



**Ricardo Moreira Soares**

**Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar  
Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos  
Co-Orientador: Franklin dos Santos Antunes

Rio de Janeiro, fevereiro de 2005



**Ricardo Moreira Soares**

**Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar  
Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ**

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

**Tácio Mauro Pereira de Campos**

Presidente/Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Franklin dos Santos Antunes**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**José Tavares Araruna Jr.**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Lúcio Flávio de Souza Villar**

UFMG

**Orêncio Monje Vilar**

EESC-USP

**José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de fevereiro de 2005

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

### **Ricardo Moreira Soares**

Graduou-se em Engenharia Civil com especialização em geotecnia na PUC-Rio em 2002. As principais áreas de interesse e linhas de pesquisa são: mecânica dos solos não saturados, geotecnia experimental e geotecnia ambiental.

#### Ficha catalográfica

Soares, Ricardo Moreira

Resistência ao cisalhamento de um solo coluvionar não-saturado do Rio de Janeiro, RJ / Ricardo Moreira Soares ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos ; co-orientador: Franklin dos Santos Antunes. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

v., 196 f.: il. ; 29,7 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Resistência ao cisalhamento. 3. Solo coluvionar. 4. Solo não-saturado. 5. Sucção. 6. Curva característica de sucção. 7. Ensaio de cisalhamento direto com controle de sucção. 8. Resistência à tração. I. de Campos, Tácio Mauro Pereira. II. Antunes, Franklin dos Santos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Maria Lúcia e José Evaldo, pela confiança, incentivo e amor incondicional.

Em memória da minha avó Eunyr, onde quer que esteja, sempre esteve e sempre estará presente em minha vida.

## Agradecimentos

Aos professores Tácio Mauro Pereira de Campos e Franklin dos Santos Antunes, pela paciência, orientação, dedicação, confiança e incentivo, ao longo da realização deste trabalho.

Aos demais professores do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos.

Aos amigos e funcionários do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, “Seu” Zé, Amaury e William, pela colaboração e apoio.

A CAPES e a PUC-Rio pelo apoio financeiro.

A todos os colegas da PUC-Rio.

Aos meus pais José Evaldo Siqueira Soares e Maria Lúcia Moreira Soares, meus irmãos Felipe Moreira Soares e Rafael Moreira Soares, pelo amor e carinho, os quais foram fundamentais para minha formação e sucesso.

Aos meus grandes amigos Fábio e Bernardo pelos vários momentos de estudos juntos e pela inestimável ajuda.

A todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, por este momento especial de minha vida.

## Resumo

Soares, Ricardo Moreira; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Antunes, Franklin dos Santos. **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ.** Rio de Janeiro, 2005. 196p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste presente trabalho buscou-se avaliar a características de resistência ao cisalhamento e da relação sucção-umidade de um solo tropical maduro encontrado no campo experimental II da PUC-Rio, localizado na cidade do Rio de Janeiro. Para a determinação da resistência ao cisalhamento deste solo, foram executados ensaios de cisalhamento direto em amostras submersas utilizando equipamento convencional e ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada em amostras com umidade natural. Os ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada foram executados utilizando o equipamento desenvolvido na PUC-Rio por de Campos (1988), na qual utiliza a técnica de translação de eixos desenvolvida por Hilf (1956) para o controle da sucção aplicada. Para a determinação da relação sucção-umidade, foram realizados ensaios para a medição da sucção utilizando-se o método do papel filtro. Através dos resultados deste ensaio foi possível a determinação da curva característica do solo em estudo. Foram realizados também ensaios de compressão diametral a fim de se estabelecer uma relação entre a resistência à tração deste solo versus sua sucção. Através da análise dos resultados experimentais, foi possível a determinação da envoltória de resistência ao cisalhamento em 3 dimensões considerando a proposta de Fredlund et al. (1978), na qual se baseia na utilização das variáveis de tensão ( $\sigma_n - u_a$ ) e ( $u_a - u_w$ ).

## Palavras-chave

Resistência ao cisalhamento; solo coluvionar; solo não saturado; sucção; curva característica de sucção, ensaio de cisalhamento direto com controle de sucção; resistência à tração.

## Abstract

Soares, Ricardo Moreira; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor); Antunes, Franklin dos Santos (Co-advisor). **Shear Strength of an Unsaturated Colluvium Soil From Rio de Janeiro, RJ.** Rio de Janeiro, 2005. 196p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this present work one searched to evaluate the characteristics of shear strength and the suction-moisture relation of a tropical mature soil found in experimental field II of PUC-Rio, located in the city of Rio de Janeiro. For the determination of the shear strength of this soil, direct shear test in submerged samples using conventional equipment and direct shear tests with controlled suction in samples with natural moisture had been executed. The direct shear tests with controlled suction had been executed using the equipment developed in PUC-Rio for De Campos (1988), in which it uses the technique of translation of axles developed by Hilf (1956) for the control of the applied suction. Tests for the measurement of the suction which uses the filter paper method was carried through for the determination of the suction-moisture relation. Through the results of this test, the determination of the soil-water characteristic curve of this soil was possible. Diametrical compression test had also been carried through in order to establish a relation between the tensile strength of this soil versus its suction. Through the analysis of the experimental results, the determination of the shear strength envelope in tri-dimensions was possible considering the proposal of Fredlund et al. (1978), on which it bases on the use of the variables of tension ( $\sigma_n - u_a$ ) and ( $u_a - u_w$ ).

## Keywords

Shear strength; colluvium soil; unsaturated soil; suction; soil-water characteristic curve; direct shear test with controlled suction; tensile strength.

# Sumário

<b>1. Introdução</b>	<b>26</b>
<b>2. Mecânica Dos Solos Para Meios Não-Saturados</b>	<b>30</b>
2.1. Fases Constituintes Do Solo Não Saturado e Suas Propriedades	30
2.2. Variáveis do Estado Tensional	31
2.3. Sucção	34
2.3.1. Componentes da Sucção	34
2.3.2. Métodos de Medição da Sucção	36
2.3.3. Curva Característica de Sucção	40
2.4. Resistência ao Cisalhamento de Solo Não Saturados	44
2.5. Técnica de Translação de Eixos	51
<b>3. Equipamento de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada da PUC-Rio</b>	<b>53</b>
3.1. Aspectos Históricos e Generalidades	53
3.2. Descrição do Equipamento CDSC da PUC-Rio	55
3.2.1. Câmara de compressão	57
3.2.2. Caixa de cisalhamento	59
3.2.3. Sistema de Aplicação de Pressões	61
3.2.4. Sistema de extração de bolhas	63
<b>4. Técnicas e Programa de Ensaios</b>	<b>64</b>
4.1. Rotinas e Técnicas de Ensaio	64
4.1.1. Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada	64
4.1.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	67

4.1.3. Ensaio para a Determinação da Curva Característica de Sucção Utilizando o Método do Papel Filtro	68
4.1.4. Ensaio de Compressão Diametral	71
4.2. Programa de Ensaio	74
4.2.1. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	74
4.2.2. Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada	75
<b>5. Características do solo utilizado</b>	<b>77</b>
5.1. Material Escolhido e Retirada dos Blocos	77
5.2. Descrição do Meio Físico	78
5.2.1. Localização	78
5.2.2. Clima	79
5.2.3. Geologia e Geomorfologia	79
5.3. Caracterização Física	81
5.3.1. Densidade Relativa dos Grãos ( $G_s$ )	81
5.3.2. Análise Granulométrica Conjunta	81
5.3.3. Limites de Consistência	83
5.3.4. Classificação do Solo	83
5.4. Análise Química	84
5.5. Análise Mineralógica	85
5.5.1. Microscopia Ótica	86
5.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	88
5.6. Curva Característica de Sucção	91
<b>6. Apresentação dos Resultados</b>	<b>94</b>
6.1. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	94
6.2. Ensaio de Compressão Diametral	96
6.3. Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada	98
6.3.1. Ensaio com Tensão Normal Líquida Constante	99
6.3.2. Ensaio com Sucção Mátrica Constante	111

<b>7. Análise e Interpretação dos Resultados</b>	<b>117</b>
7.1. Compressibilidade do Material	118
7.1.1. Amostras submersas	118
7.1.2. Amostras Não-Saturadas	119
7.2. Resistência ao Cisalhamento	120
7.2.1. Critério de Definição de Ruptura Utilizado	120
7.2.2. Resistência Submersa	121
7.2.3. Resistência Não-Saturada	124
7.2.4. Influência da Velocidade de Cisalhamento no Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada	131
7.3. Resistência à Tração	132
7.4. Relação entre Resistência à Tração e Coesão Aparente	135
7.5. Comparação dos Resultados Obtidos com Estimativas Indiretas da Resistência ao Cisalhamento Através de Formulações Simplificadas	136
7.6. Comparação dos Resultados Obtidos do Colúvio com Outros Materiais Encontrados na Literatura	139
<b>8. Conclusões e Sugestões</b>	<b>143</b>
8.1. Conclusões	143
8.1.1. Equipamento CDSC	143
8.1.2. Compressibilidade	143
8.1.3. Curva Característica	144
8.1.4. Resistência ao cisalhamento	144
8.1.5. Resistência à tração	145
8.2. Sugestões	146
8.2.1. Equipamento CDSC	146
8.2.2. Resistência ao cisalhamento	147
8.2.3. Resistência à tração	147
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>148</b>

<b>Apêndice A - Calibração dos Instrumentos Elétricos e Saturação do Disco Cerâmico</b>	<b>160</b>
A.1. Calibração dos Instrumentos Elétricos de Medição	160
A.2. Saturação do Disco Cerâmico de Alto Valor de Entrada de Ar	166
<b>Apêndice B - Curvas para a Determinação da Umidade do Papel Filtro</b>	<b>168</b>
<b>Apêndice C - Velocidade de cisalhamento</b>	<b>189</b>
C.1. Tempo de Ruptura em Ensaios Saturados	189
C.2. Tempo de Ruptura em Ensaios Não Saturados	190

## Lista de figuras

<b>Figura 1:</b> Variação do fator de segurança de uma encosta não saturada com a sucção (Ignacius et al.,1991).	27
<b>Figura 2:</b> Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar (adaptado de Fredlung & Rahardjo, 1993)	30
<b>Figura 3:</b> Variáveis de estado de tensão para solos não saturados.	33
<b>Figura 4:</b> Curvas de calibração para os papéis filtro Whatman N°42 e o Schleicher & Schuell N°589.	39
<b>Figura 5:</b> Influencia das parcelas de sucção na curva característica (MacQueen & Miller, 1974).	41
<b>Figura 6:</b> Efeito da histerese na curva característica de sucção (Hillel, 1971).	42
<b>Figura 7:</b> Curva característica típica de diferentes tipos de solo (adaptado de Fredlund & Xing, 1994).	43
<b>Figura 8:</b> Envoltória de resistência de solos não saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).	46
<b>Figura 9:</b> Projeção da envoltória no plano $\tau \times (u_a - u_w)$ (Fredlund & Rahardjo, 1993).	47
<b>Figura 10:</b> Projeção da envoltória no plano $\tau \times (\sigma - u_a)$ (Fredlund & Rahardjo, 1993).	47
<b>Figura 11:</b> Envoltória de resistência não linear no plano $q$ vs sucção mátrica (Teixeira & Vilar, 1997).	48
<b>Figura 12:</b> Envoltória de resistência não linear no plano tensão desviadora na ruptura vs sucção mátrica (Funtai et al., 2004).	49
<b>Figura 13:</b> Variação de $\phi'$ com a sucção (Rohm & Vilar, 1995).	50

<b>Figura 14:</b> Variação de $\phi'$ com a sucção (Futai et al., 2004).	50
<b>Figura 15:</b> Provável forma da envoltória de resistência de um solo residual não saturado.	51
<b>Figura 16:</b> Fotografia do equipamento CDSC.	55
<b>Figura 17:</b> Esquema geral do equipamento CDSC	56
<b>Figura 18:</b> Sistema de aquisição de dados e fonte de alimentação.	57
<b>Figura 19:</b> Desenho esquemático da seção lateral da câmara de compressão.	58
<b>Figura 20:</b> Caixa de cisalhamento fechada com o DAVE.	59
<b>Figura 21:</b> Câmara de água e o DAVE.	60
<b>Figura 22:</b> Disco espaçador com os quatro parafusos e os dois extensômetros.	60
<b>Figura 23:</b> Detalhe do pino de acoplamento entre a caixa e a haste.	61
<b>Figura 24:</b> União tipo universal	62
<b>Figura 25:</b> Apoio da célula de carga com os tirantes.	62
<b>Figura 26:</b> Sistema de extração de bolhas.	63
<b>Figura 27:</b> Procedimento para detecção de vazamentos	66
<b>Figura 28:</b> Fotos do equipamento utilizado no ensaio de tração.	72
<b>Figura 29:</b> Soluções teóricas para tensões ao longo do diâmetro vertical de uma amostra no ensaio de compressão diametral (adaptado de Krishhnayya & Eisenstein, 1974).	73
<b>Figura 30:</b> Localização do Campo Experimental II da PUC-Rio.	78
<b>Figura 31:</b> Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Daylac, 1994).	80
<b>Figura 32:</b> Curva granulométrica do solo.	82
<b>Figura 33:</b> Presença da matriz argilosa com grãos de quartzo e granada muito alterada.	86
<b>Figura 34:</b> Grãos de quartzo arestados e cristais grandes de quartzo.	87

<b>Figura 35:</b> Grande área da matriz argilosa englobando alguns grãos de quartzo e agregados ferruginosos.	87
<b>Figura 36:</b> Fotografia do microscópio eletrônico de varredura da PUC-Rio.	88
<b>Figura 37:</b> Aspecto geral da matriz argilosa (ampliação de 200 vezes).	89
<b>Figura 38:</b> Um detalhamento maior da matriz argilosa com os macroporos sendo visualizados (ampliação de 1000 vezes).	90
<b>Figura 39:</b> Detalhe dos micro-agregados de caulinita, formando entre eles os macroporos, e no seu interior os microporos (ampliação de 5000 vezes).	90
<b>Figura 40:</b> Micro e macro-porosidades caracterizando uma distribuição bimodal dos poros (ampliação de 10000 vezes).	91
<b>Figura 41:</b> Curva característica em função da umidade volumétrica.	92
<b>Figura 42:</b> Curva característica em função do grau de saturação.	93
<b>Figura 43:</b> Curva característica em função da umidade gravimétrica	93
<b>Figura 44:</b> Ensaio de cisalhamento direto convencional: curvas tensão-deslocamento.	95
<b>Figura 45:</b> Início do ensaio.	96
<b>Figura 46:</b> Início da formação da trinca.	97
<b>Figura 47:</b> Abertura da trinca com o avanço das deformações.	97
<b>Figura 48:</b> Trinca totalmente aberta (ruptura).	97
<b>Figura 49:</b> Curvas de resistência a tração versus deslocamento diametral.	98
<b>Figura 50:</b> Curvas de variação volumétrica e deslocamento vertical em função do tempo (série I).	103
<b>Figura 51:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (série I).	104

<b>Figura 52:</b> Curvas de variação volumétrica e deslocamento vertical em função do tempo (série II).	105
<b>Figura 53:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (série II).	106
<b>Figura 54:</b> Curvas de variação volumétrica e deslocamento vertical em função do tempo (série III).	107
<b>Figura 55:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (série III).	108
<b>Figura 56:</b> Curvas de variação volumétrica e deslocamento vertical em função do tempo (série IV).	109
<b>Figura 57:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (série IV).	110
<b>Figura 58:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (sucção mátrica constante de 25kPa).	112
<b>Figura 59:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (sucção mátrica constante de 50kPa).	113
<b>Figura 60:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (sucção mátrica constante de 100kPa).	114
<b>Figura 61:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (sucção mátrica constante de 150kPa).	115
<b>Figura 62:</b> Curvas tensão cisalhante, deslocamento vertical e variação volumétrica em função do tempo (sucção mátrica constante de 200kPa).	116
<b>Figura 63:</b> Curva de compressibilidade para amostras submersas.	118
<b>Figura 64:</b> Curva de compressibilidade em relação a sucção mátrica para as quatro séries realizadas.	119

<b>Figura 65:</b> Curva de compressibilidade em relação a sucção mátrica normalizada.	120
<b>Figura 66:</b> Critério utilizado na determinação dos pontos de ruptura.	121
<b>Figura 67:</b> Envoltória de resistência para amostras submersas.	122
<b>Figura 68:</b> Relação entre a umidade final e a tensão cisalhante na ruptura.	123
<b>Figura 69:</b> Relação entre o índice de vazios após o adensamento e a tensão cisalhante na ruptura.	123
<b>Figura 70:</b> Envoltórias de resistência com respeito a sucção.	126
<b>Figura 71:</b> Variação do ângulo $\phi^b$ com relação a sucção mátrica.	127
<b>Figura 72:</b> Variação de $\phi^b/\phi'$ com relação a sucção mátrica.	128
<b>Figura 73:</b> Envoltórias de resistência para as sucções ensaiadas.	129
<b>Figura 74:</b> Variação da coesão aparente com a sucção mátrica.	130
<b>Figura 75:</b> Envoltória tridimensional de resistência.	130
<b>Figura 76:</b> Envoltórias de resistência com relação a sucção para as séries II e IV.	132
<b>Figura 77:</b> Resistência à tração x teor de umidade em peso.	134
<b>Figura 78:</b> Resistência à tração x grau de saturação.	134
<b>Figura 79:</b> Resistência à tração x sucção mátrica.	135
<b>Figura 80:</b> Relação entre resistência à tração e coesão aparente.	136
<b>Figura 81:</b> Relação entre o parâmetro de ajuste (k) e o índice de plasticidade (IP) (adaptado de Vanapalli & Fredlund, 2000).	138
<b>Figura 82:</b> Comparação da envoltória de resistência ao cisalhamento não saturada obtida experimentalmente e estimada.	139
<b>Figura 83:</b> Envoltória de resistência com relação a sucção para os três colúvios.	141
<b>Figura 84:</b> Variação de $\phi^b$ com a sucção.	141
<b>Figura 85:</b> Variação de $\phi^b/\phi'$ com a sucção.	142

<b>Figura A.1:</b> Curva de calibração do transdutor de deslocamento: (a) horizontal; (b) vertical.	163
<b>Figura A.2:</b> Curva de calibração da célula de carga: (a) vertical; (b) horizontal.	164
<b>Figura A.3:</b> Curva de calibração do transdutor de pressão: (a) água; (b) ar.	165
<b>Figura A.4:</b> Curva de calibração do medidor de variação volumétrica.	166
<b>Figura A.5:</b> Saturação disco cerâmico de alta entrada de valor de ar.	167
<b>Figura B.1:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 1): (a) papel do topo; (b) papel da base.	169
<b>Figura B.2:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 1): (a) papel do topo; (b) papel da base.	170
<b>Figura B.3:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 2): (a) papel do topo; (b) papel da base.	171
<b>Figura B.4:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 2): (a) papel do topo; (b) papel da base.	172
<b>Figura B.5:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 3): (a) papel do topo; (b) papel da base.	173
<b>Figura B.6:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 3): (a) papel do topo; (b) papel da base.	174
<b>Figura B.7:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 4): (a) papel do topo; (b) papel da base.	175
<b>Figura B.8:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 4): (a) papel do topo; (b) papel da base.	176
<b>Figura B.9:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 5): (a) papel do topo; (b) papel da base.	177
<b>Figura B.10:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 5): (a) papel do topo; (b) papel da base.	178
<b>Figura B.11:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 6): (a) papel do topo; (b) papel da base.	179

<b>Figura B.12:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 6): (a) papel do topo; (b) papel da base.	180
<b>Figura B.13:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 7): (a) papel do topo; (b) papel da base.	181
<b>Figura B.14:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 7): (a) papel do topo; (b) papel da base.	182
<b>Figura B.15:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 8): (a) papel do topo; (b) papel da base.	183
<b>Figura B.16:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 8): (a) papel do topo; (b) papel da base.	184
<b>Figura B.17:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 9): (a) papel do topo; (b) papel da base.	185
<b>Figura B.18:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 9): (a) papel do topo; (b) papel da base.	186
<b>Figura B.19:</b> Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 10): (a) papel do topo; (b) papel da base.	187
<b>Figura B.20:</b> Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 10): (a) papel do topo; (b) papel da base.	188
<b>Figura C.1:</b> Solução gráfica para a determinação dos parâmetros de ajuste $a$ , $n$ e $m$ (adaptado de Fredlund & Xing, 1994).	192
<b>Figura C.2:</b> Ajuste da curva característica utilizando a proposta de Fredlund & Xing (1994).	193
<b>Figura C.3:</b> Estimativa da permeabilidade não saturada utilizando a metodologia de Fredlund et al. (1994).	195

## Lista de tabelas

<b>Tabela 1:</b> Principais expressões para a avaliação da tensão efetiva para solos não saturados.	32
<b>Tabela 2:</b> Técnicas para a medição da sucção em solos.	37
<b>Tabela 3:</b> Tempo de equilíbrio sugerido para o papel filtro na medição da sucção total (Marinho, 1997).	40
<b>Tabela 4:</b> Principais características dos equipamentos CDCS (adaptado de Fonseca, 1991).	54
<b>Tabela 5:</b> Procedimento utilizado para a determinação da quantidade de água acrescida ou retirada seguindo as trajetórias de secagem e umedecimento da amostra.	70
<b>Tabela 6:</b> Nomenclatura dos ensaios de cisalhamento direto convencional executados e pressões aplicadas.	74
<b>Tabela 7:</b> Nomenclatura dos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada executados e pressões aplicadas.	76
<b>Tabela 8:</b> Resumo dos blocos extraídos.	77
<b>Tabela 9:</b> Resumo da granulometria.	82
<b>Tabela 10:</b> Limites de consistência e atividade das argilas.	83
<b>Tabela 11:</b> Análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico (Duarte, 2004).	84
<b>Tabela 12:</b> Análise química total em porcentagem em peso (Sertã, 1986).	84
<b>Tabela 13:</b> Análise mineralógica (Sertã, 1986).	85
<b>Tabela 14:</b> Índices físicos iniciais, após o adensamento e final de cada corpo de prova.	94

<b>Tabela 15:</b> Índices físicos iniciais dos corpos de prova.	100
<b>Tabela 16:</b> Índices físicos dos corpos de prova após a fase de adensamento.	101
<b>Tabela 17:</b> Índices físicos finais dos corpos de prova.	102
<b>Tabela 18:</b> Apresentação dos resultados em função da tensão normal líquida aplicada.	111
<b>Tabela 19:</b> Tensão cisalhante, tensão normal e deslocamento horizontal na ruptura.	121
<b>Tabela 20:</b> Tensão cisalhante, tensão normal líquida e deslocamento horizontal na ruptura.	125
<b>Tabela 21:</b> Equações das funções hiperbólicas.	126
<b>Tabela 22:</b> Valores de $c$ e $\phi'$ obtidos.	129
<b>Tabela 23:</b> Resultados de resistência à tração, teor de umidade e grau de saturação.	133
<b>Tabela 24:</b> Resumos das características de granulometria e propriedades índice dos três colúvios.	140
<b>Tabela A.1:</b> Características dos instrumentos elétricos de medição.	161
<b>Tabela C.1:</b> Velocidades calculadas nos ensaios de cisalhamento direto convencional em amostras submersas (Gibson & Henkel, 1954).	190
<b>Tabela C.2:</b> Velocidades de cisalhamento calculadas para os ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada em amostras não saturadas.	196

## Lista de símbolos e abreviações

CDSC = cisalhamento direto com sucção controlada;

DAVE = disco cerâmico de alto valor de entrada de ar;

MSP = membrana semi-permeável;

SAD = sistema de aquisição de dados;

DCMM = departamento de ciências dos materiais e metalurgia da PUC-Rio;

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas;

SUCS = sistema unificado de classificação de solo;

ASTM = American Society for Testing and Materials;

$\sigma$  = tensão normal;

$\sigma_r$  = tensão normal na ruptura;

$\sigma'$  = tensão efetiva;

$c'$ ,  $\phi'$  = parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;

$c$  = coesão aparente do solo devido ao acréscimo de sucção mátrica;

$\tau$  = tensão cisalhante;

$\tau_r$  = tensão cisalhante na ruptura;

$\chi$  = parâmetro que depende do tipo e da estrutura do solo, do grau de saturação, da seqüência de umedecimento e secagem, da história, do nível e da trajetória de tensões;

$\phi^b$  = parâmetro que quantifica o aumento na resistência devido a um aumento na sucção matricial;

$u_w$  = pressão de água;

$u_a$  = pressão de ar;

$(\sigma - u_a)$  = tensão normal líquida;

$(\sigma - u_a)_r$  = tensão normal líquida na ruptura;

$(u_a - u_w)$  = sucção mátrica;

$(u_a - u_w)_r$  = sucção mátrica na ruptura;

$\phi_t$  = potencial total;

$\phi_o$  = potencial osmótico ou de soluto, correspondente à pressão osmótica da água do solo;

$\phi_m$  = potencial mátrico, resultante de forças capilares e de adsorção;

$\phi_g$  = potencial gravitacional, determinado pela elevação do ponto considerado em relação ao nível de referencia;

$\phi_a$  = potencial pneumático, que corresponde a pressão na fase gasosa;

$\phi_p$  = potencial de consolidação, que corresponde à parcela de sobrecarga aplicada no terreno que é transmitida a pressão da água intersticial;

$S_t$  = sucção total;

$S_m$  = sucção mátrica;

$S_o$  = sucção osmótica;

# = diâmetro da abertura da malha da peneira;

CTC = capacidade de troca catiônica;

$G_s$  = densidade relativa dos grãos;

LC = limite de contração;

LL = limite de liquidez;

LP = limite de plasticidade;

IP = índice de plasticidade;

CH = argila de alta plasticidade, de acordo com a classificação do solo da SUCS;

*o-ring* = anel de borracha de vedação;

*top-cap* = tampa metálica para distribuição uniforme da carga normal sobre toda a área da amostra;

$\alpha$  = ângulo de inclinação constante da curva tensão-deslocamento;

$\delta_v$  = deslocamento vertical;

$\delta_h$  = deslocamento horizontal;

$\delta_{hr}$  = deslocamento horizontal na ruptura;

$n$  = porosidade;

$\rho_s$  = massa específica dos grãos de solo;

$\gamma_n$  = peso específico natural;

$\gamma_d$  = peso específico seco;

$\gamma_w$  = peso específico da água;

$e$  = índice de vazios;

$e_o$  = índice de vazios inicial;

$w$  = teor de umidade gravimétrico;

$w_{real}$  = teor de umidade gravimétrico calculado a partir de secagem em estufa;

$w_{calc}$  = teor de umidade gravimétrico calculado utilizando o sistema de medição de variação volumétrica;

$\theta$  = teor de umidade volumétrico;

$\theta_s$  = teor de umidade volumétrico do solo saturado;

$\theta_r$  = teor de umidade volumétrico do solo correspondente a condição de saturação residual;

$S$  = grau de saturação;

$\sigma_t$  = resistência a tração;

$P$  = carga máxima de compressão no ensaio de compressão diametral;

$d$  = diâmetro da amostra;

$H$  = espessura da amostra;

$A$  = largura da faixa carregada no ensaio de compressão diametral;

$\tau_o$  = tensão cisalhante para sucção zero obtida no ensaio de cisalhamento direto convencional em amostras submersas;

$a, b$  = parâmetros de ajuste da função hiperbólica;

$k$  = parâmetro de ajuste;

$\psi$  = sucção;

$\Theta$  = teor de umidade volumétrico normalizado;

$t_f$  = tempo de ruptura;

$c_v$  = coeficiente de adensamento relacionado ao ensaio;

$\bar{U}$  = grau médio de dissipação do excesso de poro-pressão (95%);

$\eta$  = parâmetro referente a drenagem;

$c_v^w$  = coeficiente de adensamento do solo não saturado relacionado com a fase líquida;

$K_w$  = coeficiente de permeabilidade do solo não saturado relacionado com a fase líquida;

$\rho_w$  = densidade da água;

$g$  = aceleração da gravidade;

$m_2^w$  = inclinação da curva característica de sucção;

$\lambda$  = fator de impedância;

$K_d$  = coeficiente de permeabilidade do DAVE;

$L_d$  = espessura do DAVE;

$k_r(\psi)$  = coeficiente de permeabilidade relativa em função da sucção;

$k_w(\psi)$  = coeficiente de permeabilidade não saturado em função da sucção;

$k_s$  = coeficiente de permeabilidade saturado;

a, n, m = parâmetros de ajuste segundo a metodologia de Fredlund e Xing (1994).