



**Mônica Priscilla Hernández Moncada**

**Estudo em Laboratório de Características de Colapso e  
Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor  
Cáustico em um Solo Laterítico**

**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. Tácio M. P de Campos  
Co-Orientador: Prof. Franklin dos Santos Antunes

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2004



**Mônica Priscilla Hernandez Moncada**

**Estudo em laboratório de características de colapso e  
transporte de solutos associados à infiltração de licor  
cáustico em um solo laterítico**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre 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. Franklin dos S. Antunes**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Leandro de Moura Costa Filho**

UFF

**Prof. Lúcio Flávio de S. Villar**

UFMG

**Prof. José T. Araruna Jr.**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de fevereiro de 2004

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

### **Mônica Priscilla Hernández Moncada**

Graduou-se em Engenharia Hidráulica pela Universidade Nacional de la Patagônia em 2000. Exerceu diversas atividades em áreas da engenharia civil, nos setores público e privado.

#### Ficha Catalográfica

Moncada, Mônica Priscilla Hernandez

Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico / Mônica Priscilla Hernandez Moncada; orientador: Tácio M. P. de Campos, Franklin dos Santos Antunes - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

219 f. :il ; 30 cm.

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Transporte de solutos. 3. Ensaio de laboratório. 4. Solo laterítico. 6. Licor cáustico. I. Campos, Tácio M. P. de. II. Antunes, Franklin dos Santos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título

CDD: 624

À minha família,  
pelo amor e apoio

## Agradecimentos

Ao CNPq e PUC-Rio pelo apoio financeiro, sem os quais, este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Prof. Tácio M. Pereira de Campos, pela dedicação, disponibilidade, atenção e paciência.

Ao Prof. Franklin Antunes, pelo estímulo, apoio e a amizade.

À minha família pela ajuda, a confiança e, o amor. Gracias por el aguante.

À Silvia, minha *mãe* carioca.

Ao Prof. Oscar Moreno e, ao pessoal do Laboratório de Geotecnia da Universidade de la Patagônia, pelos anos de trabalho juntos.

Aos amigos, de aqui e de lá, pelas saídas, filmes, chopes, os passeios e, simplesmente por estar.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnia: Ciro, Anna Paula, Leonardo, Rafael, Patrício, Ricardo, Patricia, pelas ajudas e os papos. Em especial a Leonardo pelas fotos que estão nesta dissertação.

Ao pessoal do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio: Sr. José, Eng. William e, Josué, pela sua dedicação e ajuda. Ao Amaury, pela constante ajuda, e pelos momentos de descontração.

Ao Dr. Leandro M. Costa Filho, que viabilizou a obtenção das amostras de solo e licor utilizadas no presente trabalho.

À Anna Roxo, pela constante vontade e dedicação para responder minhas dúvidas.

## Resumo

Moncada, Mônica Priscilla Hernandez; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Antunes, Franklin dos Santos. **Estudo em Laboratório de Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico.** Rio de Janeiro, 2004. 219p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho se analisam as características de colapso de um solo laterítico submetido à percolação de um licor cáustico a diferentes concentrações. O solo é uma areia quartzosa com uma pequena fração de finos caulíníficos. O licor é um efluente industrial, resultante da produção de alumínio, a base de soda cáustica.

Mediante o presente estudo, determinou-se o efeito da infiltração do licor cáustico sobre três aspectos: colapsividade, transporte de solutos e características de sucção. Isto foi feito através de um programa experimental que incluiu ensaios de caracterização física-química do solo e do licor, ensaios edométricos, em edômetros especiais, para avaliar as características de colapso e de transporte de solutos, e ensaios de sucção pelo método do papel filtro.

Os resultados do programa experimental mostraram que o solo é colapsível em presença de água, sendo sua colapsividade aumentada em presença do licor cáustico. Também indicaram que os parâmetros de transporte e sucção são fortemente afetados pela percolação do licor. A mudança destes parâmetros é função da concentração do licor.

## Palavras-chave

Colapso. Transporte de Solutos. Ensaio de Laboratório. Solo Laterítico. Licor Cáustico.

## Abstract

Moncada, Mônica Priscilla Hernandez. de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor), Antunes, Franklin dos Santos (Advisor). **Laboratory Evaluation of Collapse and Solute Transport Characteristics of a Lateritic Soil Under Infiltration of a Caustic Liqueur**. Rio de Janeiro, 2004. 219p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, characteristics of collapse of a laterítico soil submitted to percolation of a caustic liqueur to different concentrations are analysed. The soil comprises a quartzitic sand with a small fraction of kaolinitic clay. The liqueur is a caustic fluid, from an aluminium industry.

In the present study, effects of the caustic liqueur infiltration were observed considering three aspects: collapse, solute transport and soil suction characteristics. This was done through an experimental program that included physical and chemical characterization of the soil and liqueur, special oedometer tests to evaluate simultaneously collapse characteristics and solute transport, and suction tests using the filter paper method.

The results of the experimental program showed that the soil suffers volume change in presence of water, and its colapsivity is increased in presence of the caustic liqueur. They also indicated that the transport and suction parameters are affected strongly by the percolation of the liqueur.

## Keywords

Collapse. Solute Transport. Laboratory Testing. Lateritic Soil. Caustic Liqueur

# Sumário

<b>1. Introdução</b>	24
<b>2. Revisão bibliográfica</b>	26
<b>3. Equipamentos e Metodologias de Ensaio</b>	37
3.1. Introdução	37
3.2. Requerimentos do sistema	39
3.3. Descrição dos equipamentos utilizados	40
3.3.1. Edômetro ADS	40
3.3.1.1. Célula de Adensamento	41
3.3.1.2. Sistemas de Medição	43
3.3.1.3. Sistema de Aplicação da Carga Hidráulica	44
3.3.1.4. Sistema de Aquisição de Dados	45
3.3.2. Câmaras de Equalização	46
3.3.3. Células Edométricas modificadas	47
3.4. Metodologias de Ensaio	49
3.4.1. Ensaio Edométrico no Edômetro ADS	49
3.4.1.1. Moldagem e Montagem do corpo de provas	49
3.4.1.2. Execução do ensaio	50
3.4.2. Ensaio Edométrico nas Células Edométricas Modificadas	52
3.4.3. Ensaio de Sucção	52
<b>4. Caracterização do Solo e do Licor Cáustico</b>	56



4.1. Introdução	56
4.2. Características físico-químicas do licor cáustico	56
4.3. Ensaio de Caracterização do solo	59
4.3.1. Caracterização física	60
4.3.2. Caracterização físico-química	66
4.3.3. Caracterização mineralógica	76
<b>5. Ensaio de Adensamento e Colapsividade</b>	<b>80</b>
5.1. Introdução	80
5.2. Ensaio Executados	81
5.2.1. Ensaio Tipo 1	81
5.2.2. Ensaio Tipo 2	92
5.2.3. Ensaio Tipo 3	94
5.3. Comentários finais	99
5.3.1. Ensaio Tipo 1	99
5.3.2. – Ensaio Tipo 2	99
5.3.3. – Ensaio Tipo 3	100
<b>6. Parâmetros de Transporte</b>	<b>101</b>
6.1. Introdução	101
6.2. Conceitos básicos	101
6.2.1. Processos Físicos	104
6.2.2. Processos Bio-Físico-Químicos	107
6.2.2.1. Efeitos de Retardamento ou Aceleração	107
6.2.2.2. Efeitos de Degradação ou Decaimento	111
6.2.2.3. Sorção	114
6.2.3. Equação do Transporte de Massa Unidimensional através de Meios Porosos Saturados	115
6.3. Determinação dos parâmetros	117
6.3.1. Determinação do coeficiente de Difusão Molecular Efetivo ( $D^*$ )	119
6.3.2. Fator de Retardamento (R)	123
6.3.3. – Coeficiente de Dispersividade ( $\alpha$ )	124

6.4. Ensaio Executados	126
6.5. Comentários Finais	135
<b>7. Curvas Características de Sucção</b>	<b>137</b>
7.1. Introdução	138
7.2. Conceitos Básicos	138
7.2.1. Sucção Total, Mátrica e Osmótica	138
7.2.2. Curva Característica de Sucção	140
7.2.3. Equações para a Curva Característica de Sucção	144
7.2.4. Métodos de Medição	147
7.3. Ensaio Executados	157
7.3.1. Resultados obtidos	159
7.3.1.1. Curvas Características dos materiais naturais	159
7.3.1.2 Curvas Características dos materiais contaminados	162
7.3.1.3.– Sucção Osmótica	163
7.4. Comentários Finais	165
<b>8. Interpretação e Análise dos resultados</b>	<b>166</b>
8.1. Introdução	166
8.2. Ensaio de Caracterização	166
8.2.1. Caracterização Física	166
8.2.2. Caracterização Físico-Química	169
8.2.3. Caracterização mineralógica	173
8.3. Ensaio de Adensamento e Colapsividade	177
8.4. Parâmetros de transporte	183
8.5. Curvas características de Sucção	185
8.6. Discussão dos resultados	188
<b>9. Conclusões e sugestões</b>	<b>192</b>
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>195</b>
<b>Apêndices</b>	<b>206</b>

Apêndice 1 – Equações para calcular o índice de vazios da fração fina	206
Apêndice 2 – Difrátogramas Ensaio Tipo 1 - C <sub>2</sub>	208
<b>Anexos</b>	216
Anexo 1 – Procedimentos de ensaio	216
Determinação de pH nos solos	216
Determinação da condutividade elétrica dos solos	217
Determinação da CTC dos solos, pelo método compulsivo de BaCl <sub>2</sub>	218

## Lista de figuras

### Capítulo 2

Figura 2.1 - Localização dos materiais analisados (Adaptado de Rao e Subba Rao, 1994)	27
Figura 2.2 - Características de compressibilidade das amostras ensaiadas (Adaptado de Rao e Subba Rao, 1994).	28
Figura 2.3 – Inchamento em amostras amolgadas e não amolgadas, pela percolação de solução cáustica (Adaptado de Rao e Subba Rao, 1994).	28
Figura 2.4 – Variação do Limite de Liquidez com o pH (Adaptado de Kumapley e Ishola, 1985).	29
Figura 2.5 - Variação da resistência não drenada com o pH (Adaptado de Kumapley e Ishola, 1985).	29
Figura 2.6 - Permeabilidade vs. volume de poros, para hidróxido de sódio com pH=13.0 (Adaptado de Lentz et al., 1985).	30
Figura 2.7 – Percolação com diferentes líquidos de teste, em argila caulínica (Adaptado de Simons e Reuter, 1985).	31
Figura 2.8 – Taxas de lavagem de alguns minerais com diferentes líquidos de teste, em argila caulínica (Adaptado de Simons e Reuter, 1985)	32
Figura 2.9 – Ensaio de granulometria com e sem efluente (Ignatius e Souza Pinto, 1991).	33
Figura 2.10 – Ensaio de adensamento (Ignatius e Souza Pinto, 1991).	33
Figura 2.11 – Ensaio de colapsividade (Ignatius e Souza Pinto, 1991).	33

### Capítulo 3

Figura 3.1 - Vista geral do edômetro ADS	40
Figura 3.2 – Célula de Adensamento montada	42
Figura 3.3 – Célula de Adensamento desmontada	42
Figura 3.4 – Secção transversal da célula de adensamento	43
Figura 3.5 – Vista da mini-balança montada	44

Figura 3.6 – Frasco de Mariotte montado	45
Figura 3.7 – Vista da conexão entre o Mariotte e a célula edométrica.	45
Figura 3.8– Câmara de Equalização montada	46
Figura 3.9 – Câmara de Equalização desmontada	47
Figura 3.10 – Vista geral das células montadas	48
Figura 3.11 – Células de adensamento desmontadas	48
Figura 3.12 – Secção transversal da célula edométrica modificada	49
Figura 3.13 – Extensão em latão para moldar corpos de provas	50
Figura 3.14 – Disposição dos papéis filtros na câmara de equalização.	54

#### Capítulo 4

Figura 4.1 – Variação do pH dos licores cáusticos com o teor alcalino	58
Figura 4.2 – Variação da Condutividade Elétrica dos licores cáusticos com o teor alcalino.	59
Figura 4.3 – Variação da Densidade dos licores cáusticos com o teor alcalino.	59
Figura 4.4 – Curvas Granulométricas dos materiais naturais.	61
Figura 4.5 – Curvas Granulométricas – Ensaio C <sub>1</sub>	62
Figura 4.6 – Curvas Granulométricas – Ensaio C <sub>2</sub>	63
Figura 4.7 – Curvas Granulométricas – Ensaio C <sub>3</sub>	63
Figura 4.8 – Curvas Granulométricas – Ensaio Tipo 3	64
Figura 4.9 – Ensaio de sedimentação com diferentes líquidos defloculantes	65
Figura 4.10 – Difratoograma dos solos do E2 – CN3 – Solo Natural	77
Figura 4.11 – Amostra Indeformada E2-CN3	78
Figura 4.12 – Amostra Indeformada E2-CN3	79
Figura 4.13 – Material sem contaminar E1-CS3, depois do ensaio de sedimentação.	79

#### Capítulo 5

Figura 5.1 – Vista da Base da Célula Edométrica, mostrando a perda de finos	82
Figura 5.2 – Variação do índice de vazios – Ensaio C <sub>1</sub>	86
Figura 5.3 – Variação da condutividade hidráulica – Ensaio C <sub>1</sub>	87
Figura 5.4 - Variação do índice de vazios – Ensaio C <sub>2</sub>	88
Figura 5.5 - Variação da condutividade hidráulica – Ensaio C <sub>2</sub>	88
Figura 5.6 - Variação do índice de vazios – Ensaio C <sub>3</sub>	90
Figura 5.7 – Variação da condutividade hidráulica – Ensaio 3	90

Figura 5.8 – Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico	91
Figura 5.9 – Variação do índice de vazios com o gradiente hidráulico	92
Figura 5.10 – Variação do coeficiente de permeabilidade - Ensaio Tipo 2	93
Figura 5.11 – Variação do índice de vazios - Ensaio Tipo 2	93
Figura 5.12 – Variação do coeficiente de permeabilidade para a concentração $C_1$	96
Figura 5.13 – Variação do índice de vazios para a concentração $C_1$	96
Figura 5.14 – Variação do coeficiente de permeabilidade para a concentração $C_2$	97
Figura 5.15 – Variação do índice de vazios para a concentração $C_2$	97
Figura 5.16 – Variação do coeficiente de permeabilidade para a concentração $C_3$	98
Figura 5.17 – Variação do índice de vazios para a concentração $C_3$	98

## Capítulo 6

Figura 6.1 – Mecanismos de transporte de massa (de Campos, 2002)	102
Figura 6.2 – Mecanismos de dispersão ou mistura mecânica,	105
Figura 6.3 – Tipo de transporte dominante de acordo com o número de Peclet	106
Figura 6.4 – Efeitos de filtração ou processos que limitam a migração de partículas	111
Figura 6.5 – Curva Breakthrough.	115
Figura 6.6 – Transporte 1D com fluxo permanente e solo homogêneo saturado	117
Figura 6.7 – Método do Regime Permanente (Shackelford, 1991)	119
Figura 6.8 – Método para obter $T_L$ (Shackelford, 1991)	120
Figura 6.9 – Método de Coluna com concentração constante (Shackelford, 1991)	120
Figura 6.10 – Curvas de Break-trough, quando $D^* \ll D_h$ (Shackelford, 1991)	121
Figura 6.11 – Curvas de Break-trough, quando $D^* = D_h$ (Shackelford, 1991)	122
Figura 6.12 – Determinação do fator de retardamento (R), para $Pe > 50$	124
Figura 6.13 – Determinação do fator de retardamento R, para $Pe < 50$ (Shackelford, 1994)	124
Figura 6.14 – Relação entre a Dispersão Hidrodinâmica e a velocidade média (Fontoura et al., 1987)	125
Figura 6.15 – Disposição geral do ensaio para determinar os parâmetros de transporte.	126
Figura 6.16 – Curva Breaktrough para o Ensaio $C_1$	127
Figura 6.17 – Curva Breaktrough para o Ensaio $C_2$	128
Figura 6.18 – Curva Breaktrough para o Ensaio $C_3$	128
Figura 6.19- Relação entre $\sigma$ e $D^*$ - Ensaio $C_1$	130
Figura 6.20 – Relação entre $\sigma$ e $D^*$ - Ensaio $C_3$	130

Figura 6.21 – Variação do pH dos efluentes – Ensaio C <sub>1</sub>	132
Figura 6.22 – Variação do pH dos efluentes – Ensaio C <sub>2</sub>	133
Figura 6.23 – Variação do pH do efluente – Ensaio C <sub>3</sub>	133
Figura 6.24 – Variação do conteúdo de ferro do efluente – Ensaio C <sub>1</sub>	133
Figura 6.25 – Variação do conteúdo de alumínio no efluente – Ensaio C <sub>1</sub>	134
Figura 6.26 - Variação do conteúdo de ferro do efluente – Ensaio C <sub>2</sub>	134
Figura 6.27 – Variação do conteúdo de alumínio do efluente – Ensaio C <sub>2</sub>	134
Figura 6.28 – Variação do conteúdo de ferro do efluente – Ensaio C <sub>3</sub>	135
Figura 6.29 – Variação do conteúdo de alumínio do efluente – Ensaio C <sub>3</sub>	135
Figura 6.30 – Variação da condutividade elétrica com a temperatura -Ensaio 3 (i=0,5)	136

## Capítulo 7

Figura 7.1 – Sistema que ilustra os conceitos de sucção total e mátrica ( <i>Marinho, 1997</i> )	138
Figura 7.2 - Influência Relativa de Parcelas de Sucção em uma Curva Característica ( <i>McQueen e Miller, 1974 – em Villar, 2002</i> )	139
Figura 7.3 – Curva Característica ( <i>Barbour, 1998</i> )	140
Figura 7.4 - Curva Característica Típica de um Solo Siltoso ( <i>Fredlund e Xing, 1994 – em Villar, 2001</i> )	141
Figura 7.5 – Formas de energia, e Mecanismos de armazenagem de água representados em uma curva característica de sucção ( <i>Barbour, 1998</i> )	141
Figura 7.6 – Influência de a) textura do solo, b) consolidação, e c) da compactação, em uma curva característica de sucção ( <i>Barbour, 1998</i> )	142
Figura 7.7 – Procedimentos Gráficos para obter os parâmetros a, n, m e $\Psi_r$ ( <i>Fredlung and Xing, 1994</i> )	146
Figura 7.8 – Influencia do parâmetro a na forma da curva característica, com n=2 e m=1 ( <i>Fredlung and Xing, 1994</i> )	146
Figura 7.9 – Influência do parâmetro n na forma da curva característica, com a=100 e m=1 ( <i>Fredlung and Xing, 1994</i> )	147
Figura 7.10 – Influencia do parâmetro m na forma da curva característica, com a=100 e n=2 ( <i>Fredlung and Xing, 1994</i> )	147
Figura 7.11 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro ( <i>Marinho, 1997</i> )	150
Figura 7.12 – Curvas de Calibração para o papel filtro Whatman N°42	152
Figura 7.13 – Curvas de Calibração para o papel filtro S&S N°589	153
Figura 7.14 – Curva de Calibração ( <i>Bulut et al, 2001</i> )	153

Figura 7.15 – Curvas de calibração para o papel filtro Fisher 9,54A (Houston et al., 1994)	154
Figura 7.16 – Curvas de Calibração papel filtro Whatman Nº 42 (Leong et al., 2002)	154
Figura 7.17 – Curvas de Calibração papel filtro S&S 589 (Leong et al.,2002)	155
Figura 7.18 – Influencia do tempo de equalização no método do papel filtro (Swarbrick, 1995).	156
Figura 7.19 - Curvas de acompanhamento da variação do peso do papel filtro, (Villar, 2002)	157
Figura 7.20 – Disposição dos papeis filtros para medir sucção total e mátrica na câmara de equalização	158
Figura 7.21 – Curvas Características de Sucção para o solo E1-CS3	160
Figura 7.22 – Curvas Características de Sucção para o solo E2-CN3	161
Figura 7.23 – Curvas Características de Sucção para o solo E3-CN2	161
Figura 7.24 – Curvas Características de Sucção - Ensaio C <sub>1</sub>	162
Figura 7.25 – Curvas Características de Sucção - Ensaio C <sub>2</sub>	162
Figura 7.26 – Curvas Características de Sucção – Ensaio C <sub>3</sub>	163
Figura 7.27 – Sucção Osmótica - Ensaio C <sub>1</sub>	164
Figura 7.28 – Sucção Osmótica - Ensaio C <sub>2</sub>	164
Figura 7.29 – Sucção Osmótica - Ensaio C <sub>3</sub>	164
Figura 7.30 – Curvas Características dos materiais naturais	165

## Capítulo 8

Figura 8.1 – Variação da granulometria - Ensaio C <sub>1</sub>	167
Figura 8.2 – Variação da granulometria - Ensaio C <sub>2</sub>	167
Figura 8.3 – Variação da Granulometria – Ensaio C <sub>3</sub>	168
Figura 8.4 - Variação da Granulometria – Ensaio Tipo 3	168
Figura 8.5 – Ensaio de Sedimentação com diferentes Líquidos defloculantes.	169
Figura 8.6 – Variação do pH do solo	170
Figura 8.7 – Variação da condutividade elétrica do solo	170
Figura 8.8 – Variação da capacidade de troca catiônica	171
Figura 8.9 – Variação do conteúdo de alumínio nos solos.	172
Figura 8.10 – Variação do conteúdo de ferro nos solos.	173
Figura 8.11 – Difratoograma do solo do E2 – CN3 – Ensaio C <sub>2</sub>	174



Figura 8.12 – Material Contaminado E1-CS3 – Ensaio 1( $i=1,0$ ), depois do ensaio de sedimentação.	175
Figura 8.13 – Material contaminado Ensaio 4, $C_1$ , depois do ensaio de sedimentação (material retido na #400).	176
Figura 8.14 - – Material contaminado Ensaio 4, $C_1$ , depois do ensaio de sedimentação (material retido na #400).	176
Figura 8.15 - % de Variação de índice de vazios correspondente a cada etapa de ensaio – Ensaio $C_1$	177
Figura 8.16 - % de Variação de índice de vazios correspondente a cada etapa de ensaio – Ensaio $C_2$	177
Figura 8.17 - % de Variação de índice de vazios correspondente a cada etapa de ensaio – Ensaio $C_3$	178
Figura 8.18 – Variação total do índice de vazios.	179
Figura 8.19 – Variação de $e/e_0$ para os distintos ensaios.	179
Figura 8.20 – Variação da relação $k_f/k_0$	180
Figura 8.21 - % de variação de $e$ - Ensaio Tipo 2	181
Figura 8.22 – Variação de $k$ - Ensaio Tipo 2	181
Figura 8.23 – Variação da relação $e_f/e_0$	182
Figura 8.24 – Variação da relação $k_f/k_0$	183
Figura 8.25 – Fator de Retardamento	184
Figura 8.26 – Variação do coeficiente $D_h$	185
Figura 8.27 – Curva característica de sucção mátrica - Ensaio $C_1$	186
Figura 8.28 – Curva característica de sucção mátrica - Ensaio $C_2$	186
Figura 8.29 – Curva característica de sucção mátrica - Ensaio $C_3$	187
Figura 8.30 – Curvas características dos materiais naturais	187
Figura 8.31 – Curvas características de sucção para os materiais contaminados	188
Figura 8.32 – Ampliação da curva característica - Ensaio $C_2$	190

## Lista de tabelas

### Capítulo 2

Tabela 2.1 - Propriedades físicas dos materiais analisados (Adaptado de Rao e Subba Rao, 1994)	27
Tabela 2.2 - Propriedades físicas e químicas dos solos analisados (Adaptado de Rao e Subba Rao, 1994)	27
Tabela 2.3 - Variação do coeficiente de permeabilidade (Adaptado de Pavilonsky, 1985)	30
Tabela 2.4 – Resumo dos ensaios de permeabilidade (Adaptado de Lentz et al., 1985).	31
Tabela 2.5 – Propriedades físicas e químicas dos solos ensaiados(Adaptado de Jozefaciuk et al., 2002).	34
Tabela 2.3 – Mudanças no conteúdo de argila depois do tratamento (Adaptado de Jozefaciuk et al., 2002).	34

### Capítulo 3

Tabela 3.1 - Resumo dos ensaios executados	38
--	----

### Capítulo 4

Tabela 4.1– Resumo das análises nas soluções de licor.	57
Tabela 4.2 – Propriedades dos licores cáusticos utilizados nos ensaios edométricos.	58
Tabela 4.3 - Densidade dos licores cáusticos utilizados nos ensaios edométricos.	58
Tabela 4.4 – Identificação dos solos ensaiados	60
Tabela 4.5 - Resumo da granulometria dos materiais ensaiados	61
Tabela 4.6 - Resumo da Granulometria – Ensaio C <sub>1</sub>	62
Tabela 4.7– Resumo de Granulometria – Ensaio C <sub>2</sub>	62

Tabela 4.8 - Resumo de Granulometria – Ensaio C <sub>3</sub>	63
Tabela 4.9 – Resumo de Granulometria – Ensaio Tipo 3	64
Tabela 4.10 - Resumo Sedimentação com diferentes líquidos defloculantes.	65
Tabela 4.11 – Valores de Gs para os solos naturais.	65
Tabela 4.12 – Valores de Gs para os solos do Ensaio 1	66
Tabela 4.13 – Valores de pH e Condutividade Elétrica para os solos naturais.	66
Tabela 4.14 – Valores de pH e Condutividade Elétrica – Ensaio C <sub>1</sub>	67
Tabela 4.15 – Valores de pH e Condutividade Elétrica – Ensaio C <sub>2</sub>	67
Tabela 4.16 – Valores de pH e Condutividade Elétrica – Ensaio C <sub>3</sub>	67
Tabela 4.17 - Valores de CTC e Superfície Específica para alguns minerais (Adaptado de Mitchell 1976)	68
Tabela 4.18 – Valores de CTC e Superfície Específica para alguns minerais argilosos (Adaptado de Yong, 2001)	69
Tabela 4.19 – Valores de CTC para os solos naturais	69
Tabela 4.20 – Valores de CTC para os solos do Ensaio C <sub>1</sub>	69
Tabela 4.21 – Valores de CTC para os solos do Ensaio C <sub>2</sub>	70
Tabela 4.22 – Valores de CTC para os solos do Ensaio C <sub>3</sub>	70
Tabela 4.23 - Propriedades de alguns argilo-minerais (Adaptado de Santamarina 2002).	71
Tabela 4.24 – Valores de Superfície Específica para os solos naturais	72
Tabela 4.25 – Valores de Superfície Específica para os solos do Ensaio C <sub>1</sub>	72
Tabela 4.26 – Valores de Superfície Específica para os solos do Ensaio C <sub>2</sub>	72
Tabela 4.27 – Valores de Superfície Específica para os solos do Ensaio C <sub>3</sub>	72
Tabela 4.28 – Valores de Densidade de carga para os solos naturais	73
Tabela 4.29 – Valores de Densidade de carga para os solos do Ensaio C <sub>1</sub>	73
Tabela 4.30 – Valores de Densidade de carga para os solos do Ensaio C <sub>2</sub>	74
Tabela 4.31 – Valores de Densidade de carga para os solos do Ensaio C <sub>3</sub>	74
Tabela 4.32 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos naturais	74
Tabela 4.33 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos do Ensaio C <sub>1</sub>	75
Tabela 4.34 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos do Ensaio C <sub>2</sub>	75
Tabela 4.35 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos do Ensaio C <sub>3</sub>	75
Tabela 4.36 – Ensaio de Ataque Sulfúrico	76
<b>Capítulo 5</b>	
Tabela 5.1 – Características dos ensaios edométricos Tipo 1	81
Tabela 5.2 - Calculo da perda de finos – Ensaio C <sub>1</sub>	83

Tabela 5.3 - Calculo da perda de finos – Ensaio C <sub>2</sub>	83
Tabela 5.4 - Calculo da perda de finos – Ensaio C <sub>3</sub>	83
Tabela 5.5 – Resumo dos índices físicos – Ensaio C <sub>1</sub>	84
Tabela 5.6 - Resumo dos índices físicos – Ensaio C <sub>2</sub>	84
Tabela 5.7 - – Resumo dos índices físicos – Ensaio C <sub>3</sub>	85
Tabela 5.8 - Resumo dos valores de e e $\square$ e, para a fase de <i>saturação</i> com água e carregamento - Ensaio C <sub>1</sub> .	85
Tabela 5.9 – Resumo da variação de e, $\square$ e e k, para a fase de percolação do licor – Ensaio C <sub>1</sub> .	86
Tabela 5.10 - Resumo da variação de $\square$ e, nas diferentes etapas do ensaio – Ensaio C <sub>1</sub>	86
Tabela 5.11 - Resumo dos valores de e, para a fase de saturação com água - Ensaio C <sub>2</sub>	87
Tabela 5.12 - Resumo da variação de e, e k, para a fase de percolação do licor– Ensaio C <sub>2</sub>	87
Tabela 5.13 - Resumo da variação de $\square$ e, nas diferentes etapas do ensaio – Ensaio C <sub>2</sub>	88
Tabela 5.14 - Resumo dos valores de e, para a fase de saturação com água - Ensaio C <sub>3</sub>	89
Tabela 5.15 - Resumo da variação de e, e k, para a fase de percolação do licor– Ensaio C <sub>3</sub>	89
Tabela 5.16– Resumo da variação de $\square$ e, nas diferentes etapas do ensaio – Ensaio C <sub>3</sub>	89
Tabela 5.17 – Resumo dos índices físicos – Ensaio Tipo 2	92
Tabela 5.18 – Resumo da variação de e, e k - Ensaio Tipo 2	93
Tabela 5.19 - Resumo da variação de $\square$ e, nas diferentes etapas do ensaio	94
Tabela 5.20 – Valores de G <sub>s</sub>	94
Tabela 5.21 – Características dos ensaios edométricos - Tipo 3.	95
Tabela 5.22 – Resumo dos índices físicos – Tipo 3	95
Tabela 5.23 – Resumo da variação de e, e k, para a etapa de percolação com licor.	98
Tabela 5.24 – Resumo da variação total de De <sub>t</sub>	99

## Capítulo 6

Tabela 6.1 - Fatores Intervenientes no Transporte de Contaminantes pelo Subsolo (de Campos, 2002)	103
---	-----

Tabela 6.2 - Classificação de compostos hidrofóbicos quanto à sua mobilidade no solo (apud Bewick, 1994).	109
Tabela 6.3 – Resumo Método do Regime Permanente	118
Tabela 6.4 – Resumo Método do Time-Lag	119
Tabela 6.5 – Resumo Método da Coluna	121
Tabela 6.6 – Características dos ensaios edométricos Tipo 1	125
Tabela 6.7 – Resumo dos parâmetros de Transporte – Ensaio C <sub>1</sub>	129
Tabela 6.8 – Resumo dos parâmetros de Transporte – Ensaio C <sub>2</sub>	129
Tabela 6.9 – Resumo dos parâmetros de Transporte – Ensaio C <sub>3</sub>	129
Tabela 6.10 – Resumo dos valores de a e D*	130
Tabela 6.11 – Valores de kd - Ensaio C <sub>1</sub>	132
Tabela 6.12 – Valores de kd – Ensaio C <sub>2</sub>	132
Tabela 6.13 – Valores de kd – Ensaio C <sub>3</sub>	132
Tabela 6.14 – Resumo dos valores de Fe(III) e Mn(II) – Ensaio C <sub>3</sub>	136

## Capítulo 7

Tabela 7.1 – Resumo de algumas equações propostas para a curva característica de sucção	144
Tabela 7.2 - Técnicas de medição de sucção (Marinho, 1997)	148
Tabela 7.3 – Resumo das leituras de saída de alguns instrumentos para medir sucção (Adaptado de Lee & Wray, 1995)	148
Tabela 7.4 – Técnicas usadas para calibração do papel filtro (Marinho, 1997)	150
Tabela 7.5 – Curvas de Calibração para o papel Whatman N°42	151
Tabela 7.6 – Curvas de Calibração para o papel S & S N° 589	152
Tabela 7.8 – Tempo de equalização para o método do papel filtro (Leong et al., 2002)	155
Tabela 7.8 – Tempo de equilíbrio para medição de sucção total (Marinho, 1997)	156
Tabela 7.9 – Parâmetros da curva característica de sucção mátrica para os materiais naturais	161
Tabela 7.10 – Parâmetros da curva característica de sucção mátrica para os materiais contaminados	163

## Lista de Símbolos

C – concentração

C.C – concentração cáustica

C.E – condutividade elétrica

C.T.C – capacidade de troca catiônica

Dd – coeficiente de difusão

Dh – coeficiente de dispersão hidrodinâmica

D\* - coeficiente de difusão molecular

e - índice de vazios

$e_0$  – índice de vazios inicial

k – coeficiente de permeabilidade

kd – coeficiente de distribuição

LL – limite líquido

LP – limite de plasticidade

n – porosidade

Pe – número de Peclet

R – coeficiente de retardamento

S – grau de saturação

Sm – sucção mátrica

Som – sucção osmótica

St – sucção total

Sr – grau de saturação residual

v – velocidade de Darcy

$v_x$  – velocidade de percolação

w – conteúdo de umidade gravimétrico

$w_f$  - conteúdo de umidade gravimétrico do papel filtro

$\alpha$  – coeficiente de dispersividade

$\theta$  - conteúdo de umidade volumétrico

$\theta_i$  - conteúdo de umidade volumétrico do ponto de inflexão

$\theta_r$  - conteúdo de umidade volumétrico residual

$\theta_s$  - conteúdo de umidade volumétrico saturado

$\omega$  - coeficiente de tortuosidade

$\Psi$  - sucção

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

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

$\Psi_{EA}$  – valor de entrada de ar

$\Psi_{ESA}$ - valor de entrada secundaria de ar