



**Taíse Monique de Oliveira Carvalho**

**Desenvolvimento de um sistema de medição de  
variação de volume total de amostras triaxiais não-  
saturadas e avaliação do efeito de processos de  
saturação no comportamento de solos saprolíticos**

**Tese de Doutorado**

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

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

Volume I

Rio de Janeiro  
Agosto de 2012



**Taíse Monique de Oliveira Carvalho**

**Desenvolvimento de um sistema de medição de  
variação de volume total de amostras triaxiais não-  
saturadas e avaliação do efeito de processos de  
saturação no comportamento de solos saprolíticos**

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. Franklin dos Santos Antunes**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Michéle Dal Toé Casagrande**

DPUC-Rio

**Prof. Antônio Viana da Fonseca**

FEUP

**Prof. George de Paula Bernardes**

UNESP – Guaratinguetá

**Prof. Luiz Antonio Bressani**

UFRGS

**Prof. Sérgio Tibana**

UENF

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de agosto de 2012

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

### **Taíse Monique de Oliveira Carvalho**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas - UFAL. Obteve o título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração de Geotecnia, pela PUC-Rio. Principais áreas de interesse e linhas de pesquisa: Mecânica dos Solos, Geotecnia Experimental e Geotecnia Ambiental.

#### Ficha Catalográfica

Carvalho, Taíse Monique de Oliveira

Desenvolvimento de um sistema de medição de variação de volume total de amostras triaxiais não-saturadas e avaliação do efeito de processos de saturação no comportamento de solos saprolíticos / Taíse Monique de Oliveira Carvalho; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos ; co-orientador: Franklin dos Santos Antunes. – 2012.

401 f. il. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Técnicas de saturação. 3. Comportamento de solo residual. 4. Medida de variação de volume total. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Antunes, Franklin dos Santos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

Agradeço especialmente ao meu orientador, Tácio de Campos, profissional que exerce com amor, dedicação e entusiasmo a atividade de pesquisador e professor. Obrigada pelo apoio e incentivo não só na execução deste trabalho, mas também na minha vida acadêmica e profissional. Sem a sua persistência, insistência e sabedoria eu não teria concluído este trabalho.

Ao prof. Franklin, que, pacientemente, tem passado os seus conhecimentos ao longo destes anos de orientação. Sua contribuição foi fundamental para a finalização deste trabalho. Obrigada também pelo carinho e amizade. Sentirei muita falta dos nossos cafés, almoços e tardes de aulas particulares sobre geologia!

A todos os professores da do Departamento de Engenharia Civil da PUC pelos conhecimentos transmitidos ao longo do mestrado e doutorado.

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, Amauri e Josué, por estarem sempre dispostos a ajudar e aos engenheiros responsáveis pelo laboratório, William e Mônica, pela atenção e cooperação.

Às funcionárias do departamento de engenharia Fátima e Rita. Meninas, muito obrigada por facilitarem bastante minha vida com todos os processos burocráticos da PUC.

Às estagiárias Jacqueline e Tathiana pelo grande auxílio durante a fase de caracterização dos solos.

A ALTA Geotecnia Ambiental, por me acolher, por propiciar o contato com grandes desafios técnicos e por defender a prática da engenharia com excelência. Obrigada de coração pelo incentivo na reta final deste trabalho!

Às minhas grandes amigas Bê e Mônica pelos momentos de descontração e apoio incondicional, adoro vocês meninas! Um muitíssimo obrigada aos meus grandes amigos, Álvaro, Carol, Thais, Algemiro e Paulinha, sentirei saudades...

À minha família que, mesmo distante, sempre torceu pelo meu sucesso. A distância e a saudade valeram a pena.

Ao meu marido, por ser o meu porto seguro e por estar sempre ao meu lado, mesmo que por vezes distante.

Aos membros da banca pelas valiosas sugestões para a elaboração deste volume.

Ao CNPq, Capes e PRONEX pelo financiamento desta pesquisa.

À PUC-Rio pela concessão de bolsa

## Resumo

Carvalho, Taíse M. O.; de Campos, Tácio M. P.; Antunes, Franklin dos S. **Desenvolvimento de um sistema de medição de variação de volume total de amostras triaxiais não saturadas e avaliação do efeito de processos de saturação no comportamento de solos saprolíticos.** Rio de Janeiro, 2012. 401p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa apresenta um estudo sobre a influência de técnicas de saturação, empregadas em laboratórios comerciais e de pesquisa, no comportamento tensão-deformação-resistência de solos residuais quando submetidos a ensaios de compressão triaxial tipo CIU. Os solos avaliados são provenientes de litologias distintas e apresentam diferenças na composição mineralógica, grau de intemperismo e estrutura. Um dos solos pertence ao perfil de alteração de uma rocha alcalina encontrada no município de Tanguá-RJ. Os demais solos são oriundos das feições melanocrática e leucocrática de um migmatito da baixada fluminense (Duque de Caxias-RJ). A variação de volume total dos corpos de prova durante a saturação foi monitorada em alguns ensaios para auxiliar na interpretação dos resultados. Para tanto, foi desenvolvida uma câmara triaxial dupla com sistema de medida de variação de volume total de fácil montagem e custo reduzido, cujas características técnicas são competitivas com as existentes no mercado. O método de saturação que consiste na percolação de água por meio de sucção com baixa tensão confinante seguida de aumento contínuo e simultâneo de tensões (saturação automática) mostrou ser o mais adequado para o solo residual de rocha alcalina, que apresenta estrutura frágil, sem agentes cimentantes e com elevado índice de vazios. Já o solo residual de migmatito (feição melanocrática), que apresenta agentes cimentantes e elevada tensão de cedência, é menos susceptível à técnica de saturação, tendo seu comportamento afetado apenas pelo emprego da técnica de incremento único de contrapressão.

## Palavras-chave

Técnicas de saturação; comportamento de solo residual; solo estruturado; medida de variação de volume total.

## Abstract

Carvalho, Taíse M. O.; de Campos, Tácio M. P.; Antunes, Franklin dos S. **Development of a total volume change measuring system for unsaturated triaxial samples and evaluation of the effect of saturation procedures on the behaviour of saprolitic soils.** Rio de Janeiro, 2012. 401p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research presents a study on the influence of saturation procedures, used in commercial and research laboratories, on the stress-strain-strength behavior of residual soils when subjected to CIU triaxial tests. The selected soils are derived from different lithologies and show differences in mineralogical composition, structure and weathering degree. One of them belongs to the weathering profile of an alkaline rock located at the city of Tanguá-RJ. The others are the result of weathering processes on melanocratic and leucocratic features of a migmatite from Duque de Caxias, in Rio de Janeiro Metropolitan Area. Variation of the total volume of the test specimens was monitored during the saturation process in some tests to assess the influence of this procedure on the soil structure. For this purpose, it was developed a double-walled triaxial cell with a system based on the measurement of variation of the volume of the fluid filling the inner cell. The equipment has competitive technical features, besides the low cost and easy to assemble. The saturation technique based on percolating water by suction with a low cell pressure followed by continuous and simultaneous increase of backpressure (automatic saturation) was the most suitable method for the residual soil from the alkaline rock, which presents a weakly cemented structure, without bonding, and high voids ratio. However, the residual soil from the migmatite rock (melanocratic feature), which has strong cementation and high yielding stress, shown to be less susceptible to the saturation procedures, having its behavior affected only by the saturation technique of elevation of backpressure in just one-stage.

## Keywords

Saturation procedures; residual soil behavior; structured soil; total volume change measurement.

## Sumário

Lista de símbolos e abreviações	35
1 Introdução	38
2 Solos residuais	41
2.1. Introdução	41
2.2. Estrutura	42
2.2.1. Comportamento mecânico de solos estruturados (cimentados)	46
2.3. Comportamento de solos residuais	59
2.3.1. Compressibilidade	60
2.3.2. Comportamento tensão-deformação-resistência	71
3 Saturação dos corpos de prova em ensaios triaxiais	87
3.1. Introdução	87
3.2. Saturação por percolação	88
3.3. Saturação por contrapressão	90
3.4. Procedimentos de saturação	97
3.5. Influência do processo de saturação no comportamento dos solos	102
4 Medida de variação de volume total em ensaios triaxiais	112
4.1. Introdução	112
4.2. Métodos existentes para medida de variação de volume total	112
4.2.1. Medida de variação de volume total por meio da entrada ou saída do fluido da câmara triaxial	116
4.2.2. Técnicas de calibração	122
4.3. Câmara triaxial dupla com medida de variação de volume total implementada	129
4.3.1. Equipamento triaxial adaptado para medida de variação de volume total	132
4.3.2. Desenvolvimento e avaliação do conjunto de medida de variação de volume total	138
4.3.3. Calibração do sistema de medição de variação de volume total	152



4.4. Considerações gerais	164
5 Materiais estudados	167
5.1. Solos pertencentes ao perfil de alteração de migmatito	167
5.1.1. Características do perfil e amostragem	168
5.2. Solo residual de rocha alcalina	173
5.2.1. Características do solo e amostragem	174
6 Caracterização físico-química, mineralógica e estrutural dos solos	176
6.1. Introdução	176
6.2. Metodologias e considerações sobre os ensaios	178
6.2.1. Caracterização física	178
6.2.2. Caracterização química	183
6.2.3. Caracterização mineralógica e estrutural	185
6.3. Resultados e discussões	187
6.3.1. Duque de Caxias	187
6.3.2. Solo Tanguá	211
6.4. Considerações Gerais	222
7 Compressibilidade	224
7.1. Introdução	224
7.2. Metodologias	227
7.2.1. Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS)	227
7.2.2. Ensaio de adensamento edométrico convencional	231
7.2.3. Ensaio de adensamento isotrópico	232
7.3. Resultados e discussões	233
7.3.1. Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS) – solos residuais do migmatito de Duque de Caxias	233
7.3.2. Ensaio edométrico	245
7.3.3. Adensamento isotrópico	255
7.4. Considerações gerais	261
7.4.1. Solos do perfil do migmatito de Duque de Caxias	261
7.4.2. Solos residual de rocha alcalina de Tanguá	264
8 Comportamento tensão-deformação-resistência: aspectos	

experimentais e de interpretação dos resultados	266
8.1. Introdução	266
8.2. Metodologias	267
8.2.1. Equipamentos	267
8.2.2. Moldagem dos corpos de prova e montagem dos ensaios	268
8.2.3. Técnicas de saturação	271
8.2.4. Variação de volume total durante a saturação	277
8.2.5. Adensamento	279
8.2.6. Cisalhamento	279
 9 Avaliação do efeito da técnica de saturação no comportamento tensão-deformação-resistência: solo residual de Tanguá – T.	 284
9.1. Ensaios CIU para $\sigma'_c = 25$ kPa com medida de variação de volume total - avaliação inicial dos processos de saturação	285
9.1.1. Curvas tensão-deformação e trajetórias de tensões	285
9.1.2. Medida de variação de volume total durante o processo de saturação	291
9.1.3. Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento PIE.	301
9.1.4. Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento SIA – solo T.	309
9.1.5. Definição de envoltória de condição última única para o solo de Tanguá	316
9.1.6. Comparação dos resultados dos ensaios executados com os métodos de saturação SIA-T e PIE-T.	318
 10 Avaliação do efeito da técnica de saturação no comportamento tensão-deformação-resistência: solo residual de Duque de Caxias – DC02.	 326
10.1. Ensaios CIU para $\sigma'_c = 25$ kPa com medida de variação de volume total – avaliação inicial dos processos de saturação.	327
10.1.1. Curvas tensão-deformação e trajetórias de tensões	327
10.1.2. Medida de variação de volume total durante o processo de saturação	331
10.1.3. Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento IE – solo DC02.	336
10.1.4. Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento SIA – solo DC02.	344
10.1.5. Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento	

IU – solo DC02.	351
10.1.6. Determinação da resistência correspondente à condição última do solo DC02.	357
10.1.7. Comparação dos resultados dos ensaios executados com os diferentes métodos de saturação (IE, IU e SIA)	362
11 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	375
11.1. Conclusões	375
11.1.1. Equipamento triaxial com medida de variação de volume total	375
11.1.2. Características dos materiais estudados	376
11.1.3. Compressibilidade	378
11.1.4. Ensaio de resistência e avaliação do processo de saturação	380
11.2. Sugestões para trabalhos futuros	384
11.2.1. Equipamento triaxial com medida de variação de volume total	384
11.2.2. Compressibilidade	385
11.2.3. Avaliação do comportamento do solo DC02	385
11.2.4. Avaliação de técnicas de saturação	386
Referências bibliográficas	387
Anexo 1: Parâmetros de resistência de ruptura	400

## Lista de figuras

Figura 1 – Ensaio de porosimetria em amostras ao longo de um perfil de alteração de um gnaiss facoidal (Moncada, 2008). .....	44
Figura 2 – (a) Solo residual com arranjo tipo grumo (Futai, 2007); (b) e (c) mostram o arranjo tipo conexão, onde o agente cimentante atua ligando pacotes de biotita e grãos de quartzo, respectivamente (Martins <i>et al.</i> , 2005 e Oliveira <i>et al.</i> , 2011). .....	45
Figura 3 – Comparação entre o comportamento do solo estruturado (cimentado) e desestruturado em ensaio edométrico (Leroueil e Vaughan, 1990). .....	48
Figura 4 – Curvas de adensamento edométrico com amostra indeformada e amolgada de um solo residual de Papua Nova Guiné (Wallace, 1973) .....	49
Figura 5 - Curvas de adensamento edométrico com amostra indeformada, amolgada (limite de liquidez) e reconstituída de um solo residual de Java argilo siltoso (Wesley, 1974; 1990). .....	49
Figura 6 – Resultados de ensaios de compressão isotrópica (a) arenito silicoso e (b) calcarenito (Cuccovillo e Coop, 1997). IB = limite de compressão isotrópica para ambas condições, indeformado e reconstituído do calcarenito. ....	50
Figura 7 – Diferentes tipos de plastificação da estrutura (Leroueil e Vaughan, 1990). .....	52
Figura 9 – Ensaio de compressão triaxial não-drenado em um solo artificialmente cimentado ( Maccarini, 1987). .....	55
Figura 10 – Modelos de comportamento de materiais (a) fortemente estruturados e (b) fracamente estruturados definidos a partir do comportamento materiais arenosos (Cuccovillo e Coop, 1999). .....	56
Figura 11 - Comportamento esquemático de solos ideais e solos estruturados (Leroueil, 1992). .....	57
Figura 12 – Comparação de resultados entre medidor de deformação externo (LVDT) e interno (eletrônível) em ensaio executado em câmara tipo Bishop-Wesley em um solo residual de migmatito (Boszczowski, 2008). .....	58
Figura 13 – Pontos de plastificação de solos cimentados e rochas brandas (Malandraki e Toll, 2001). .....	59

Figura 14 – Resultado de ensaio edométrico em um solo residual de sienito de Poços de Caldas – MG (a) escala logarítmica (b) escala aritmética (adaptado de Carvalho <i>et al</i> , 2011).....	62
Figura 16 – Resultado de ensaios edométricos em amostra reconstituída e indeformada de um solo residual de gnaiss do município do Rio de Janeiro (Oliveira <i>et al</i> , 2011).....	64
Figura 17 – Resultados de ensaios de adensamento edométrico inundado em amostras indeformadas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba-PR (Boszczowski, 2008).....	65
Figura 18 – Índices físicos e mineralogia dos solos do perfil de alteração de um gnaiss migmatizado rico em biotita (Futai <i>et al</i> , 2004). ....	66
Figura 19 - Resultado de ensaios edométricos em amostras de solos residuais de um perfil de gnaiss migmatizado rico em biotita da estação Holanda, próxima ao município de Ouro Preto. O grau de intemperismo diminui com a profundidade de retirada da amostra. (Futai, 2002). ....	67
Figura 20 – Relação entre o Índice de compressão e o índice de vazios de solos residuais jovens de rochas metamórficas (Sandroni, 1991). ....	68
Figura 21 – Correlação geral de $C_c$ e $\sigma'_{vy}$ com o índice de vazios inicial (Futai, 2002). ....	69
Figura 22 – Relações entre índice de vazios e índice de compressão estabelecidas por diversos autores com acréscimo de dados apresentados na presente revisão.....	70
Figura 23 - Curvas tensão desviadora-deformação axial-deformação volumétrica obtidas de um perfil de alteração de um gnaiss facoidal (a) solo residual nível 2, rico em mica biotita (b) solo residual maduro (Maciel, 1991).....	75
Figura 24 - Resultados dos ensaios triaxiais CIU (Futai <i>et al</i> ., 2007).....	76
Figura 25 – Comparação de resultados de ensaios CIU em amostras indeformadas e compactadas (Futai, 2002). ....	79
Figura 26 – Resultados de ensaios CID em amostras indeformadas de um solo residual de basalto (Denardin, 2005). ....	81
Figura 27 – Envoltória de resistência ao cisalhamento para um solo residual de basalto reconstituído e indeformado (Denardin, 2005). ....	82
Figura 28 – Resultados de ensaios triaxiais em um solo residual de sienito com amostras indeformadas saturadas com água (Ind-água),	

saturadas com licor cáustico (Ind-licor) e com solo reconstituído (Carvalho <i>et al.</i> , 2011). .....	84
Figura 29 – Envoltória de resistência de pico para baixos níveis de tensão efetiva de adensamento e envoltória de resistência última para de um solo residual de sienito (Carvalho <i>et al.</i> , 2011). .....	84
Figura 30 - Contrapressão requerida para saturação (Lowe e Johnson, 1960) .....	92
Figura 31 – Tempo para saturar uma amostra utilizando contrapressão (Black e Lee, 1973; Head, 1986). .....	94
Figura 32 – Variação de B com valores de compressibilidade C (Bishop e Hight, 1977). .....	96
Figura 33 – Efeito da contrapressão sobre o grau de saturação e densidade de um solo coesivo (Lowe e Jonhson, 1960). .....	104
Figura 34 - Tensão desviadora normalizada para contrapressão de a) Contrapressão igual a 0 b) Contrapressão igual a 53 kPa e c) contrapressão igual a 281 kPa (Brand, 1975). .....	107
Figura 35 – Envoltória de resistência média para todos os ensaios .....	108
Figura 36 – Efeito do método de saturação e não uniformidade das extremidades sobre o ponto de plastificação e ruptura de um solo com ligações artificiais. Ensaio a-i: 57% de quartzo, 30% de caulim e 13% de lama caulinítica; ensaios j-m: 87% de quartzo e 13% de lama caulinítica .....	110
Figura 37 – Medidores diretos de deformação axial e radial do corpo de prova (Cabarkapa e Cuccovillo, 2006). .....	113
Figura 38 – Transdutores efeito Hall: (a) medidor de variação axial e (b) medidor de variação radial (Thom <i>et al.</i> , 2008). .....	114
Figura 39– Transdutor de deformação radial sem contato (Drumright, 1987)... ..	114
Figura 40– Câmara triaxial e máquina digital instalada para medida de variação de volume do corpo de prova por meio de análise de fotos (Gachet <i>et al.</i> , 2007). .....	115
Figura 41– Efeito de perspectiva (Gachet <i>et al.</i> , 2007). .....	115
Figura 42 – Célula triaxial modificada (Bishop e Donald, 1961) .....	117
Figura 43– Seção transversal do triaxial com sucção controlada (Aversa e Nicoreta, 2002). .....	118
Figura 44 – Sistema de medição de variação de volume desenvolvido por Ng <i>et al.</i> (2002). .....	119

Figura 45 – Diagrama esquemático de equipamento de tensão controlada com câmara dupla (Sivakumar <i>et al.</i> , 2006). .....	121
Figura 46 – Sistema para ensaio com tensão controlada montado (Sivakumar <i>et al.</i> , 2006 e Murray e Silvakumar, 2010). .....	121
Figura 47– Configuração de ensaio com sensor de temperatura submerso em uma câmara de referência (Leong <i>et al.</i> , 2003). .....	122
Figura 48 - Gráficos de variação de volume e temperatura ao longo do tempo: a) câmara de acrílico e sensor de temperatura externo; b) câmara de acrílico e sensor de temperatura submerso em água; c) câmara de aço inoxidável e sensor de temperatura externo e d) câmara de aço inoxidável e sensor de temperatura submerso em água (Leong <i>et al.</i> , 2003). .....	123
Figura 49 – Determinação da variação volume de água confinada no sistema para corpos de prova de vários tamanhos para um erro admissível de 0,1% ( Leong <i>et al.</i> , 2003). .....	124
Figura 50 – Relação entre a variação de volume aparente (AVC) e o tempo decorrido após a aplicação de pressão confinante de 100 para 200 kPa (Ng <i>et al.</i> , 2002). .....	126
Figura 51– Relação entre mudança imediata de volume pressão confinante (Ng <i>et al.</i> , 2002). .....	126
Figura 52 – Relação entre variação de volume e deslocamento relativo entre a célula de carga e câmara interna (Ng <i>et al.</i> , 2002). .....	127
Figura 53 – Variação de volume aparente da câmara interna com o aumento de tensão confinante (Sivakumar <i>et al.</i> , 2006; Murray e Sivakumar, 2010). .....	127
Figura 54 - Variação de medida e variação de volume corrigido de acordo com o tempo decorrido (Sivakumar <i>et al.</i> , 2006). .....	128
Figura 55– Sistema de medição de variação de volume utilizado por Moncada (2008). .....	129
Figura 56 - Esquema do equipamento idealizado pelo prof. Tácio Mauro Pereira de Campos e apresentado por Slongo (2008). .....	131
Figura 57 – Concepção do sistema de variação de volume (Slongo 2008) .....	132
Figura 58– Reservatório em PVC (adaptado de Slongo 2008) .....	132
Figura 59– Esquema do equipamento triaxial com prensa tipo Bishop-Wesley produzido pelo Imperial College (sem alterações) .....	134
Figura 60– Equipamento triaxial a partir do qual foram realizadas	

as adaptações (fotos extraídas de Campos, 2006) .....	134
Figura 61 – Medidor de variação de volume – M.V.V. (de Campos 1985) .....	135
Figura 62 – Foto da prensa triaxial adaptada com a balança para medida de variação de volume total do corpo de prova através da variação de volume da câmara interna. ....	136
Figura 63– Câmara triaxial desenvolvida no LGMA da PUC-Rio .....	137
Figura 64– Topo da câmara triaxial. ....	138
Figura 65 – Base da câmara triaxial. ....	138
Figura 66– Primeira caixa desenvolvida de PVC com porta de vidro e passagem para as tubulações de ar para aplicação de tensão confinante e a de contato com a célula interna. a) vista frontal/lateral e b) vista do fundo. ....	140
Figura 67 – Registro de massa da balança Marte utilizando a caixa de PVC da Figura 66 com todas as tubulações conectadas, sem aplicação de pressão. ....	140
Figura 68– Variação de massa da balança com o recipiente e sem as conexões, mas protegida com a caixa de PVC. ....	141
Figura 69 – Nova caixa de PVC desenvolvida com quinas revestidas por cantoneiras de alumínio e com tamanho suficiente para comportar todas as partes da balança: a) Vista frontal e b) vista do fundo. ....	141
Figura 70 – Variação de massa com a câmara de PVC, tubulação interna completamente independente da externa e sem aplicação de pressão. Empregou-se tubo de silicone nesta avaliação. ....	142
Figura 71 – Variação de massa com a câmara de PVC, tubulação interna completamente independente da externa e sem aplicação de pressão. Empregou-se tubo da marca Festo. ....	143
Figura 72– Variação de massa com o sistema de medida de variação de volume composto pela balança Ohaus, caixa de PVC apresentada na Figura 69, tubos de poliuretano da marca Festo internos à caixa, sem aplicação de pressão e sem estar conectado a câmara triaxial. ....	143
Figura 73– Layout da prensa triaxial adaptada com a balança para medida de variação de volume total do corpo de prova através da variação de volume da câmara interna. ....	144
Figura 74– Variação de massa do sistema de medição de variação de volume com pressão de 545 kPa aplicada, mas sem contato, durante as leituras, com a câmara interna. ....	145



Figura 75 – Variação de massa e da temperatura ambiente ao longo do tempo com pressão de 545 kPa aplicada, mas sem contato, durante as leituras, com a câmara interna. ....	146
Figura 76 – Variação de massa e de tensão confinante ao longo do tempo com pressão de 545 kPa aplicada, mas sem contato, durante as leituras, com a câmara interna.....	146
Figura 77 - Variação de massa registrada pela balança com o aumento de tensão confinante sem considerar a variação de volume da célula interna da câmara triaxial.....	147
Figura 78 – Variação de massa e de tensão confinante ao longo do tempo com pressão confinante de 500 kPa aplicada, em contato, durante as leituras, com a câmara interna. ....	148
Figura 79 - Variação de massa e de temperatura, com sensor medindo a temperatura ambiente, ao longo do tempo com pressão confinante de 499,5 kPa aplicada, em contato, durante as leituras, com a câmara interna. ....	148
Figura 80 – Corpo cimentício poroso empregado no ensaio de avaliação do sistema de medição de variação de volume total.....	149
Figura 81– Variação de massa registrada pela balança e da tensão confinante ao longo do tempo. Ensaio com corpo de prova cimentício poroso.....	150
Figura 82 – Variação de massa registrada pela balança e da contrapressão ao longo do tempo. Ensaio com corpo de prova cimentício. ....	150
Figura 83 - Variação de massa registrada pela balança e do volume registrado pelo MVV ao longo do tempo (variação positiva implica em água entrando no CP). Ensaio com corpo de prova cimentício. ....	151
Figura 84 - Variação de massa registrada pela balança e da temperatura medida junto à célula ao longo do tempo. Ensaio com corpo de prova cimentício.....	152
Figura 85 – Ensaio de calibração: variação de massa registrada pela balança após uma variação de volume – medida com auxílio de uma bureta – de 0,12 cm <sup>3</sup> .....	153
Figura 86 – Resultado da calibração realizada para obter a relação entre a variação de volume total do corpo de prova e a medida de massa da balança.....	154
Figura 87 - <u>Ensaio de calibração 1</u> : variação de massa registrada pela	

balança devido ao aumento progressivo de tensão confinante, permanecendo o corpo de prova submetido a cada estágio durante o período de 4 horas.....	156
Figura 88 - <u>Ensaio de calibração 2</u> : variação de massa registrada pela balança devido ao aumento progressivo de tensão confinante, permanecendo o corpo de prova submetido a cada estágio durante o período de 4 horas. Inconsistência na variação de volume apresentada no acréscimo de tensão de 50 para 100 kPa. ....	157
Figura 89 - <u>Ensaio de calibração 3</u> : variação de massa registrada pela balança do sistema devido ao aumento progressivo de tensão confinante, permanecendo o corpo de prova submetido a cada estágio durante o período de 4 horas. ....	157
Figura 90 – Curvas dos 3 ensaios de calibração após análise dos dados de cada um considerando como variação a massa registrada pela balança 40 minutos após a tensão de cada estágio ser atingida. ....	158
Figura 91 - Curvas dos 3 ensaios de calibração após correção do ensaio de calibração 2. ....	159
Figura 92 – Correlação entre a tensão confinante e a variação de volume obtida a partir dos resultados dos ensaios de calibração 1, 2 e 3. ....	159
Figura 93 – Calibrações para os ensaios com incremento contínuo de contrapressão. Sucção forte ( $\pm 85$ kPa). ....	161
Figura 94 - Taxa variação de massa com a variação de tensão confinante <i>versus</i> tensão confinante. Calibração para ensaio com aumento contínuo de contrapressão. ....	163
Figura 95 – Calibração do ensaio tipo rampa considerando os dados dos ensaios d, f, g e h do gráfico da Figura 93. ....	164
Figura 96 – Locais de retirada de amostras. ....	167
Figura 97 – Planta de localização do perfil de Duque de Caxias. ....	169
Figura 98 – Foto da área do morro onde foram coletadas amostras para determinação do perfil de alteração do migmatito de Duque de Caxias. Na imagem estão indicadas as posições das feições I eucocráticas e melanocráticas identificadas. ....	170
Figura 99 – Sistemas de fraturas sub-horizontais e sub-verticais encontrados nas duas feições do perfil de alteração de Duque de Caxias: a) melanocrática e b) leucocrática. ....	170
Figura 100 – Pontos de coleta de amostras da feição melanocrática	

do maciço de Duque de Caxias.....	171
Figura 101 - Pontos de coleta de amostras da feição leucocrática do maciço de Duque de Caxias.....	171
Figura 102 – Amostras indeformadas retiradas da porção melanocrática. a) Amostra DC1 e b) Amostra DC2. ....	172
Figura 103 – Amostras indeformadas retiradas da porção leucocrática. a) Amostra do ponto DC3 e b) Amostra DC4. ....	172
Figura 104 – Planta de localização da amostra de Tanguá. Coordenadas geodésicas: 22º 43' 19" S, 42º 44' 00" W.....	175
Figura 106 – Curva de retenção típica (Fredlund e Xing, 1994).....	181
Figura 107 – Curva granulométrica das amostras de Duque de Caxias. ....	188
Figura 108 – Distribuição acumulativa dos poros dos solos de Duque de Caxias .....	191
Figura 109 – Distribuição incremental dos poros com a classificação dos poros segundo a IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada).....	192
Figura 110 – Relação ente o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC01.....	193
Figura 111 – Relação ente o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC02.....	193
Figura 112 – Relação ente o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC03.....	194
Figura 113 – Relação ente o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC04.....	194
Figura 114 – Curva de retenção do solo residual DC01. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980). ....	196
Figura 115 – Curva de retenção do solo residual DC02. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980). ....	197
Figura 116 – Curva de retenção do solo residual DC03. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980). ....	197
Figura 117 – Curva de retenção do solo residual DC04. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980). ....	198
Figura 118 – Difratograma material passante na peneira #40 MB = biotita, Ct = caulinita.....	199
Figura 119 – Difratograma material passante na peneira #200 (feição máfica). MB = biotita, Ct = caulinita e Gt = goethita.....	199

Figura 120 – Difratoograma material passante na peneira #400 (feição máfica). MB = biotita, Ct = caulinita e Gt = goethita, I = illita, Qt = quartzo. ....	200
Figura 124 – Termograma dos solos oriundos da feição máfica de Duque de Caxias .....	202
Figura 125 - Termograma dos solos oriundos da feição félsica de Duque de Caxias .....	203
Figura 126 – Lâminas delgadas do solo DC01 (a) e DC02 (b) observadas na lupa binocular. Bia = Biotita alterada, Fa =feldspato alterado. ....	206
Figura 127 – Lâminas delgadas do solo DC03 (a), com luz polarizada, e DC04 (b) observadas na lupa binocular. KF = feldspato potássico e Qt = quartzo. ....	207
Figura 128 – (a) Aspecto estruturado da amostra natural do solo residual DC02. Nota-se as placas de biotita intemperizadas nas bordas com a presença de cimentação entre os minerais; (b) As análises de EDS desta imagem indicam uma grande concentração de silício, alumínio e ferro nos grumos presentes na superfície das placas de biotita, bem como ligando partículas. ....	208
Figura 129 – a) Imagem da amostra natural do solo residual DC02; (b) e (c) EDS dos pontos 1 e 2, respectivamente, indicados em (a).....	209
Figura 130 – Curva granulométrica do solo de Tanguá (T). ....	212
Figura 131 – Distribuição acumulativa dos poros do solo de Tanguá (T) .....	213
Figura 132 – Distribuição incremental dos poros com a classificação dos poros segundo a IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada). Solo de Tanguá (T). ....	214
Figura 133 – Relação entre o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo de Tanguá (T). ....	215
Figura 134 – Curva de retenção do solo residual de Tanguá (T). Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980). ....	216
Figura 135 – Difratoograma material passante na peneira #40 de Tanguá (T). Il = illita, Ct = caulinita; FK = Feldspato potássico. ....	217
Figura 136 – Difratoograma material passante na peneira #200 e #400 de Tanguá (T). Il = illita, Ct = caulinita; FK = Feldspato potássico. ....	217
Figura 137 – Termograma da fração silte e argila do solo residual de Tanguá.....	218
Figura 138 – Lâmina delgada do solo residual de Tanguá (T). ....	219
Figura 139 – Imagens obtidas com o MEV do solo residual de	

Tanguá (T) em diferentes escalas. (a) aumento de 2000 vezes e	
(b) aumento de 4000 vezes. ....	220
Figura 140 - a) Imagem da amostra natural do solo residual de Tanguá;	
(b), (c) e (d) são EDS's dos pontos 1, 2 e 3, respectivamente, indicados	
em (a). ....	221
Figura 141 – Prensa empregada para a execução dos ensaios CRS.....	229
Figura 142 – a) Processo de saturação dos corpos de prova para o ensaio	
CRS; (b) Placa do equipamento CRS onde o corpo de prova é acomodado....	230
Figura 143 – Resultados dos ensaios CRS em amostras indeformadas.	
Índice de vazios x log da tensão vertical efetiva.....	236
Figura 144 - Resultados dos ensaios CRS em amostras	
indeformadas. Deformação volumétrica normalizada x log da	
tensão vertical efetiva. ....	236
Figura 145 – Exemplo da estimativa da tensão de cedência da	
estrutura a partir do prolongamento dos trechos da curva do ensaio	
CRS no solo DC02. ....	237
Figura 146 – Resultados dos ensaios CRS dos solos residuais de Duque	
de Caxias representados de diferentes formas .....	239
Figura 147 - Resultados dos ensaios CRS em amostras reconstituídas.	
Índice de vazios x log da tensão vertical efetiva.....	241
Figura 148 - Resultados dos ensaios CRS em amostras reconstituídas.	
Deformação volumétrica normalizada x log da tensão vertical efetiva. ....	241
Figura 149 – Solo DC01. Comparação entre as curvas do solo	
desestruturado e indeformado (a) índice de vazios x tensão vertical efetiva	
(b) variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva. ....	242
Figura 150 – Solo DC02. Comparação entre as curvas do solo	
desestruturado e indeformado (a) índice de vazios x tensão vertical	
efetiva (b) variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva.....	243
Figura 151 – Solo DC03. Comparação entre as curvas do solo	
desestruturado e indeformado (a) índice de vazios x tensão vertical	
efetiva (b) variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva.....	244
Figura 152 - Solo DC04. Comparação entre as curvas do solo	
desestruturado e indeformado (a) índice de vazios x tensão vertical efetiva	
(b) variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva. ....	244
Figura 153 – Gráficos de resultados dos ensaios de adensamento	
edométrico em amostras natural e reconstituída do solo DC02 (a)	

Coeficiente de adensamento, (b) Coeficiente de variação volumétrica e (c) Coeficiente de permeabilidade, todos em função da tensão vertical efetiva.....	247
Figura 154 – Curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva em escala (a) semilogarítmica e (b) ambos os eixos em escala aritmética do solo DC02.....	249
Figura 155 – Curvas variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva dos ensaios unidimensionais (CRS e edométrico) do solo DC02 apresentadas com eixo em diferentes escalas (a) semilogarítmica, (b) aritmética e (c) log x log. ....	251
Figura 156 – Gráficos de resultados dos ensaios de adensamento edométrico em amostras natural e reconstituída do solo de Tanguá (T) (a) Coeficiente de adensamento, (b) Coeficiente de variação volumétrica e (c) Coeficiente de permeabilidade, todos em função da tensão vertical efetiva. ....	253
Figura 157 – Curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva em escala (a) semilogarítmica e (b) ambos os eixos em escala aritmética do solo residual de Tanguá (T).....	255
Figura 158 – Apresentação do resultado do ensaio de adensamento isotrópico no solo residual DC02 em conjunto com os resultados dos ensaios de adensamento edométrico e CRS. ....	257
Figura 159 – Resultado dos ensaios de adensamento do solo residual DC02 em função da deformação volumétrica normalizada com os eixos plotados em diferentes escalas. ....	258
Figura 160 – Apresentação do resultado do ensaio de adensamento isotrópico no solo residual Tem conjunto com os resultados dos ensaios de adensamento edométrico. ....	259
Figura 161 – Resultado dos ensaios de adensamento do solo residual T em função da deformação volumétrica normalizada com os eixos plotados em diferentes escalas. ....	260
Figura 162 – Molde tripartido e haste metálica com extremidade de acrílico circular utilizados na produção de corpos de prova com material reconstituído para execução de ensaios triaxiais. ....	269
Figura 163 – Montagem do corpo de prova para execução de ensaios triaxiais.....	270
Figura 164 – Aplicação de sucção no topo do corpo de prova para	

percolação de água (a) Visão geral e (b) sistema de válvulas para aplicação de contrapressão no topo e na base do corpo de prova. ....	272
Figura 165 – Tipo de ruptura típica do solo residual T (a) Ensaio SIA-T-25 e (b) PIE-T-75.....	280
Figura 166 – Ruptura típica do solo residual DC02 indeformado: formação de plano de cisalhamento.....	282
Figura 167 - Definição da tensão cisalhante na ruptura (de Campos e Carrillo, 1995). ....	283
Figura 168 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados no capítulo 8. ....	288
Figura 169 – Variação da razão das tensões efetivas principais ao longo dos ensaios executados com $\sigma'_c = 25$ kPa para diferentes métodos de saturação. ....	289
Figura 170 – Trajetórias de tensões dos ensaios CIU executados no solo T com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados no capítulo 8. ....	291
Figura 171 – Variação de volume total e variação de volume de água do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio PIE-T-25-2. ....	294
Figura 172 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio PIE-T-25-2.....	294
Figura 173 – Variação de volume total e variação de volume de água do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio PIA-T-25. ....	296
Figura 174 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio PIA-T-25.....	296
Figura 175 – Ensaio PIA-T-25: (a) Ampliação do trecho do gráfico da Figura 174 a partir da tensão de 300 kPa e (b) variação de volume total e do medidor de variação de volume a partir de 500kPa, ambas mostrando uma concordância entre o volume de água que entra (MVV) e a expansão (VVT) no corpo de prova. ....	297
Figura 176 – Variação de volume total e variação de volume de água	

do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio PIE-T-25-3. ....	298
Figura 177 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio PIE-T-25-3.....	299
Figura 178 – Variação de volume total e variação de volume de água do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio SIA-T-25. ....	300
Figura 179 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio SIA-T-25.....	300
Figura 180 – Variação de volume total (VVT) e registrada pelo medidor de variação de volume (MVV) dos ensaios SIA-T-25 e PIE-T-25-3 executados após a definição do procedimento de preenchimento da câmara. ....	301
Figura 181 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento PIE-T. ....	302
Figura 182 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por $\sigma'_c$ <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por $\sigma'_c$ <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento PIE-T.....	304
Figura 183 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento PIE-T e envoltória de resistência para a condição última empregando os dados apenas deste ensaio.....	305
Figura 184 – Curvas de razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios PIE-T.....	306
Figura 185 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_d \text{ máx}$ ) para os ensaios PIE-T.....	307
Figura 186 – Envoltória de resistência dos ensaios CIU executados no solo T para a condição última empregando os dados dos ensaios PIE-T.....	308
Figura 187 – Correlação entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ nos ensaios PIE-T.....	308
Figura 188 – Correlação entre o volume específico ( $1+e$ ) antes e após o adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério	



$\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ nos ensaios PIE-T.....	309
Figura 189 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento SIA-T. ....	310
Figura 190 - Curvas (a) tensão desviadora normalizada por $\sigma'_c$ <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por $\sigma'_c$ <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento SIA-T.....	311
Figura 191 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento SIA-T.....	312
Figura 192 – Curvas de razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios SIA-T.....	313
Figura 193 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_d \text{ máx}$ ) para os ensaios SIA-T. ....	314
Figura 194 – Envoltória de resistência dos ensaios CIU executados no solo T para a condição última empregando os dados dos ensaios SIA-T.....	314
Figura 195 – Correlação entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ nos ensaios SIA-T.....	315
Figura 196 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ nos ensaios SIA-T.....	315
Figura 197 – Envoltória de resistência do solo T para a condição última empregando os dados dos ensaios dos ensaios SIA-T e PIE-T. ....	316
Figura 198 – Linhas do Estado Crítico do solo de Tanguá.....	317
Figura 199 – Comparação das curvas $\sigma_d \times \epsilon_a$ e $\Delta u \times \epsilon_a$ dos ensaios realizados com os métodos de saturação SIA-T e PIE-T para as tensões efetivas de adensamento de 25 kPa (a,b), 75 kPa (c,d) e 150 kPa (e, f). ....	321
Figura 200 - Comparação das trajetórias de tensões dos ensaios executados com os métodos de saturação PIE-T e SIA-T.....	322
Figura 201 – Comparação qualitativa, dada a falta de instrumentação interna, da variação do módulo de deformação secante com a deformação para os ensaios executados com os métodos de saturação PIE e SIA com as tensões efetivas de adensamento (a) 25 kPa, (b) 75 kPa e (c) 150 kPa e variação do módulo $E_{s50\%}$	

com a tensão efetiva (d). .....	324
Figura 203 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados na Tabela 47. ....	329
Figura 204 – Variação da razão das tensões efetivas principais dos ensaios executados com $\sigma'_c = 25$ kPa para diferentes métodos de saturação (solo DC02). ....	329
Figura 205 – Trajetórias de tensões dos ensaios CIU executados no solo DC02 com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados na Tabela 47. ....	331
Figura 206 – Variação de volume total (VVT) e do volume de água do medidor de variação de volume (MVV) em função da tensão confinante durante a saturação por diferentes métodos do solo DC02 para $\sigma'_c = 25$ kPa. IE: incremento de contrapressão em estágios; IU: incremento único de contrapressão, IA: incremento automático de contrapressão; SIA: percolação de água (sucção) e incremento contínuo de contrapressão. ....	332
Figura 207 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio IE-DC02-25. ....	333
Figura 208 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio IA-DC02-25. ....	333
Figura 209 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio SIA-DC02-25. ....	334
Figura 210 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio IU-DC02-25. ....	336
Figura 211 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IE-DC02. ....	338
Figura 212 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por $\sigma'_c$ x deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por $\sigma'_c$ x deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o método IE. ....	339

Figura 213 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IE-DC02. ....	341
Figura 214 – Curvas da razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios IE-DC02. ....	342
Figura 215 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_d \text{ máx}$ ) para os ensaios IE-DC02. ....	343
Figura 216 – Proposta de envoltória de resistência não linear para baixos valores de $\sigma'_c$ - IE-DC02.....	343
Figura 217 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência ao cisalhamento considerando o ensaio IE-DC02-500 (a) e entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência ao cisalhamento na ruptura desconsiderando e considerando o ensaio executado com tensão efetiva próxima a de cedência do solo (IE-DC02-500)(b). ....	344
Figura 218 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento SIA-DC02. ....	346
Figura 219 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por $\sigma'_c$ x deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por $\sigma'_c$ x deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o método SIA.....	347
Figura 220 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento SIA-DC02.....	348
Figura 221 - Curvas da razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios SIA-DC02.....	349
Figura 222 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_d \text{ máx}$ ) para os ensaios SIA-DC02. ....	349
Figura 223 – Proposta de envoltória de resistência não linear para baixos valores de $\sigma'_c$ - SIA-DC02.....	350
Figura 224 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência ao cisalhamento de acordo com o critério $\sigma_{dmáx}$ (a) e a entre a tensão efetiva de adensamento e a	

resistência ao cisalhamento na ruptura (b).....	350
Figura 225 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) variação de poropressão <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IU. ....	352
Figura 226 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por $\sigma'_c$ x deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por $\sigma'_c$ x deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 empregando o método IU de saturação. ....	353
Figura 227 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IU-DC02. ....	354
Figura 228 - Curvas da razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios IU-DC02. ....	355
Figura 229 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_d \text{ máx}$ ) para os ensaios IU-DC02. ....	355
Figura 230 – Proposta de envoltória de resistência não linear para baixos valores de $\sigma'_c$ - IU-DC02. ....	356
Figura 231 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência ao cisalhamento (a) de acordo com o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ e (b) $\sigma_{d \text{ máx}}$ . ....	356
Figura 232 – Correlação entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência ao cisalhamento na ruptura. ....	357
Figura 233 – Curvas (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial dos ensaios CID executados em amostras reconstituídas do solo DC02. ....	359
Figura 234 – Corpos de prova ao final dos ensaios CID-DC02-75R, evidenciando a ruptura tipo barril (a), e CID-DC02-300R indicando o comportamento contrátil do CP. ....	360
Figura 235 – Envoltória de resistência do solo DC02 para a condição última empregando os dados de todos os ensaios CIU e dos CID em material reconstituído com $\sigma'_c = 25$ e 75 kPa (pontos em vermelho). Apesar de não ter sido empregado na estimativa da envoltória, o ponto correspondente ao ensaio CID-DC02-300R é representado pelo ponto azul sólido. ....	361
Figura 236 – Estimativa das linhas do Estado Crítico do solo DC02	

representadas no espaço de Cambridge.....	361
Figura 237 – Comparação das curvas $\sigma_d \times \epsilon_a$ e $\Delta u \times \epsilon_a$ dos ensaios CIU do solo DC02 executados com diferentes técnicas de saturação no solo DC02. ....	365
Figura 238 – Comparação das curvas $\sigma'_1 / \sigma'_3 \times \epsilon_a$ dos ensaios CIU do solo DC02 executados com diferentes técnicas de saturação.....	366
Figura 239 – Relação entre índice de vazios inicial e a máxima tensão desviadora (a) e a variação de volume durante o adensamento (b) para cada nível de tensão efetiva e método de saturação empregado. ....	368
Figura 240 – Variação do módulo de deformação secante com a deformação axial para cada nível de tensão efetiva de adensamento testado (análise qualitativa, dada a falta de instrumentação interna).....	369
Figura 241 – Variação do módulo de deformação secante correspondente a 50% da máxima tensão desviadora.....	370
Figura 242 – Curvas de plastificação obtidas pelos diferentes métodos de saturação correspondente a região de plastificação da estrutura por cisalhamento, definida por Leroueil e Vaughan (1990). ....	371
Figura 243 – Comparação das trajetórias de tensões dos ensaios CIU executados com diferentes técnicas de saturação – solo DC02. ....	373

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento edométrico inundado em amostras indeformadas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba-PR (Boszczowski, 2008).	65
Tabela 2 – Valores médios dos índices físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais e parâmetros de resistência dos solos pertencentes ao perfil de intemperismo de um gnaiss facoidal estudado por Maciel (1991).	74
Tabela 3 – Pressões teóricas requeridas para saturação (Head, 1986).	101
Tabela 4 - Parâmetros de poropressão B e A* (Brand, 1975).	106
Tabela 5– Dados empregados para obter a relação entre a variação de volume total do corpo de prova e a variação de massa registrada pela balança sem a utilização de corpo de prova.	154
Tabela 6 – Comparação entre a variação de volume obtida pelo medidor de variação de volume (MVV) e a variação de volume empregando-se o fator de correlação determinado.	155
Tabela 7– Variação de volume do sistema entre estágios de tensões confinantes para aumento brusco de tensão.	158
Tabela 8 - Comparação dos valores de variação de volume total do sistema devido ao aumento de tensão confinante obtidos nos ensaios de calibração e aplicando a equação de calibração determinada.	160
Tabela 9: Ensaios físico-químico-mineralógicos executados.	177
Tabela 10 – Resultados de ensaios de caracterização dos solos do perfil de Duque de Caxias	188
Tabela 11 – Porosidade por injeção de mercúrio dos solos de Duque de Caxias	192
Tabela 12 - Distribuição de poros em porcentagem segundo a IUPAC	192
Tabela 13 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC01	195
Tabela 14 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC02.	195
Tabela 15 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC03.	196
Tabela 16 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC04.	196

Tabela 17 – Parâmetros das curvas de retenção e dos ajustes pela equação de van Genuchten (1980).	198
Tabela 18 – Perda ao fogo a 600 °C dos solos residuais do perfil de migmatito.	203
Tabela 19 Fração areia dos solos pertencentes ao perfil de intemperismo de Duque de Caxias.	205
Tabela 20 – Resultados da análise química total dos solos de Duque de Caxias	210
Tabela 21 - Resultado de Ataque Sulfúrico dos solos de Duque de Caxias	211
Tabela 22 – Resultado de complexo sortivo e pH.	211
Tabela 23 – Resultados de ensaios de caracterização do solo de Tanguá (T)	211
Tabela 24- Distribuição de poros em porcentagem segundo a IUPAC para o solo de Tanguá (T)	213
Tabela 25 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo Tanguá.	215
Tabela 26 - Parâmetros das curvas de retenção e do ajuste pela equação de van Genuchten (1980) para o solo residual de Tanguá (T).	216
Tabela 27 – Fração areia do solo residual de Tanguá	219
Tabela 28 - Programa de ensaios de compressão	227
Tabela 29 – Dados dos corpos de prova e resultados dos ensaios CRS nos solos residuais de migmatito.	234
Tabela 30 – Índices de compressão e expansão dos ensaios CRS nos solos residuais de migmatito.	235
Tabela 31 – Tensão de cedência dos solos residuais de Duque de Caxias obtidos a partir dos resultados de ensaios CRS através do método Pacheco e Silva.	237
Tabela 33 – Dados dos corpos de prova dos ensaios edométricos do solo DC02.	245
Tabela 34 – Resultados dos ensaios de adensamento edométrico do solo DC02 no estado natural e reconstituído.	246
Tabela 35 – Tensões de cedência do solo DC02 estimadas através do método Pacheco e Silva e do prolongamento dos trechos da curva do ensaio edométrico.	248
Tabela 36 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensionais do solo DC02 no estado natural e reconstituído.	250

Tabela 37 – Dados dos corpos de prova dos ensaios edométricos executados em amostras indeformada e reconstituída do solo residual de Tanguá (T)	252
Tabela 38 – Resultados dos ensaios de adensamento edométrico do solo T no estado natural e reconstituído.	252
Tabela 39 – Tensões de cedência do solo residual de Tanguá estimadas através do método Pacheco e Silva e do prolongamento dos trechos da curva do ensaio edométrico.	254
Tabela 40 – Dados do corpo de prova do ensaio isotrópico com amostra indeformada do solo DC02.	256
Tabela 41 – Dados do corpo de prova do ensaio isotrópico com amostra indeformada do solo T.	259
Tabela 42 – Tensões de cedência estimadas e índice de compressão do solo residual de Tanguá submetido ao ensaio de adensamento isotrópico.	259
Tabela 43 – Programa de ensaios triaxiais	267
Tabela 44 – Rotinas de saturação avaliadas em cada solo.	276
Tabela 45 – Programa de ensaios CIU empregando cada método de saturação.	276
Tabela 46 – Programa de ensaios triaxiais do solo T.	284
Tabela 47 – Descrição das rotinas de saturação avaliadas no solo T.	284
Tabela 48 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 25$ kPa utilizados na avaliação dos processos de saturação do solo T.	285
Tabela 49 - Módulos de deformação para os ensaios executados com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa no solo residual de Tanguá (T).	290
Tabela 50 – Variação de volume durante a saturação e adensamento dos ensaios no solo T com $\sigma'_c = 25$ kPa e medida de variação de volume total.	292
Tabela 51 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 75, 150$ e 300 kPa do solo T saturado com o procedimento PIE	302
Tabela 52 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação PIE-T.	305
Tabela 53 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 75$ e 150kPa do solo T saturado com o procedimento SIA .	309
Tabela 54 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação SIA-T.	312



Tabela 55 - Parâmetros de Estado Crítico do solo T.	317
Tabela 56 – Programa de ensaios triaxiais do solo DC02.	326
Tabela 57 – Descrição das rotinas de saturação avaliadas no solo DC02.	326
Tabela 58 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 25$ kPa utilizados na avaliação dos processos de saturação do solo DC02.	327
Tabela 59 - Módulos de deformação para os ensaios executados com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa no solo residual DC02.	330
Tabela 60 – Variação de volume durante a saturação e adensamento dos ensaios no solo DC02 com $\sigma'_c = 25$ kPa e medida de variação de volume total.	336
Tabela 61 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU do solo DC02 saturado com o procedimento IE .	336
Tabela 62 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação IE no solo residual DC02.	340
Tabela 63 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU do solo DC02 saturado com o procedimento SIA.	344
Tabela 64 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação IE no solo residual DC02.	347
Tabela 65 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU do solo DC02 saturado com o procedimento IU.	351
Tabela 66 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação IU no solo residual DC02.	354
Tabela 67 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CID do solo DC02 executados em amostras com material reconstituído.	358
Tabela 68 – Parâmetros de Estado Crítico do solo DC02.	361
Tabela 69 – Pontos de plastificação obtidos nos ensaios CIU do solo DC02.	371
Tabela 70 – Parâmetros de resistência de ruptura obtidos a partir dos ensaios executados com diferentes técnicas de saturação. Solo DC02.	374
Tabela 71 – Dados de ruptura do solo residual de Tanguá. Método de saturação PIE-T.	400
Tabela 72 – Dados de ruptura do solo residual de Tanguá. Método de saturação SIA-T.	400
Tabela 73 – Dados de ruptura do solo residual DC02. Método de saturação IE-DC02.	400
Tabela 74 – Dados de ruptura do solo residual DC02. Método de	

saturação SIA-DC02.	401
Tabela 75 – Dados de ruptura do solo residual DC02. Método de saturação IU-DC02.	401

## Lista de símbolos e abreviações

# = diâmetro da abertura da malha da peneira

% = porcentagem

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

$\text{Al}^{+3}$  = cátion de Alumínio

ASTM = American Society for Testing and Materials

ATD = Análise Termodiferencial

atm = atmosfera

C = celsius

$c'$  = intercepto coesivo

$\text{Ca}^{+2}$  = cátion de cálcio

Cc = coeficiente de compressibilidade

Cd = coeficiente de expansão

$\text{Cl}^-$  = ânion de cloro

cm = centímetro

CTC = capacidade de troca catiônica

Cv = coeficiente de adensamento

d = diâmetro

DCMM = Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia

e = índice de vazios

EDS = Analisador de Energia Dispersiva

Es = módulo de elasticidade secante

$e_0$  = índice de vazios inicial

$e_{\text{adensto}}$  = índice de vazios após o adensamento

EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisas Agrárias

g = grama

Gs = peso específico real dos grãos

h = altura

$\text{H}^+$  = cátion de hidrogênio

IP = índice de plasticidade

IUPAC = União Internacional da Química Pura e Aplicada

k = coeficiente de permeabilidade

$\text{K}^+$  = cátion de potássio

kg = quilograma

km = quilometro

kN = quilonewton

kPa = quilopascal  
 LL = limite de liquidez  
 LP = limite de plasticidade  
 ln = logaritmo neperiano  
 log = logaritmo  
 LVTD = *Linearly Variable Differential Transformer*  
 m= metro  
 M = inclinação da linha do estado crítico no plano p':q  
 MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura  
 $Mg^{+2}$  = cátion de magnésio  
 min = minuto  
 mm= milímetro  
 MPa = megapascal  
 $m_v$  = coeficiente de variação volumétrica (ensaio edométrico)  
 N = newton  
 n = porosidade  
 n, m e  $\alpha$  = parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980)  
 $Na^+$  = cátion de sódio  
 NBR = norma brasileira  
 $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$   
 Pa = pascal  
 PUC = Pontifícia Universidade Católica  
 PVC = poli cloreto de vinila  
 $q = \sigma_d = \sigma'_1 - \sigma'_3$   
 $q_{sc} = \sigma'_1 - \sigma'_3$  na condição de estado crítico  
 $R^2$  = coeficiente de correlação  
 S = grau de saturação  
 s = segundo  
 $s' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$   
 SE = superfície específica  
 $Si^{+4}$  = cátion de silício  
 SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos  
 CTC = capacidade de troca catiônica  
 T = temperatura  
 $t = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$   
 u = poropressão  
 $\mu m$  = micro metro  
 VVT = variação de volume total  
 w = umidade  
 $w_0$  = umidade inicial

$w_f$  = umidade final

$w_{nat}$  = umidade natural

$w_s$  = teor de umidade gravimétrica para solo saturado

$w_r$  = teor de umidade gravimétrica residual

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo

$\emptyset$  = diâmetro

$\Delta$  = variação

$\epsilon_a$  = deformação axial

$\Psi$  = inclinação da linha do estado crítico no plano  $\ln p'$ :  $v$

$\Psi_{ar}$  = sucção de entrada de ar

$\Psi_{res}$  = sucção de residual

$\alpha$  = inclinação

$\gamma$  = peso específico

$\gamma_d$  = peso específico seco

$\gamma_{nat}$  = peso específico natural

$\gamma_w$  = peso específico da água

$\theta_r$  = teor de umidade volumétrico residual

$\theta_s$  = teor de umidade volumétrico saturado

$\theta$  = teor de umidade volumétrico

$\sigma'$  = tensão efetiva

$\sigma'_1$  = tensão efetiva maior

$\sigma'_3$  = tensão efetiva menor

$\sigma'_c$  = tensão efetiva de adensamento

$\sigma_d$  = tensão desviadora:  $\sigma'_1 - \sigma'_3$

$\sigma'_v$  = tensão vertical efetiva

$\sigma'_y$  = tensão de cedência

$\sigma_1$  = tensão principal maior

$\sigma_3$  = tensão principal menor

$v$  = volume específico (1+e)

$v_{cs}$  = volume específico no estado crítico

$\Gamma$  = volume específico na condição do estado crítico para  $p' = 1 \text{ kPa}$ .