



Monica Priscilla Hernandez Moncada

**Avaliação de Propriedades
Hidráulicas de Solos Tropicais Não
Saturados**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Rio de Janeiro, abril de 2008



Monica Priscilla Hernandez Moncada

**Avaliação de Propriedades
Hidráulicas de Solos Tropicais Não
Saturados**

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

Prof. Tácio Mauro Pereira De Campos

Presidente/Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Cláudio Palmeiro do Amaral

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Tavares Araruna Jr

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eduardo Dell’Avanzi

UFPR

Prof. Fernando Antônio Medeiros Marinho

EPUSP

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de abril de 2008

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

Monica Priscilla Hernandez Moncada

Graduou-se em Engenharia Hidráulica na Universidad Nacional de la Patagonia (Argentina) em 2000. Em 2004 obteve o título de Mestre em Engenharia Civil no programa oferecido pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Hernandez Moncada, Monica Priscilla

Avaliação de propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados / Monica Priscilla Hernandez Moncada ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos. – 2008.

324 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Solos tropicais. 3. Solos residuais. 4. Solos não saturados. 5. Curva de retenção de umidade. 6. Função de permeabilidade. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao CNPq, Capes e PRONEX pelo financiamento desta pesquisa.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pela oportunidade de realizar este doutorado.

Ao Prof. Tácio M. P. de Campos pela parceria nesta pesquisa, além do apoio, incentivo e ensinamento dados a todo o momento.

Ao Prof. Franklin Antunes, mestre e amigo que sempre incentivou e acreditou no meu trabalho.

À minha família pelo incessante incentivo e irrestrito apoio durante este desafio de minha vida.

Ao Departamento de Engenharia Civil, seus professores e funcionários. Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia pela colaboração ao longo deste tempo todo.

A todos os que colaboraram direta ou indiretamente com este trabalho.

Ao Eng. Gerhard Steger que além da amizade, contribuiu e muito nas análises numéricas.

Aos amigos e colegas que conviveram neste período: Adrian, Frank, Denise, Antonio Roberto, Patrício, Débora, Guilherme, Álvaro, Vinicius, Luciana, Viviana, Priscilla, Ana Carolina. Em especial as minhas “irmãzinhas”: Taíse, Bê, Carol e Thais, foi muito bom ter conhecido vocês.

Resumo

Hernandez Moncada, Monica Priscilla; de Campos, Tácio Mauro Pereira. **Avaliação de Propriedades Hidráulicas de Solos Tropicais Não Saturados**. Rio de Janeiro, 2008. 324p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho de pesquisa teve dois objetivos principais. O primeiro foi obter um índice geotécnico que permita avaliar o grau de intemperismo dos solos residuais. Para isto foram analisados dados correspondentes a perfis de alteração de Gnaisse característicos do município do Rio de Janeiro e executou-se a caracterização completa de um perfil específico de alteração de Gnaisse Facoidal. O segundo objetivo foi a determinação experimental das propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados. Como parte deste objetivo foram desenvolvidos novos instrumentos e modificados equipamentos existentes. A determinação da curva característica de sucção foi efetuada em seis solos residuais e em dois solos sedimentares. Na obtenção das curvas de retenção foram utilizadas as técnicas de translação de eixos, papel filtro e umidade relativa. Esta curva foi também definida a partir de resultados de ensaios de porosimetria de mercúrio. Avaliou-se a aplicabilidade dos modelos disponíveis na literatura no ajuste dos dados experimentais. A função de permeabilidade foi determinada em dois solos, um residual e um sedimentar, utilizando um permeâmetro de parede flexível com sucção controlada. Análises numéricas, efetuadas para avaliar o comportamento do equipamento utilizado, possibilitaram a definição de uma metodologia otimizada de interpretação dos resultados. A aplicabilidade dos modelos disponíveis na literatura na obtenção da função de permeabilidade foi analisada, tendo-se verificado a necessidade de introdução de mudanças nestas formulações para se conseguir reproduzir as medidas diretas efetuadas.

Palavras-chave

Solos Tropicais, Solos Residuais, Solos Não Saturados, Curva de Retenção de Umidade, Função de Permeabilidade.

Abstract

Hernandez Moncada, Monica Priscilla; de Campos, Tácio Mauro Pereira. **Evaluation of Hydraulic Properties of Unsaturated Tropical Soils.** Rio de Janeiro, 2008. 324p. DSc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present research work had two main objectives. The first was to obtain a geotechnical index for measuring the weathering degree of gneissic residual soils. For that it were analyzed data corresponding to typical weathering profiles found in the municipality of Rio de Janeiro and executed a complete characterization of a specific weathering profile of facoidal gneiss. The second objective was to determine, experimentally, the hydraulic properties of tropical unsaturated soils. As part of that new instruments were developed and existing equipments were modified. Moisture retention curves were determined for six residual soils and two sedimentary ones. The axis-translation technique, the filter paper method and the relative humidity one were employed to obtain such curves. Data from mercury intrusion porosimetry tests were also used to define these curves. The applicability of models available in literature to adjust the obtained experimental data was evaluated. The hydraulic conductivity function was determined for two soils, one residual and one sedimentary. A suction controlled, flexible wall permeameter set up was used for that. Numerical modeling was implemented to evaluate the performance of the experimental set up. This provided means for an optimized interpretation of the testing results. The applicability of models available in the literature to obtain the permeability functions was evaluated, being found the need to introduce changes in their formulation in order to be able to reproduce the obtained experimental data.

Keywords

Tropical soils, Residual soils, Unsaturated soils, Weathering index, Moisture retention curve, Hydraulic conductivity function.

Sumário

1.	Introdução	19
2.	Solos Residuais	21
2.1.	Introdução	21
2.2.	Classificação dos Solos Residuais	22
2.3.	Aspectos mineralógicos e químicos	24
2.3.1.	Índices químicos	24
2.3.2.	Índices mineralógicos e micro-morfológicos	29
2.4.	Estrutura	30
2.5.	Casos de Estudo	31
2.5.1.	Caso I	31
2.5.2.	Caso II	43
2.6.	Comentários Finais	68
3.	Solos Não Saturados	71
3.1.	Introdução	71
3.2.	Carga Total	72
3.3.	Sucção	73
3.4.	Curva Característica de Sucção	74
3.5.	Função de Permeabilidade	79
3.5.1.	Técnicas Experimentais	79
3.5.1.1.	Regime Permanente	80
3.5.1.1.1.	Carga Constante	80
3.5.1.1.2.	Vazão Constante	81
3.5.1.1.3.	Método da Centrífuga	82
3.5.1.2.	Regime Transiente	84
3.5.2.	Modelos para a Função de Permeabilidade	85
3.5.2.1	Euações Empíricas	86
3.5.2.2	Modelos Macroscópicos	88
3.5.2.1	Modelos Probabilísticos	88
3.6.	Comentários Finais	91
4.	Ensaio de Laboratório em Solos Não Saturados	92
4.1.	Introdução	92
4.1.1.	Controle da Sucção	92
4.1.2.	Variação de Volume	97
4.2.	Ensaio de Permeabilidade	105
4.3.	Medição da Sucção	114
4.3.1.	Técnicas de Medição Direta	115
4.3.1.1.	Tensiômetro Convencional	115
4.3.1.2.	Tensiômetro de Alta Capacidade	115
4.3.1.3.	Placa de Pressão	121
4.3.2.	Técnicas de Medição Indireta	123
4.3.2.1.	Método do Papel Filtro	123
5.	Determinação da função de permeabilidade e da curva característica de sucção	128
5.1.	Equipamento utilizado para determinar a permeabilidade não saturada	128
5.1.1.	Permeâmetro	128

5.1.2.	Variação de Volume Total	136
5.1.3.	Programa Experimental	138
5.1.4.	Procedimento de Ensaio	139
5.1.5.	Interpretação dos Resultados	140
5.1.6.	Modelagem Numérica	141
5.1.6.1.	Resumo dos resultados da modelagem numérica	157
5.2.	Determinação da curva característica de sucção	158
5.2.1.	Sensor de Umidade Relativa	158
5.2.2.	Tensiômetro de Alta Capacidade	163
5.2.3.	Porosimetria por Injeção de Mercúrio	165
6.	Determinação da Curva Característica de Sucção – Resultados	167
6.1.	Introdução	167
6.2.	Caracterização dos Materiais	167
6.3.	Curva Característica de Sucção	168
6.3.1.	Procedimento de ensaio	168
6.3.1.1.	Método do Papel Filtro	168
6.3.1.2.	Método da Umidade Relativa	169
6.3.2.	Resultados	176
6.3.2.1.	Perfil de alteração de Gnaisse	177
6.3.2.2.	Outros materiais	190
6.3.2.3.	Histerese	196
6.3.3.	Porosimetria por Injeção de Mercúrio	200
6.3.4.	Ajuste por Modelos	209
6.4.	Distribuição de Poros	218
6.5.	Comentários Finais	222
7.	Determinação da Função de Permeabilidade - Resultados	224
7.1.	Introdução	224
7.2.	Ajustes no sistema	224
7.3.	Metodologia de cálculo	228
7.4.	Ensaio executados	229
7.4.1.	Solo Residual B1	230
7.4.2.	Solo Sedimentar	238
7.5.	Comentários Finais	246
8.	Conclusões e Sugestões	249
8.1.	Conclusões	249
8.2.	Sugestões	253
	Referências Bibliográficas	255
	Anexo 1 – Análises das areias e Microscopia Digital	269
	Anexo 2 – Tensiômetro de Alta Capacidade	306
	Anexo 3 – Instrumentos utilizados e Gráficos de Cálculo dos Ensaio de Permeabilidade Não Saturada	314

Lista de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1	Classificação proposta por Vaz (1996)	23
Figura 2.2	Mapa Geológico Simplificado da Região Sul do Município do Rio de Janeiro	33
Figura 2.3	Locação dos perfis estudados	34
Figura 2.4	Relação Al_2O_3/SiO_2	35
Figura 2.5	Relação Álcalis x Sesquióxidos	36
Figura 2.6	Conteúdo de Álcalis dos diferentes litotipos de Gnaiss estudados	40
Figura 2.7	Correlação entre a Perda ao Fogo e o Conteúdo de Álcalis	41
Figura 2.8	Relação LOI vs e – Gnaiss Facoidal	42
Figura 2.9	Mapa geológico do município	43
Figura 2.10	Características texturais da rocha que ocorre no Local do Perfil.	44
Figura 2.11	Afloramento de Rocha a montante do Perfil	44
Figura 2.12	Locais de coleta das amostras	45
Figura 2.13	Difratograma da amostra de Rocha	50
Figura 2.14	Difratograma da amostra Trado	50
Figura 2.15	Difratograma da amostra B3	51
Figura 2.16	Difratograma da amostra B2	51
Figura 2.17	Difratograma da amostra B1	52
Figura 2.18	Difratograma da amostra B0	52
Figura 2.19	Difratograma do pó de feldspato da amostra B2	53
Figura 2.20	Ensaio ATD Rocha	54
Figura 2.21	Ensaio ATD para a amostra Trado	54
Figura 2.22	Ensaio ATD para a amostra B3	55
Figura 2.23	Ensaio ATD para a amostra B2	55
Figura 2.24	Ensaio ATD para a amostra B1	55
Figura 2.25	Ensaio ATD para a amostra B0	56
Figura 2.26	Resultados do ensaio de porosimetria	57
Figura 2.27	Equipamento utilizado na captura das imagens da Microscopia Digital	58
Figura 2.28	Detalhe da lâmina do Solo B0	60
Figura 2.29	Lâmina do Solo B0	61
Figura 2.30	Lâmina do Solo B1	62
Figura 2.31	Lâmina do Solo B2	63
Figura 2.32	Lâmina do Solo B3	64
Figura 2.33	Lâmina da Rocha	65
Figura 2.34	Relação entre o conteúdo de álcalis e sesquióxidos – Perfil São Gonçalo	66
Figura 2.35	Conteúdo de álcalis vs LOI – Perfil São Gonçalo	66
Figura 2.36	LOI vs ki, kr – Perfil São Gonçalo	67
Figura 2.37	LOI vs porosimetria MIP	68

Capítulo 3

Figura 3.1	Curva Característica típica – Solo Siltoso (Fredlund & Xing, 1994)	75
Figura 3.2	Forma geral da curva característica de sucção de acordo com a distribuição dos poros	76
Figura 3.3	Permeâmetro para solos não saturados usando a técnica de carga constante	81
Figura 3.4	Permeâmetro para solos não saturados com aplicação da técnica de vazão constante	82
Figura 3.5	Técnica centrífuga para ensaios de permeabilidade em solos não Saturados (em Lu & Likos, 2004)	83
Figura 3.6	Permeâmetro usado por Meerdink et al. (1996)	85

Capítulo 4

Figura 4.1	Equipamento edométrico com controle de sucção (Lloret, 1982)	94
Figura 4.2	Célula triaxial com controle de sucção (Carvalho, 2001)	94
Figura 4.3	Equipamento edométrico osmótico (Delage et al., 1992)	95
Figura 4.4	Equipamento triaxial com controle de vapor (Blatz & Graham, 2000)	96
Figura 4.5	Equipamento edométrico com controle de sucção (Barrera, 2002)	96
Figura 4.6	Célula triaxial modificada para ensaios em solos não saturados (Bishop & Donald, 1961)	98
Figura 4.7	Célula triaxial modificada (Wheeler, 1998)	98
Figura 4.8	Calibração por pressão (Wheeler, 1998)	99
Figura 4.9	Calibração por absorção de água (Wheeler, 1998)	99
Figura 4.10	Controladores de pressão / volume tipo GDS	100
Figura 4.11	Configuração do Equipamento (Laudahn et al., 2005)	100
Figura 4.12	Transdutores de Efeito Hall	101
Figura 4.13	LVDTs miniatura	101
Figura 4.14	Equipamento triaxial com controle de sucção – Universidad Politécnica de Cataluña (Barrera, 2002)	103
Figura 4.15	Determinação da variação de volume por processamento de imagens (Rifai et al., 2002)	104
Figura 4.16	Etapas do processamento de imagens	104
Figura 4.17	Comparação entre as variações de volume determinadas pela análise de imagens e por medição direta (Laloui et al., 2005)	104
Figura 4.18	Equipamento desenvolvido por Klute (1965)	106
Figura 4.19	Câmara triaxial para a determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar e à água (Barden & Pavlakis, 1971)	106
Figura 4.20	Permeâmetro desenvolvido por Fleureau & Taibi (1994)	107
Figura 4.21	Permeâmetro e esquema geral do sistema (Huang et al., 1995)	108
Figura 4.22	Permeâmetro e esquema geral do ensaio para sucções > 10kPa (Gan & Fredlund, 2000)	108
Figura 4.23	Permeâmetro e esquema geral do sistema (Samingan et al., 2003)	109
Figura 4.24	Permeâmetro e esquema geral do equipamento (Lu et al., 2006)	110

Figura 4.25	Esquema do permeâmetro e condições de contorno do modelo (Likos et al., 2005)	111
Figura 4.26	Distribuição dos vetores de velocidades para diferentes dimensões das pedras porosas de alto valor de entrada de ar (Likos et al., 2005)	111
Figura 4.27	Distribuição da sucção no interior do corpo de provas (Likos et al., 2005)	112
Figura 4.28	Previsão do tempo necessário para atingir o estado permanente, para diferentes solos, segundo o modelo (Likos et al., 2005)	112
Figura 4.29	Desenho original do Tensiômetro do Imperial College (Ridley & Burland, 1993)	116
Figura 4.30	Princípio de funcionamento do tensiômetro	117
Figura 4.31	Tensiômetro do Imperial College (Ridley & Burland, 1996)	117
Figura 4.32	Tensiômetro da Universidade de Saskatchewan (Guan & Fredlund, 1997)	118
Figura 4.33	Tensiômetro da Universidade de Trento (Tarantino & Mongiovi, 2002)	119
Figura 4.34	Comparação entre os valores esperados e medidos (Lourenço et al., 2006)	120
Figura 4.35	Placa de Pressão PUC-Rio (Carrillo, 1993)	121
Figura 4.36	Sistema de placa de pressão (Carrillo, 1993)	122
Figura 4.37	Tipos de fluxo para o papel filtro	124
Figura 4.38	Calibração papel filtro Whatman 42 (Oliveira & Marinho, 2006).	125

Capítulo 5

Figura 5.1	Permeâmetro PUC-Rio	130
Figura 5.2	Detalhes da Base e do Top Cap do Permeametro PUC-Rio	130
Figura 5.3	Medidor de variação de volume Tipo PUC	131
Figura 5.4	Esquema da seringa utilizada (Carrillo, 2000)	132
Figura 5.5	Layout 1	134
Figura 5.6	Layout 2	135
Figura 5.7	Sistema de medição de variação de volume	136
Figura 5.8	Recipiente para a medição de variação de volume	138
Figura 5.9	Curva Característica Areia Fina	142
Figura 5.10	Esquema do permeâmetro e condições de contorno do modelo	143
Figura 5.11	Distribuição da sucção para t=5 horas	144
Figura 5.12	Vetores de fluxo de água e ar para t=5 horas	144
Figura 5.13	Elementos analisados	145
Figura 5.14	Etapa de aplicação de sucção (plano vertical)	146
Figura 5.15	Etapa de aplicação de sucção (plano horizontal)	146
Figura 5.16	Distribuição da pressão no recipiente da base	147
Figura 5.17	Etapa de fluxo – Distribuição da sucção (plano vertical)	147
Figura 5.18	Distribuição da sucção (plano horizontal)	148
Figura 5.19	Distribuição da sucção (plano vertical) para t=4 dias	148
Figura 5.20	Distribuição das velocidades (plano horizontal) para t=4 dias	149

Figura 5.21	Distribuição da velocidades para diferentes alturas do corpo de provas (sucção de 20kPa)	149
Figura 5.22	Função de permeabilidade Areia Fina	150
Figura 5.23	Distribuição da sucção no interior do corpo de provas	152
Figura 5.24	Distribuição da velocidade	152
Figura 5.25	Distribuição do fluxo de água – h do corpo de provas=2 cm	153
Figura 5.26	Distribuição do fluxo de água – h do corpo de provas=8 cm	154
Figura 5.27	Modelo adotado, injeção de ar no centro da amostra (h=3cm)	155
Figura 5.28	Padrão de fluxo - Ar no centro da amostra	156
Figura 5.29	Distribuição da velocidade, para z=1,5cm - Ar no centro	156
Figura 5.30	Distribuição da sucção, para z=1,5cm - Ar no centro	157
Figura 5.31	Variação da umidade relativa para t=20°C	159
Figura 5.32	Sonda de RH e temperatura-FHA646-E1 (Ahlborn)	159
Figura 5.33	Sonda de RH e temperatura PUC-Rio	159
Figura 5.34	Sonda de RH e temperatura PUC-Rio	160
Figura 5.35	Sistema de Medição da Umidade Relativa	162
Figura 5.36	Variações da umidade relativa com a temperatura para diferentes soluções (Tang & Cui, 2005)	163
Figura 5.37	Novo Tensiômetro PUC-Rio	164
Figura 5.38	Sistema de saturação Tensiômetro PUC-Rio	164

Capítulo 6

Figura 6.1	Determinação da Umidade Relativa	170
Figura 6.2	Resposta da sonda sem isolamento (Sonda PUC)	171
Figura 6.3	Resposta da sonda com a utilização do recipiente	172
Figura 6.4	Resposta da sonda com a utilização do recipiente e a caixa de isopor	173
Figura 6.5	Medição da Umidade Relativa – Solo Sedimentar	174
Figura 6.6	Medição da Umidade Relativa – Solo Sedimentar	174
Figura 6.7	Medição da Umidade Relativa – Solo Residual de Gnaisse B1	175
Figura 6.8	Medição da Umidade Relativa – Solo Residual de Gnaisse B2	175
Figura 6.9	Resposta da sonda para umidades relativas > 98%	176
Figura 6.10	Curva característica de sucção – Perfil SG – Solo B0	178
Figura 6.11	Curva característica de sucção – Perfil SG – Solo B1	179
Figura 6.12	Curva característica de sucção – Perfil SG – Solo B2	181
Figura 6.13	Curva característica de sucção – Perfil SG – Solo B3	183
Figura 6.14	Relação entre o teor de umidade gravimétrico e o grau de saturação para o solo B3	184
Figura 6.15	Curva característica de sucção – Solo Residual B3	184
Figura 6.16	Variação do índice de vazios com o grau de saturação para os solos do perfil São Gonçalo	186
Figura 6.17	Curvas características de sucção – Perfil São Gonçalo	187
Figura 6.18	Comparação entre os valores de sucção total e sucção matricial para o solo B1	188

Figura 6.19	Comparação entre os valores de sucção total e sucção matricial para o solo B2	189
Figura 6.20	Comparação entre os valores de sucção total e sucção matricial para o solo B3	189
Figura 6.21	Curva característica de sucção – Solo Residual de Sienito	191
Figura 6.22	Curva característica de sucção – Solo Residual de Filito	192
Figura 6.23	Curva característica de sucção – Solo Coluvionar PUC	193
Figura 6.24	Curva característica de sucção – Solo Sedimentar Maranhão	194
Figura 6.25	Comparação entre as curvas características dos solos residuais de Sienito e de Filito	195
Figura 6.26	Diferentes trajetórias para o solo B1	196
Figura 6.27	Diferentes trajetórias para o solo B3	197
Figura 6.28	Variação do índice de vazios - Solo B3	199
Figura 6.29	Comportamento do Solo Residual de Gnaisse B2	199
Figura 6.30	Comportamento do Solo Sedimentar do Maranhão	200
Figura 6.31	Distribuição de poros - Solo Residual de Sienito	201
Figura 6.32	Distribuição de poros - Solo Residual de Filito	201
Figura 6.33	Distribuição de poros - Solo Coluvionar	202
Figura 6.34	Distribuição de poros - Solo Sedimentar do Maranhão	202
Figura 6.35	Curva característica por porosimetria Hg – B0	203
Figura 6.36	Curva característica por porosimetria Hg – B1	203
Figura 6.37	Curva característica por porosimetria Hg – B2	204
Figura 6.38	Curva característica por porosimetria Hg – B3	204
Figura 6.39	Curva característica por porosimetria Hg – Solo Residual de Sienito	205
Figura 6.40	Curva característica por porosimetria Hg – Solo Residual de Filito	205
Figura 6.41	Curva característica – Solo Sedimentar do Maranhão	206
Figura 6.42	Curva característica – Solo Coluvionar	206
Figura 6.43	Curva característica normalizada – Solo B2	208
Figura 6.44	Ajuste Curva característica Solo Residual de Sienito	211
Figura 6.45	Ajuste Curva característica Solo Residual de Filito	212
Figura 6.46	Ajuste Curva característica Solo Sedimentar	213
Figura 6.47	Ajuste Curva característica Solo Coluvionar	214
Figura 6.48	Ajuste Curva característica Solo Residual B0	215
Figura 6.49	Ajuste Curva característica Solo Residual B1	216
Figura 6.50	Ajuste Curva característica Solo Residual B2	217
Figura 6.51	Distribuição de poros - Solo Residual de Filito	219
Figura 6.52	Distribuição de poros - Solo Residual de Sienito	220
Figura 6.53	Distribuição de poros - Solo Coluvionar	220
Figura 6.54	Distribuição de poros - Solo Sedimentar	220
Figura 6.55	Distribuição de poros - Solo Residual de Gnaisse B0	221
Figura 6.56	Distribuição de poros - Solo Residual de Gnaisse B1	221
Figura 6.57	Distribuição de poros - Solo Residual de Gnaisse B2	221

Capítulo 7

Figura 7.1	Resposta do transdutor diferencial para uma vazão constante de $2,78 \cdot 10^{-5} \text{cm}^3/\text{s} = 0,10 \text{cm}^3/\text{h}$	225
Figura 7.2	Resposta do transdutor diferencial para uma vazão constante de $3,54 \cdot 10^{-4} \text{cm}^3/\text{s} = 1,27 \text{cm}^3/\text{h}$	226
Figura 7.3	Resposta do transdutor de pressão ao incremento de pressão em degraus	226
Figura 7.4	Varição de massa de água com a variação da temperatura sem proteção da balança e recipiente	227
Figura 7.5	Varição de massa de água com a variação da temperatura com proteção em isopor da balança e recipiente	227
Figura 7.6	Resposta típica do ensaio por carga constante (Solo B1)–Layout 2	232
Figura 7.7	Vazões no equilíbrio - Ensaio por carga constante (Solo B1)–Layout 1	232
Figura 7.8	Registro das pressões - Ensaio de Carga Constante – Solo B1 – Layout 1	233
Figura 7.9	Função de Permeabilidade Solo B1	235
Figura 7.10	Comparação entre os teores de umidade gravimétricos medidos e esperados.	236
Figura 7.11	Ajuste da função de permeabilidade pelo modelo de van Genutchen-Mualem	237
Figura 7.12	Ajuste dos dados de permeabilidade pelo modelo de van Genutchen-Mualem	237
Figura 7.13	Ensaio de Vazão Constante – Solo Sedimentar – Layout 2	239
Figura 7.14	Geração de pressão excessiva na base	240
Figura 7.15	Comparação entre os valores de sucção aplicados e os valores de sucção inferidos da curva característica de sucção	241
Figura 7.16	Função de permeabilidade Solo Sedimentar – Sucção aplicada	242
Figura 7.17	Função de permeabilidade Solo Sedimentar – Sucção inferida da Curva Característica	242
Figura 7.18	Ajuste da Função de Permeabilidade pelo modelo de van Genutchen-Mualem	243
Figura 7.19	Ajuste pelo modelo de Brooks & Corey (B-C Model) e pelo modelo macroscópico	244
Figura 7.20	Ajuste da função de permeabilidade para o solo residual B1	245
Figura 7.21	Ajuste da função de permeabilidade para o solo sedimentar do Maranhão	246

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1	Índices baseados na relação mobilizável/imobilizável	26
Tabela 2.2	Índices baseados no conteúdo de sílica	27
Tabela 2.3	Índices normalizados (Iweathered/Isound)	27
Tabela 2.4	Índices baseados na alteração dos feldspatos	28
Tabela 2.5	Índices baseados nas mobilidades dos elementos	28
Tabela 2.6	Outros índices	28
Tabela 2.7	Composição mineralógica dos diferentes litotipos de gnaiss	32
Tabela 2.8	Resumo das características dos perfis de alteração	32
Tabela 2.9	Relação Al_2O_3/SiO_2	35
Tabela 2.10	Relação Álcalis x Sesquióxidos	36
Tabela 2.11	Características dos perfis de alteração	37
Tabela 2.12	Índices Químicos vs LOI - Perfil de alteração de Leptinito	38
Tabela 2.13	Índices Químicos vs k_i - Perfil de alteração de Gnaiss Facoidal	38
Tabela 2.14	Índices Químicos vs LOI - Perfil de alteração de Gnaiss Facoidal	39
Tabela 2.15	LOI vs k_i , k_r - Gnaiss Facoidal	39
Tabela 2.16	Resumo dos ensaios de caracterização	46
Tabela 2.17	Análise Química Total	47
Tabela 2.18	Perda ao Fogo à 600°C	48
Tabela 2.19	Ataque Sulfúrico	49
Tabela 2.20	Complexo Sortivo (cmolc/kg)	49
Tabela 2.21	Identificação e quantificação dos minerais presentes	53
Tabela 2.22	Resultados dos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio	57
Tabela 2.23	Poros menores que 0,100µm	57
Tabela 2.24	Resultados de porosidade (%) obtidos na Microscopia Digital	59
Tabela 2.25	Índices Químicos x LOI	67

Capítulo 3

Tabela 3.1	Resumo de algumas equações propostas para a curva característica de sucção	77
Tabela 3.2	Equações empíricas para determinar a permeabilidade não saturada	87

Capítulo 4

Tabela 4.1	Métodos de medição da variação de volume total (Delage, 2002)	105
Tabela 4.2	Equipamentos para medir a permeabilidade em solos não saturados em laboratório	113
Tabela 4.3	Técnicas de medição de sucção (Marinho, 1997)	114
Tabela 4.4	Resumo das leituras de saída de algumas técnicas para medir sucção (Adaptado de Lee & Wray, 1995)	114
Tabela 4.5	Tempo de equilíbrio para medição de sucção total (Marinho, 1997)	126

Capítulo 5

Tabela 5.1	Parâmetros adotados no modelo	142
Tabela 5.2	Dados Areia Fina (Fredlund and Xing, 1994)	142
Tabela 5.3	Erro no valor de k (para sucção de 20kPa)	150
Tabela 5.4	Características dos Discos Porosos de Alto Valor de Entrada de Ar	151

Tabela 5.5	Perdas de carga nos discos porosos de alta entrada de ar	151
Tabela 5.6	Influência da altura do corpo de provas	153
Tabela 5.7	Influência da faixa de sucção no cálculo da permeabilidade	155
Tabela 5.8	Sucções aplicadas por soluções salinas saturadas	160
Tabela 5.9	Sucção para diferentes concentrações de NaCl(kPa)	161
Tabela 5.4	Sucção para diferentes concentrações de KCl(kPa)	161

Capítulo 6

Tabela 6.1	Características Gerais dos Solos	167
Tabela 6.2	Caracterização Física dos Solos	167
Tabela 6.3	Tempo necessário para o equilíbrio	173
Tabela 6.4	Dados Experimentais B0 – Sucção Matricial - C	177
Tabela 6.5	Dados Experimentais B1 – Sucção Matricial - C	178
Tabela 6.6	Dados Experimentais B1 – Sucção Total	179
Tabela 6.7	Dados Experimentais B2 – Sucção Matricial - C	180
Tabela 6.8	Dados Experimentais B2 – Sucção Total	181
Tabela 6.9	Dados Experimentais B3 – Sucção Matricial - C	182
Tabela 6.10	Dados Experimentais B3 – Sucção Total	183
Tabela 6.11	Parâmetros da Curva Característica – Perfil São Gonçalo	185
Tabela 6.12	Dados Experimentais Solo Residual de Sienito–Sucção Matricial-C	190
Tabela 6.13	Dados Experimentais Solo Residual de Filito – Sucção Matricial-C	191
Tabela 6.14	Dados Experimentais Solo Coluvionar – Sucção Matricial - C	192
Tabela 6.15	Dados Experimentais Solo Sedimentar – Sucção Matricial - C	193
Tabela 6.16	Parâmetros da Curva Característica	194
Tabela 6.17	Dados Experimentais – Trajetória de umedecimento – Solo B1	197
Tabela 6.18	Dados Experimentais – Trajetória de secagem - Solo B3	198
Tabela 6.19	Dados Experimentais – Trajetória de umedecimento – Solo B3	198
Tabela 6.20	Parâmetros de ajuste	210
Tabela 6.17	Comparação da Distribuição de poros	219

Capítulo 7

Tabela 7.1	Valores de Permeabilidade Saturada	230
Tabela 7.2	Resumo dos Ensaios de Permeabilidade – Solo B1	231
Tabela 7.3	Resultados dos Ensaios de Permeabilidade – Solo B1	234
Tabela 7.4	Diferença entre os valores de w_f real e w da CC – Solo B1	235
Tabela 7.5	Resumo dos Ensaios de Permeabilidade – Solo Sedimentar	238
Tabela 7.6	Resultados dos Ensaios de Permeabilidade – Solo Sedimentar	240

Lista de símbolos

A	Área
D	Diâmetro
e	Índice de vazios
g	Aceleração da gravidade
G_s	Peso específico dos grãos
i	Gradiente hidráulico
k, k_w	Coefficiente de permeabilidade à água
k_r	Coefficiente de permeabilidade relativo
k_s	Coefficiente de permeabilidade saturado
k_{ar}	Coefficiente de permeabilidade ao ar
K	Coefficiente de permeabilidade absoluta
M_w	Massa molecular do vapor de água
n	Porosidade do solo
p	Pressão
q	Vazão
r	Raio de poro
R	Constante universal dos gases
RH	Umidade Relativa
S	Grau de saturação
S_e	Grau de saturação efetivo
S_r	Grau de saturação residual
t	Temperatura em graus celsius
T	Temperatura absoluta
T_m	Tensão superficial do mercúrio
T_w	Tensão superficial da água
V	Volume
w	Conteúdo de umidade gravimétrico
w_s	Conteúdo de umidade gravimétrico saturado
w_{res}	Conteúdo de umidade gravimétrico residual
w_L	Limite de Liquidez
w_P	Limite de Plasticidade

Lista de símbolos gregos

$\Delta p, \Delta H$	Perda de carga
λ	Índice de ajuste do modelo de Brooks e Corey (1964)
μ	Coeficiente de viscosidade dinâmico da água
ν	Coeficiente de viscosidade cinemático da água
θ, θ_w	Conteúdo de umidade volumétrica
θ_R	Conteúdo de umidade volumétrica residual
θ_S	Conteúdo de umidade volumétrica saturado
θ_w, θ_{nw}	Ângulo de contato solo-fluido
ρ_d	Massa específica seca
ρ_w	Massa específica da água
ω	Velocidade angular de rotação
Ψ	Sucção
Ψ_b, Ψ_{ar}	Valor de entrada de ar
Ψ_{res}	Valor de sucção residual