido a 100°C	275
D.2.3. Curva do Material Submetido a 200°C	276
D.2.4. Curva do Material Submetido a 300°C	277
Apêndice E Dados de Variação de Volume com a Temperatura	278
E.1. Solo do Campo Experimental	279
E.2. Solo da Cidade dos Meninos	285

## Lista de Figuras

Figura 1 – Sistemas de Dessorção Térmica <i>in situ</i> (Terratherm, 2001).	42
Figura 2- Relação entre temperatura e pressão de vapor (EPA, 1998)	45
Figura 3- Variação da viscosidade e peso específico da água com a temperatura.	79
Figura 4 – Localização do Campo Experimental II da PUC-Rio. (Beneveli, 2002)	85
Figura 5 – Descrição morfológica do perfil (Daylac, 1994)	86
Figura 6 – Mapa da cidade do Rio de Janeiro destacando a Cidade dos Meninos	87
Figura 7 – Localização da retirada das amostras e direção do fluxo d'água subterrânea.	88
Figura 8 – Curvas granulométricas	89
Figura 9 - Curvas granulométricas dos solos pré-aquecidos: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.	92
Figura 10 – Variações dos Limites de Atterberg: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos	93
Figura 11 - Difractogramas de Raios-X do solo do Campo Experimental.	97
Figura 12 - Difractogramas de Raio-X do solo da Cidade dos Meninos.	97
Figura 13 – Mudança na coloração das amostras com a temperatura: Campo Experimental (a), Cidade dos Meninos (b)	98
Figura 14 - Esquema do molde de compactação	100
Figura 15 – Foto do Molde	100
Figura 16 –Fotografias da Prensa de adensamento Modelo Bishop utilizadas: (a) vista frontal e (b) vista lateral.	101
Figura 17 – Variação dos pesos específicos segundo pressão de compactação.	103
Figura 18 – Curvas de Compactação Estática para pressão de 500kPa: (a) solo do Campo Experimental e (b) solo da Cidade dos Meninos.	103

Figura 19 – Permeâmetro desenvolvido no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio	107
Figura 20 – Representação esquemática do permeâmetro	108
Figura 21 – Esquema de sonda térmica	114
Figura 22- Sonda térmica e <i>Data-Logger</i>	116
Figura 23 – Molde de latão e placas isolantes para a medição do calor específico.	117
Figura 24 – Medição do calor específico	117
Figura 25 – Termômetro digital MINIPA	118
Figura 26 – Curva de fator tempo para fluxo de calor radial. Michell e Kao (1978)	119
Figura 27 – Detalhe da câmara de aço	125
Figura 28 – Unidade de controle de temperatura	126
Figura 29 – Detalhes do sistema de aquecimento	127
Figura 30 – Detalhe do medidor de variação de volume e do LSCDT	128
Figura 31 – Detalhe dos termopares instalados na base e no topo da amostra	129
Figura 32 – Permeâmetro de temperatura controlada	129
Figura 33 – Diagrama esquemático do permeâmetro de temperatura controlada.	130
Figura 34 – Medidor de variação volumétrica com temperatura controlada.	133
Figura 35 – Ensaio de condutividade hidráulica da amostra a temperatura ambiente para o solo do Campo Experimental: (a) variação de volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c)variação da condutividade hidráulica com o tempo.	138
Figura 36 – Variação da condutividade hidráulica para corpos de prova submetidos a gradientes de temperatura em mufla e ensaiados a temperatura ambiente.	139
Figura 37 – Imagens das lâminas com microscópio eletrônico	141
Figura 38 – Variação do fator de forma C para corpos de prova	

submetidos a diferentes gradientes de temperatura em mufla.	143
Figura 39 – Variação do índice de vazios com a umidade, limite de contração:	
(a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.	147
Figura 40 – Curva de condutividade térmica x umidade gravimétrica (a); condutividade térmica x grau de saturação(b); condutividade térmica x umidade volumétrica (c).	149
Figura 41- Comparação dos valores de condutividade térmica	151
Figura 42 – Previsões da condutividade térmica com a umidade gravimétrica	155
Figura 43 – Previsões da condutividade térmica com o grau de saturação	155
Figura 44- Variação da temperatura com o tempo para o solo do Campo Experimental com umidade higroscópica de 1,42%	157
Figura 45- Relação do calor específico com a temperatura para o solo do Campo Experimental.	159
Figura 46- Relação do calor específico com a temperatura para o solo da Cidade dos Meninos.	160
Figura 47 – Variação do calor específico com a temperatura analisando-se o índice de vazios.	162
Figura 48 – Curva característica em função do teor de umidade em peso.	163
Figura 49- Curva característica em função do teor de umidade volumétrica	164
Figura 50- Curva característica em função do grau de saturação.	165
Figura 51 –Curvas características em função do teor de umidade em peso para diferentes temperaturas: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.	166
Figura 52- Curva característica em função do teor de umidade volumétrica para corpos de prova submetidos a diferentes gradientes de temperaturas: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.	171
Figura 53 –Curvas características da Campo Experimental em função do	



teor de umidade em peso para diferentes temperaturas seguindo-se a trajetória de secagem.	174
Figura 54 –Curvas obtidas para o solo do Campo Experimental: (a) Curva Característica, (b) Condutividade hidráulica não saturada.	177
Figura 55 –Curvas obtidas para o solo da Cidade dos Meninos: (a) Curva Característica, (b) Condutividade hidráulica não saturada.	178
Figura 56 – Ensaio de condutividade hidráulica da amostra do Campo Experimental à 40°C: (a) variação de volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c)variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.	180
Figura 57 – Variação da condutividade hidráulica com a temperatura.	181
Figura 58- Variação da condutividade hidráulica intrínseca com a temperatura.	182
Figura 59 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo do Campo Experimental: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c) $\Delta V / V_m$ x temperatura, (d) $\alpha_T$ x temperatura.	185
Figura 60 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo da Cidade dos Meninos: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c) $\Delta V / V_m$ x temperatura, (d) $\alpha_T$ x temperatura.	186
Figura 61 – Variação da condutividades hidráulicas com a temperatura	189
Figura 62 – Ensaio para o solo do Campo Experimental na temperatura de 32°C: (a) variação da poropressão com o tempo; (b) variação de volume com o tempo.	191
Figura 63 – Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos na temperatura de 32,30°C: (a) variação da poropressão com o tempo; (b) variação de volume com o tempo.	192
Figura 64 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo do Campo Experimental: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c) $\Delta V / V_m$ x temperatura, (d) $\alpha_t$ x temperatura.	194
Figura 65 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo da	

Cidade dos Meninos: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c) $\Delta V / V_m$ x temperatura, (d) $\alpha t$ x temperatura.	195
Figura 66 – Comparação da variação da condutividade hidráulica medida e estimada com a temperatura: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.	196
Figura 67 – Calibração do transdutor de poropressão – nº00958	219
Figura 68 - Calibração do transdutor de poropressão – nº02858	219
Figura 69 – Calibração do medidor de variação volumétrica	220
Figura 70– Calibração do transdutor de poropressão(nº95290393) em função da temperatura	221
Figura 71– Calibração do transdutor de poropressão(nº95290391) em função da temperatura	222
Figura 72 - Calibração do medidor de variação volumétrica.	223
Figura 73 – Calibração dos termopares com o auxílio do banho-maria	224
Figura 74 – Estabilização das temperaturas no termopar 1	225
Figura 75 – Estabilização das temperaturas no termopar 2	226
Figura 76- Equações de calibração dos termopares	227
Figura 77 – Ensaio de permeabilidade da amostra a temperatura ambiente: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo	229
Figura 78 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 50°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo.	230
Figura 79 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 100°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo	231
Figura 80 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um	

gradiente de 150°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo. 232

Figura 81 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 200°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo. 233

Figura 82 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 250°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo 234

Figura 83 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 300°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo . 235

Figura 84 – Ensaio de permeabilidade da amostra a temperatura ambiente: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo. 236

Figura 85 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 100°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo. 237

Figura 86 – Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 200°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo. 238

Figura 87 - Ensaio de permeabilidade da amostra submetida a um gradiente de 300°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo. 239

Figura 88 – Ensaio de permeabilidade da amostra a temperatura ambiente: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente

- hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 241
- Figura 89 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 30,5°C: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 242
- Figura 90 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 40,4°C: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 243
- Figura 91 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 50,6°C: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 244
- Figura 92 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 60,2°C: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 245
- Figura 93 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 68,8°C: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 246
- Figura 94 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 77,5°C: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 247
- Figura 95 – Ensaio de permeabilidade da amostra a temperatura ambiente: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo. 248
- Figura 96 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 30,8°C: (a) variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o

tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.	249
Figura 97 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 41,0°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.	250
Figura 98 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 51,4°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.	251
Figura 99 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 60,3°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.	252
Figura 100 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 69,8°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.	253
Figura 101 – Ensaio de permeabilidade com a amostra na temperatura de 77,5°C: (a)variação do volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.	254
Figura 102- Ensaio de calor específico para o solo do Campo Experimental, CP 1.	256
Figura 103- Ensaio de calor específico para o solo do Campo Experimental, CP 2.	256
Figura 104- Ensaio de calor específico para o solo do Campo Experimental, CP 3.	257
Figura 105- Ensaio de calor específico para o solo do Campo Experimental, CP 4.	257
Figura 106- Ensaio de calor específico para novas condições de compactação, $e=1,324$ .	258
Figura 107- Ensaio de calor específico para novas condições de	

compactação, $e=1,253$ .	258
Figura 108- Ensaio de calor específico para o solo da Cidade dos Meninos, CP 1.	259
Figura 109- Ensaio de calor específico para o solo da Cidade dos Meninos, CP 2.	259
Figura 110- Ensaio de calor específico para o solo da Cidade dos Meninos, CP 3.	260
Figura 111- Ensaio de calor específico para o solo da Cidade dos Meninos, CP 4.	260
Figura 112- Ensaio de calor específico para novas condições de compactação, $e=0,75$ .	261
Figura 113- Ensaio de calor específico para novas condições de compactação, $e=0,84$ .	261
Figura 114- Determinação do peso no tempo zero – CP1 (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	265
Figura 115- Determinação do peso no tempo zero – CP2: (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	266
Figura 116- Determinação do peso no tempo zero – CP3: (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	267
Figura 117- Determinação do peso no tempo zero – CP4: (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	267
Figura 118- Determinação do peso no tempo zero – CP5: (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	267
Figura 119- Determinação do peso no tempo zero – CP6 (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	268
Figura 120- Determinação do peso no tempo zero – CP7: (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	268
Figura 121- Determinação do peso no tempo zero – CP8 (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	268
Figura 122- Determinação do peso no tempo zero – CP9 (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	269
Figura 123- Determinação do peso no tempo zero – CP10 (a) após o contato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de $100^{\circ}\text{C}$ .	269

Figura 124- Determinação do peso no tempo zero – CP11: (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	269
Figura 125- Determinação do peso no tempo zero – CP12 (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	270
Figura 126- Determinação do peso no tempo zero – CP13 (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	270
Figura 127- Determinação do peso no tempo zero – CP14 (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	270
Figura 128- Determinação do peso no tempo zero – CP15: (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	271
Figura 129- Determinação do peso no tempo zero – CP16 (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	271
Figura 130- Determinação do peso no tempo zero – CP17 (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	271
Figura 131- Determinação do peso no tempo zero – CP18 (a) após o com-tato com o solo, (b) após secagem em estufa. Temperatura de 100°C.	272
Figura 132- Ensaio de variação de volume para o solo do Campo Experimental, estágio de 30°C.	279
Figura 133- Ensaio de variação de volume para o solo do Campo Experimental, estágio de 40°C.	280
Figura 134- Ensaio de variação de volume para o solo do Campo Experimental, estágio de 50°C.	281
Figura 135- Ensaio de variação de volume para o solo do Campo Experimental, estágio de 60°C.	282
Figura 136- Ensaio de variação de volume para o solo do Campo Experimental, estágio de 70°C.	283
Figura 137- Ensaio de variação de volume para o solo do Campo Experimental, estágio de 80°C.	284
Figura 138- Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos, estágio de 30°C.	285

Figura 139- Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos, estágio de 40°C.	286
Figura 140- Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos, estágio de 50°C.	287
Figura 141- Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos, estágio de 60°C.	288
Figura 142- Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos, estágio de 70°C.	289
Figura 143- Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos, estágio de 80°C.	290



## Lista de tabelas

Tabela 1 – Técnicas para Controle e Remediação de Áreas Contaminadas(Evans, 1991).	39
Tabela 2- Custo para técnicas de remediações. (Wood, 1997).	41
Tabela 3 – Propriedades de alguns químicos orgânicos que tem sido encontrados em áreas contaminadas.	52
Tabela 4 – Analogias de Fluxo (Mitchell, 1993).	54
Tabela 5 – Propriedades Térmicas do Solo (modificado Mitchell, 1993)	56
Tabela 6 - Fenômenos de fluxo acoplado e fluxo direto ( Mitchell, 1975).	64
Tabela 7 – Propriedades físicas da água em estado líquido	83
Tabela 8 - Caracterização geotécnica dos solos	89
Tabela 9–Índices físicos obtidos para a encosta do Campo Experimental	90
Tabela 10– Índices Físicos obtidos para amostras da Cidade dos Meninos	91
Tabela 11 – Cátions Trocáveis e Análise Química– Campo Experimental	94
Tabela 12- Cátions Trocáveis e Análise Química– Cidade dos Meninos	95
Tabela 13 – Variações de peso específico e umidade com a pressão de compactação	102
Tabela 14 – Parâmetros necessários nas análises	105
Tabela 15 – Dados após compactação dos corpos de prova - Campo Experimental	136
Tabela 16 – Dados após compactação dos corpos de prova - Cidade dos Meninos	136
Tabela 17 – Dados iniciais dos Corpos de Prova ensaiados – Campo Experimental	137

Tabela 18 – Dados iniciais de cada corpo de prova – Cidade dos Meninos	137
Tabela 19 – Dados Iniciais dos Corpos de Prova	145
Tabela 20 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica - Campo Experimental	146
Tabela 21 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – Cidade dos Meninos	146
Tabela 22 – Dados Iniciais dos Corpos de Prova	156
Tabela 23 – Dados dos corpos de prova utilizados na determinação do calor específico	156
Tabela 24- Valores de calor específico com relação a umidade e temperatura para o solo do Campo Experimental.	158
Tabela 25- Valores de calor específico com relação a umidade e temperatura para o solo da Cidade dos Meninos.	159
Tabela 26- Parâmetros das curvas características para o solo do Campo Experimental	168
Tabela 27- Parâmetros das curvas características para o solo da Cidade dos Meninos	168
Tabela 28- Parâmetros das curvas características x umidade volumétrica para o solo do Campo Experimental.	172
Tabela 29- Parâmetros das curvas características x umidade volumétrica para o solo da Cidade dos Meninos.	172
Tabela 30- Parâmetros das curvas características seguindo-se a trajetória de secagem para o solo do Campo Experimental.	174
Tabela 31- Parâmetros das equações de Van Genuchten.	176
Tabela 32 – Dados de cada corpo de prova ensaiados do solo do Campo Experimental	179
Tabela 33 – Dados de cada corpo de prova ensaiados do solo da Cidade dos Meninos.	179
Tabela 34 – Dados finais do ensaio do solo do Campo Experimental	187
Tabela 35 – Dados finais do ensaio do solo da Cidade dos Meninos	187
Tabela 36 – Comparação das condutividades hidráulicas obtidas	188
Tabela 37 – Dados dos corpos de prova ensaiados.	190

Tabela 38 – Resultados do ensaio de dissipação.	191
Tabela 39- Características dos elementos elétricos utilizados	218
Tabela 40– Dados iniciais dos corpos de prova do material natural seco ao ar.	263
Tabela 41– Parâmetros do solo ensaiado do material natural seco ao ar	263
Tabela 42 – Dados iniciais dos corpos de prova do material natural	263
Tabela 43 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material natural	264
Tabela 44 – Dados Iniciais dos Corpos de prova do material natural saturado	264
Tabela 45 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material natural saturado	264
Tabela 46 – Dados Iniciais dos corpos de prova após compactação	265
Tabela 47 – Parâmetros do solo ensaiado do Material aquecido a 50oC.	265
Tabela 48 – Dados Iniciais dos corpos de prova após compactação.	266
Tabela 49 – Parâmetros do solo ensaiado do Material aquecido a 100oC	266
Tabela 50 – Dados iniciais dos corpos de prova do material após a compactação.	272
Tabela 51 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material submetido a 200oC.	272
Tabela 52 – Dados Iniciais dos Corpos de prova do material após a compactação.	273
Tabela 53 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material submetido a 300oC.	273
Tabela 54 – Dados Iniciais dos corpos de prova do material após a compactação.	273
Tabela 55 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material submetido a 100oC e depois saturado.	274

Tabela 56 – Dados Iniciais dos Corpos de prova do material após a compactação	274
Tabela 57 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material submetido a 300oC e posteriormente saturado.	274
Tabela 58 – Dados iniciais dos corpos de prova após a compactação.	275
Tabela 59 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material natural	275
Tabela 60 – Dados iniciais dos corpos de prova do material após a compactação.	275
Tabela 61 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material submetido a 100oC.	276
Tabela 62 – Dados Iniciais dos corpos de prova do material após a compactação.	276
Tabela 63 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material submetido a 200oC.	276
Tabela 64 – Dados Iniciais dos corpos de prova do material após a compactação.	277
Tabela 65 – Parâmetros do solo ensaiado da curva característica do material submetido a 300oC.	277
Tabela 66– Parâmetros iniciais do solo ensaiado	279
Tabela 67– Parâmetros iniciais do solo ensaiado Cidade dos Meninos	285

## Lista de Símbolos

$a$  – umidade volumétrica do ar

Ativ. - atividade

$\alpha$  - fator de tortuosidade para difusão de gases em solos

$\alpha_S$  – coeficiente térmico da expansão cúbica do mineral sólido.

$\alpha_{ST}$  – coeficiente físico-químico estrutural da variação de volume devido a temperatura

$\alpha_w$  - coeficiente térmico de expansão da água do solo

$\beta$  - fator de conversão de unidades

$C$  – fator de forma

$c$  - calor específico

$c_a$  - calor específico do ar

$c_n$  - calor específico do solo

$c_s$  – calor específico dos sólidos

$c_w$  - calor específico da água na fase líquida

$C(\theta)$  – capacidade de aquecimento volumétrica do meio poroso

$C_a$  – capacidade de aquecimento volumétrico do ar

$C_M$  - capacidade de aquecimento volumétrico do meio seco

$C_s$  - capacidade de aquecimento volumétrico dos sólidos

$C_w$  – capacidade de aquecimento volumétrica da fase líquida

$d$ - diâmetro do cilindro

$D$  - difusividade térmica

$D_0$  – difusividade molecular do vapor d'água no ar

$D_S$  - diâmetro médio dos grãos

$D_T$ - difusividade térmica da água

$D_{Ta}$  - coeficiente relacionando com o aquecimento da água adsorvida

$D_{TL}$  – difusividade térmica do líquido

$D_{TV}$  – difusividade térmica do vapor

$D_{\theta}$ - difusividade isotérmica da água

$D_{\theta L}$  – difusividade isotérmica do líquido

$D_{\theta V}$  – difusividade isotérmica do vapor

$\delta$  - delta de Kronecker.

$\Delta T$  – variação de temperatura

$e$  – índice de vazios

$\bar{e}$  - índice de vazios efetivos

$e_o$  – água adsorvida no índice de vazios

$\varepsilon_{VT}$  - deformação volumétrica devido a variação de temperatura

$\phi$  - diâmetro do corpo de prova

$g$  - gravidade

$\gamma$  - peso específico

$\gamma_d$  - peso específico seco

$\gamma_w$  - peso específico da água

$h$  – umidade relativa do ar nos poros

$i$  – vetor unitário na direção vertical

$i_h$  - gradiente hidráulico

$i_t$  - gradiente térmico

IP – índice de plasticidade

$k$  - condutividade hidráulica

$k_{\theta}$  - condutividade hidráulica não saturada

$L$  - calor latente de vaporização da água

$L_0$  - calor latente de vaporização numa dada temperatura de referência  $T_0$

$L_{ij}$  – coeficiente acoplados

LL – limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

$\lambda$  - condutividade térmica

$\lambda_e$  - condutividade térmica normalizada

$\lambda_{ij}$  - condutividade térmica de um meio poroso úmido

$\lambda_q$  - condutividade térmica do quartzo

$\lambda_s$  - condutividade térmica do solo

$\lambda_{sat}$  - condutividade térmica saturada

$\lambda_{seco}$  - condutividade térmica seca

$\lambda_w$  - condutividade térmica da água

M - coeficiente de variação de volume  
n - porosidade  
 $\mu$  - viscosidade do permeante  
 $\nu$  - viscosidade cinemática do fluido  
p – pressão parcial do vapor de água nos vazios  
P – pressão total de gás nos vazios  
 $q_h$  - fluxo de água  
 $q_{liq}$  – fluxo líquido  
 $q_m$  - fluxo de umidade  
 $q_t$  - fluxo de calor  
 $q_{vap}$  – fluxo de vapor  
 $\theta$  - teor de umidade volumétrica  
 $\theta_i$  – teor de umidade volumétrica do ponto de inflexão  
 $\theta_r$  – teor de umidade volumétrica residual  
 $\theta_s$  – teor de umidade volumétrica saturado  
r – distância radial da fonte  
R – constante universal dos gases  
 $\rho_0$  – densidade do vapor de água saturado  
 $\rho_d$  = massa específica seca do solo  
 $\rho_v$  . densidade do vapor d'água  
 $\rho_w$  – densidade da água  
S - grau de saturação  
 $S_h$  - teor térmico do meio poroso  
t – tempo  
 $t_{50}$  – tempo no qual ocorre 50% da mudança de temperatura no centro da amostra  
T - Temperatura  
 $T_{50}$  – fator tempo para 50% de variação da temperatura  
 $\sigma$  - tensão superficial da água  
V - volume de fluido  
 $V_m$  - volume total a temperatura inicial.  
 $V_s$  – volume dos Minerais Sólidos  
 $V_v$  – volume total de vazios

$\bar{V}_v$  - volume efetivo de vazios

$V_{vo}$  – volume de água adsorvida

$V_w$  – volume de água dos vazios

$\upsilon$  - fator fluxo massa

$\upsilon$  - energia térmica

$w$  - umidade gravimétrica

$w_{nat}$  – umidade natural do solo

$W$  - calor de molhamento diferencial

$X_j$  – força governante

$\Psi$  - carga total de sucção

$\Psi_i$  – sucção correspondente à umidade volumétrica do ponto de inflexão( $\theta_i$ )

$\Psi_r$  – sucção correspondente à umidade volumétrica residual( $\theta_r$ )

$\xi$  – razão da variação do gradiente de temperatura nos poros completamente ocupados por ar em relação ao gradiente de temperatura total



*“...Viver e não ter a vergonha de ser feliz  
E cantar, e cantar, e cantar,  
a beleza de ser um eterno APRENDIZ  
Ah meu Deus,  
eu sei que a vida poderia ser bem melhor e será  
Mais isso não impede que eu repita:  
é bonita, é bonita e é bonita...”*