



**Fábio de Albuquerque Caldeira Brant**

**Propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas  
de um perfil de solo residual basáltico localizado em um  
corte da Ferrovia Norte-Sul, no estado de Tocantins**

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

Rio de Janeiro  
Maio de 2005

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**Fábio de Albuquerque Caldeira Brant**

**Propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas  
de um perfil de solo residual basáltico localizado em um  
corte da Ferrovia Norte-Sul, no estado de Tocantins**

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.

**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. José Tavares Araruna Jr.**

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

**Prof. Sérgio Tibana**

UENF

**Prof. George de Paula Bernardes**

UNESP-FEG

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de maio de 2005

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

### **Fábio de Albuquerque Caldeira Brant**

Graduou-se em Engenharia Civil pela PUC-Rio em 2000. Ingressou no Curso de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Geotecnia no ano de 2003, cujo interesse acadêmico está vinculado a Geotecnia Experimental.

#### Ficha Catalográfica

Brant, Fábio de Albuquerque Caldeira

Propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas de um perfil de solo residual basáltico localizado em um corte da Ferrovia Norte-Sul, no estado de Tocantins / Fábio de Albuquerque Caldeira Brant; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos, Franklin dos Santos Antunes – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

v., 153 f. :il. ; 29,7 cm.

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

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Perfil intempérico. 3. Basalto. 4. Ensaio químicos, mineralógicos e geomecânicos. 5. Rocha de caráter básico. 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

## DEDICATÓRIA

A Deus que sempre me guiou.  
Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e carinho.  
A minha noiva, Rocio, que mesmo em  
momentos distantes sempre me apoiou com  
todo amor e compreensão.

## Agradecimentos

Aos Professores Tacio Mauro Pereira de Campos e Franklin dos Santos Antunes pela orientação, apoio e companheirismo ao longo do curso.

A CAPES e ao Grupo Pronex pelo apoio financeiro.

A Valec Engenharia e Construções e Ferrovias SA, em especial a Diretoria por ter cedido informações e todo apoio logístico no local de estudo; e aos funcionários Luiz Raimundo de Azevedo, Jorge Mesquita, Luiz Antônio Barreto, Luiz Heleno Albuquerque e sua esposa Dona Siléia, Carlos Miguel Pires, Renato Lustosa, Jadilson, Francisco Amorim, Beatriz Barbosa, Ana lúgia Paixão, Genivaldo, Weden e Tampinha. A vocês meus amigos agradeço por todo companheirismo e apoio enquanto estive trabalhando na Ferrovia, até os dias de hoje.

Aos amigos da PUC, Bernardo Bastos, Julio Macías e Ricardo Soares, pela ajuda e amizade prestadas ao longo desse curso.

A todos Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Ao Ronaldo, funcionário do Laboratório de Difração de raio-X do DCMM, que sempre se mostrou disposto em colaborar.

Aos geólogos Ana Valéria, Luiz Carlos Bertolino e Joel Valença pelo apoio quanto à interpretação de lâminas de solo e rocha.

Ao engenheiro Jorge Pimentel, funcionário da CPRM, que se mostrou sempre solícito quando solicitado.

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento dessa dissertação.

## Resumo

Brant, Fábio de Albuquerque Caldeira; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Antunes, Franklin dos Santos. **Propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas de um perfil de solo residual basáltico localizado em um corte da Ferrovia Norte-Sul, no estado de Tocantins.** Rio de Janeiro, 2005. 153p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Embora uma vasta área do Brasil esteja localizada em regiões que a formação de basalto se faz presente, são raros os estudos em perfis contendo solo e / ou rochas de caráter básico objetivando correlacionar características químicas e mineralógicas com características geotécnicas. A área do presente estudo localiza-se em um corte em solo na Ferrovia Norte-Sul, no Município de Arguanópolis-TO, em que durante sua execução ocorreram diversos escorregamentos. O maciço de solo do corte em questão é composto em sua maior parte por solos provenientes de alteração de basalto. O presente estudo foi realizado em duas etapas. A primeira refere-se à visita ao local do corte, onde foram realizadas coletas de amostras de solo de caráter indeformado e deformado, com as respectivas descrições morfológicas dos mesmos. A segunda refere-se aos trabalhos desenvolvidos nos laboratórios de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio, EMBRAPA SOLOS e Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ, abrangendo ensaios de caracterização; ensaios mineralógicos; análises químicas; obtenção das curvas características solo-água; ensaios de erodibilidade; ensaios especiais para a determinação de parâmetros de resistência e de compressibilidade. A partir dos resultados obtidos, espera-se que os mesmos proporcionem uma contribuição para o melhor entendimento de perfis intempéricos em rochas de caráter básico.

## Palavras-chave

Perfil intempérico, basalto; ensaios químicos, mineralógicos e geomecânicos, rocha de caráter básico.

## Abstract

Brant, Fábio de Albuquerque Caldeira; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor); Antunes, Franklin dos Santos (Advisor). **Physical, chemical, mineralogical and mechanical properties of a basaltic residual soil profile from a cut in the North-South Railway in the state of Tocantins.** Rio de Janeiro, 2005. 153p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In spite of the fact that basalt formations are found in several regions in Brazil, it is difficult to find investigations on the subject relating chemical and mineralogical characteristics with geotechnical ones. The site of the present study comprises a soil slope on the North-South Railroad, at Arguanópolis, Tocantins State. Several landslides occurred during the construction of the railway. The soil mass is mostly composed by soils resulting from basalt alterations. The present study was developed in two stages. The first stage comprised a visit to the site, when a morphologic description of profiles was made and undisturbed and remoulded soil samples were extracted. The second stage refers to works developed at the Geotechnical and Environmental Laboratory of PUC-Rio, at EMBRAPA Soils and at the Geology Department of the Institute of Geosciences of the UFRJ. Such works comprised soil characterization tests; mineralogical tests; chemical analyses; definition of soil-moisture characteristic curves; erodibility tests and special tests to determine strength and compressibility parameters. The results obtained provide a contribution to a better understanding of weathering profiles in rocks of basic character.

## Keywords

Weathering profile, basalt; chemical, mineralogical and geomechanical laboratory tests, rock of basic character.



# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1. Objetivo	21
1.2. Escopo do Trabalho	22
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>23</b>
2.1. Perfis de Solos Residuais de Rochas Ácidas e Intermediárias	23
2.2. Perfis de Solos de Rochas Básicas	26
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO</b>	<b>32</b>
3.1. Localização	32
3.2. Condições Climáticas do Local	34
3.3. Vegetação	35
3.4. Características Geológicas da Área	35
3.5. Solos	37
3.6. Algumas Considerações do Local de Estudo	37
<b>4 ESTUDOS REALIZADOS E METODOLOGIAS ADOTADAS</b>	<b>40</b>
4.1. Coleta de Amostras	40
4.2. Ensaio de Laboratório	48
4.2.1. Determinação de Índices Físicos	48
4.2.1.1. Ensaio de Caracterização	49
4.2.2. Análise Mineralógica	50
4.2.3. Caracterização Química	53
4.2.4. Curva Característica	55
4.2.4.1. Metodologia Utilizada	56
4.2.5. Erodibilidade	60
4.2.5.1. Metodologia do Ensaio de Desagregabilidade	61
4.2.6. Compressibilidade	62
4.2.6.1. Procedimento utilizado – Ensaio Edométrico	63
4.2.7. Avaliação de Expansibilidade	64

4.2.7.1. Inserção de Etilenoglicol	65
4.2.7.2. Ensaio de Expansão Axial com Confinamento Lateral e sem Sobrecarga Axial	66
4.2.8. Resistência ao Cisalhamento	66
4.2.8.1. Cisalhamento Direto	66
4.2.8.1.1. Preparação das Amostras	68
4.2.8.1.2. Metodologia Utilizada	69
4.2.8.2. Ensaio Triaxial Drenado	70
4.2.8.2.1. Preparação das Amostras	72
4.2.8.2.2. Metodologia Utilizada	73

## **5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

	<b>74</b>
5.1. Ensaio de Caracterização	74
5.1.1. Índices físicos do estado natural	74
5.1.2. Granulometria	77
5.1.3. Limites de Atterberg	79
5.1.4. Atividade das Argilas e Classificação SUCS	80
5.2. Análises Mineralógicas	82
5.2.1. Lâminas Delgadas	82
5.2.2. Fração Fina (Silte e Argila)	88
5.2.3. Fração Areia	92
5.3. Análise Química	93
5.4. Curva Característica	95
5.5. Ensaio de Desagregabilidade	98
5.6. Ensaio de Adensamento	102
5.7. Avaliação de Expansibilidade	104
5.8. Ensaio de Cisalhamento Direto	105
5.8.1. Solo Coluvionar	105
5.8.2. Solo Residual 1	108
5.8.3. Solo Residual 2	111
5.8.4. Solo Residual 3	117
5.9. Ensaio Triaxial Drenado	119

<b>6 ANÁLISE CONJUNTA DOS RESULTADOS</b>	<b>123</b>
6.1. Análise Conjunta dos Resultados dos Ensaio de Caracterização, Mineralogia e Análises Químicas.	123
6.2. Ensaio de Desagregabilidade	129
6.3. Ensaio Edométrico	130
6.4. Avaliação de Expansibilidade	134
6.5. Ensaio de Resistência	134
<b>7 CONCLUSÕES</b>	<b>142</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>147</b>

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Frações Granulométricas, $G_s$ , limites de consistência e IA dos solos estudados por Tanaka (1975).	27
Tabela 2 – Índice de vazios iniciais e parâmetros efetivos de resistência de pico dos solos estudados por Tanaka (1975).	27
Tabela 3 – Frações Granulométricas, $G_s$ , limites de consistência e IA dos solos estudados por Rigo (2002).	29
Tabela 4 - Índice de vazios iniciais e parâmetros efetivos de resistência de pico dos solos estudados por Rigo (2002).	29
Tabela 5 – Granulometria dos horizontes estudados por Lacerda et al. (2002).	30
Tabela 6 - Dados analíticos através de espectrometria de fluorescência de raios-X dos elementos maiores-óxidos constituintes, Lacerda et al. (2002).	30
Tabela 7 – Granulometria, limites de Atterberg, $G_s$ , IA e parâmetros efetivos de resistência de pico do solo estudado pela EPC (1986).	31
Tabela 8 - Localização dos poços de coleta e inspeção.	44
Tabela 9 – Índices físicos dos solos estudados	75
Tabela 10 – Peso específico dos grãos de alguns minerais (modificado – Deer et al, 1981).	75
Tabela 11 – Resultados ensaios de granulometria dos solos em estudo.	78
Tabela 12 – Limites de consistência dos SR1, SR2 e SR3.	80
Tabela 13 – Resultado dos ensaios de complexo sortivo.	93
Tabela 14 – Resultado dos ensaios de pH e ataque sulfúrico.	93
Tabela 15 – Análise química semiquantitativa de óxidos para os solos SR1, SR2, SR3 e rocha alterada.	94
Tabela 16 – Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SC para a obtenção da curvas características.	95
Tabela 17 - Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR1 para a obtenção da curvas características.	95
Tabela 18 - Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR2 para a	

obtenção da curvas características.	96
Tabela 19 - Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR3 para a obtenção da curvas características.	96
Tabela 20 – Índices físicos das amostras submetidas ao ensaio edométrico.	103
Tabela 21 – Índices físicos iniciais dos cp's submetidos ao ensaio de expansão.	104
Tabela 22 – Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SC submetidos ao cisalhamento direto drenado.	106
Tabela 23 – Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SC.	107
Tabela 24 - Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SR1 submetidos ao cisalhamento direto drenado.	109
Tabela 25 - Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SR1.	110
Tabela 26 - Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SR2 submetidos ao cisalhamento direto drenado.	113
Tabela 27 - Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SR2.	116
Tabela 28 - Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SR3 submetidos ao cisalhamento direto drenado.	118
Tabela 29 - Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SR3.	119
Tabela 30 – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais.	120
Tabela 31 – Parâmetros de resistência dos ensaios triaxiais $CD_{sat}$ .	122
Tabela 32 - Teores de Óxidos de Ferro e densidade dos grãos dos solos em estudo.	127
Tabela 33 - Tensões de Pré-Adensamento virtual e parâmetros Compressibilidade dos solos estudados	131
Tabela 34 – Tabela com faixa tensão de fechamento de fraturas e tensão virtual de pré-adensamento para os solos SR2 e SR3.	138
Tabela 35 – Parâmetros de resistência para os solos em estudo.	141

## Lista de figuras

Figura 1- Mapa com o Traçado da Ferrovia Norte-Sul (fonte: Valec, 2004).	33
Figura 2 - Precipitações pluviométricas mensais (fonte: EPC,1986).	34
Figura 3 - Número de dias com chuva em um dado mês (fonte: EPC, 1986).	35
Figura 4 - Mapa geológico da área em estudo (Fonte: CPRM, 2004).	37
Figura 5 - Croqui com localização dos escorregamentos no emboque sul do corte 1 CESBE(2000).	38
Figura 6 - Deslizamento entre as estacas km 229 + 24 a 229 +060 LD	39
Figura 7 - Deslizamento, estaca km 229+ 120 LE.	39
Figura 8 – Fratura inclinada apresentando estrias de fricção no talude de solo residual.	41
Figura 9– Compartilhamentos de fraturas sub-horizontais e sub-verticais no solo residual jovem.	42
Figura 10– Solo coluvionar ou vestígio de capeamento antigo.	42
Figura 11- Arenito apresentando descontinuidades sub-horizontais e sub-verticais.	43
Figura 12- Corte 1, Emboque Sul, LD – Locais de onde foram retirado amostras.	44
Figura 13 – Perfil esquemático da distribuição dos solos	47
Figura 14 – Croquis do perfil longitudinal do eixo da Ferrovia no “Corte 1”, com a distribuição dos solos em estudo, bem como com as cotas dos níveis d’água.	47
Figura 15 – Amostras com fraturas sub-horizontais dispostas aleatoriamente.	59
Figura 16 - Amostras de SR2 apresentando redução de volume após secagem.	59
Figura 17 – SR2 apresentando trincas, após secagem ao ar.	59
Figura 18 – Amostras de SR1, SR2 e SR3, que seriam imersas em etilenoglicol.	65

Figura 19 – Prensa de Cisalhamento Direto pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC–RIO.	67
Figura 20 - Prensa de Ensaio Triaxial pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC–RIO.	71
Figura 21 – Moldagem de amostras do SR2, com fraturas com inclinação de 45°.	72
Figura 22 – Curvas granulométricas dos solos em estudo.	77
Figura 23 – Graus de potencialidade de expansão (Willians, 1958 e Van Der Merwe, 1975).	81
Figura 24 – Fotomicrografia da rocha diabásio com luz natural, em que (F) são os Feldspatos Calco-Sódicos e (P) são os piroxênios em processo de oxidação.	84
Figura 25 - Fotomicrografia da rocha de diabásio com luz polarizada em que (F) são os Feldspatos Calco-Sódicos e (P) são os piroxênios em processo de oxidação.	84
Figura 26 – Fotomicrografia do solo residual 3 (SR3), em que (F) são feldspatos calco-sódicos apresentando um microfraturamento.	85
Figura 27 – Fotomicrografia do solo residual 2 (SR2), mostrando os feldspatos calco-sódicos completamente argilizados.	85
Figura 28 – Fotomicrografia do solo residual 1 (SR1), mostrando o contacto com o solo coluvionar (acima), em que (Q) são grãos de quartzo pertencentes ao solo coluvionar.	86
Figura 29 – Detalhe de uma amígdala (A) presente no solo residual 1 (SR1).	86
Figura 30 – Detalhe do solo coluvionar (SC), apresentando diferenciações quanto a sua cimentação, sendo que (Q) são grãos de quartzo.	87
Figura 31 – Detalhe de um arenito presente no perfil, apresentando grãos de quartzo (Q) arredondados e facetados.	87
Figura 32– Difratoograma de Raios- X de argila do solo coluvionar.	89
Figura 33- Difratoograma de raios-x de argila do solo residual 1 – amostra natural.	89
Figura 34 - Difratoograma de raios-x de argila do solo residual 2 – amostra natural.	90

Figura 35 – Difratoograma de raios X de material esverdeado do solo SR2.	90
Figura 36 - Difratoograma de raios-x de argila do SR3 (natural e glicolada).	91
Figura 37 - Difratoograma de raios- X de silte do solo residual 3 (natural e glicolada).	91
Figura 38 – Curvas características de Grau de Saturação versus Sucção Mátrica para os solos em estudo.	97
Figura 39 - Curvas características de Umidade Volumétrica versus Sucção Mátrica para os solos em estudo.	97
Figura 40 - Curvas características de Umidade Gravimétrica versus Sucção Mátrica para os solos em estudo.	98
Figura 41 – Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA na base.	100
Figura 42- Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA 1/3 da altura das amostras.	100
Figura 43 - Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA 2/3 da altura das amostras.	101
Figura 44 - Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA igual a altura das amostras, após 2 h.	101
Figura 45 - Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA igual a altura das amostras, após 24h.	102
Figura 46 – Relações de $e \times \log \sigma'_v$ obtidas no ensaio edométrico para SC, SR1, SR2 e SR3.	103
Figura 47 – Gráfico de altura de amostra (mm) versus tempo (min).	104
Figura 48 – Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ), para o solo coluvionar.	107
Figura 49 – Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ), para o solo coluvionar.	107
Figura 50 – Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo coluvionar.	108
Figura 51 - Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ), para o solo residual 1.	110



Figura 52 - Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ), para o solo residual 1.	110
Figura 53 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual 1.	111
Figura 54 - Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ), para o solo residual 2 utilizando rotina 1.	114
Figura 55 - Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ), para o solo residual 2 utilizando rotina 1.	114
Figura 56 - Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) para o solo residual 2 utilizando rotina 2.	115
Figura 57 - Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) para o solo residual 2 utilizando rotina 2.	115
Figura 58 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual 2 utilizando rotina 1 e 2.	116
Figura 59 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual 3.	118
Figura 60 - Curvas de deslocamento horizontal versus deslocamento vertical, para o solo residual 3.	118
Figura 61 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual 3.	119
Figura 62 - Curvas de tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) versus deformação axial ( $\epsilon_a$ ) para os solos residuais SR3 e SR2.	121
Figura 63 - Curvas deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) versus deformação axial ( $\epsilon_a$ ) para os solos residuais SR3 e SR2.	121
Figura 64 – Trajetória de tensões efetivas no diagrama q versus $p'$	122
Figura 65 - Curvas características de Umidade Volumétrica versus Sucção Mátrica para os solos em estudo.	129
Figura 66 – Gráficos de coeficiente de variação Volumétrica ( $m_v$ ) versus Tensão efetiva para os solos SC, SR1, SR2 e SR3 obtidos através dos ensaios de adensamento edométricos.	131
Figura 67 – Curvas $\Delta e/(e_0+1)$ versus $\log(\sigma')$ , obtidas através do ensaio edométrico	132

Figura 68 – Gráficos de $\log k$ versus $\log \sigma'$ , obtidas através dos ensaios edométricos.	133
Figura 69 – Envoltórias de resistência de pico através das metodologia 1 e 2 obtidas para o solo SR2.	135
Figura 70 - Curvas $\Delta e/(e_0+1)$ versus $\log(\sigma')$ , obtidas através do ensaio edométrico para os solos SR3 e SR2, além de resultados de adensamento obtidos nos ensaios de cisalhamento direto através da metodologia 1 e 2.	136
Figura 71 - Gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal com os resultados de ensaio de cisalhamento direto (CD) do SR1, e resultados obtidos nos ensaios triaxiais.	137
Figura 72 - Gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal com os resultados de ensaio de cisalhamento direto (CD) do SR2 e resultados obtidos nos ensaios triaxiais.	137
Figura 73 – Gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal com os resultados de ensaio de cisalhamento direto (CD) do SR3, e resultados obtidos nos ensaios triaxiais.	138
Figura 74 – Envoltória de resistência para os solos SR2 e SR3 influenciada pelas fraturas.	139
Figura 75 – Envoltórias de resistências para os solos em estudo.	140

## Lista de Abreviaturas

A: horizonte pedológico  
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas  
Al: alumínio  
 $Al^{+3}$ : cátion de Alumínio  
B: horizonte Pedológico  
BR: rodovia Federal  
C: horizonte pedológico  
c: coesão do solo  
c': coesão efetiva do solo  
 $Ca^{+2}$ : cátion de cálcio  
cc: Índice de Compressibilidade  
CD: Cisalhamento direto  
CNPS: Centro Nacional de Pesquisa de Solos  
Corte 1: Corte em solo, objeto desse estudo  
CP: corpo de Prova  
CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
DEC: Departamento de Engenharia Civil  
Depto.: Departamento  
e: índice de vazios  
 $e_i$ : índice de vazios inicial  
EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisas Agrárias  
FA: fração argila  
FF: fração de finos  
FNS: Ferrovia Norte-Sul  
GPS: Global Positioning System  
GO: Goiás  
 $G_s$ : densidade relativa dos grãos  
H: horizontal  
h: hora  
 $H^+$ : cátion de hidrogênio

IA : índice de atividade  
IP : índice de Plasticidade  
K: Coeficiente de permeabilidade  
 $K^+$  : cátio de potássio  
km : quilômetro  
 $km^2$  : quilômetro quadrado  
kg : kilograma  
kPa : kilopascal  
l: litro  
LD: Lado direito  
LE: Lado esquerdo  
LL: limite de liquidez  
log: logaritmo  
LP: limite de plasticidade  
MA: Maranhão  
MG: Minas Gerais  
 $Mg^{+2}$  : cátion de magnésio  
m: metro  
min: minuto  
ml: mililitro  
mm: milímetro  
 $m_v$ : coeficiente de variação volumétrica  
N : normal  
n: porosidade  
 $n^\circ$  : número  
pH: potencial de hidrogenização  
PIC: poço de inspeção e coleta  
RS: Rio Grande do Sul  
s: segundo  
S: Grau de Saturação  
 $S_i$ : Grau de Saturação Inicial  
SC: solo coluvionar  
SR1: solo residual um

SR2: solo residual dois

SR3 : solo residual três

SUCS : Sistema Unificado de Classificação dos Solos

T: Capacidade de Troca Catiônica

t: tonelada

TO: Tocantins

V: Vertical

$w_h$ : umidade higroscópica

w: umidade gravimétrica

%: porcentagem

°: graus

$\beta$ : índice de lixiviação

$\delta_h$ : deslocamento horizontal

$\delta_v$ : deslocamento vertical

$\gamma_d$ : peso específico aparente seco

$\gamma_t$ : peso específico total

$\sigma$ : tensão normal

$\sigma'$ : tensão normal efetiva

$\sigma_d$ : tensão normal desviadora

$\tau$ : tensão cisalhante

$\emptyset$ : ângulo de atrito interno

$\phi'$ : ângulo de atrito interno efetivo

$\epsilon_v$ : deformação volumétrica

$\epsilon_a$ : deformação axial

# 1 INTRODUÇÃO

Em obras de construção civil é bastante comum a re-adequação de projetos durante a fase de construção por motivo de insuficiência de informações geológico-geotécnicas do meio, coletadas durante a fase de projeto. Em se tratando de obras lineares, estudos geológico-geotécnicos pós-projeto podem vir a ser de grande importância, contribuindo para uma melhor eficiência e segurança na implantação de obras.

Embora uma vasta área do Brasil esteja localizada em regiões em que a formação de basalto se faz presente, são raros os estudos em perfis contendo solo e / ou rochas de caráter básico objetivando correlacionar características químicas e mineralógicas com características geotécnicas.

A área do presente estudo localiza-se em um corte em solo na Ferrovia Norte-Sul, no Município de Arguanópolis-TO, em que durante sua execução ocorreram diversos escorregamentos. O maciço de solo do corte em questão é composto em sua maior parte por solos provenientes de alteração de basalto, cuja textura varia de basaltos afaníticos vesiculo-amigdaloidais até diabásios de granulação média; a presença de um solo coluvionar e arenitos interdigitados no maciço também eram notados.

## 1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico dos solos pertencentes ao maciço do corte, objeto desse estudo, correlacionando características químicas e mineralógicas com características geotécnicas. Para tanto, tal estudo foi realizado em duas etapas.

A primeira refere-se à visita ao local do corte, onde foram realizadas coletas de amostras de solo de caráter indeformado e deformado, com as respectivas descrições morfológicas dos mesmos.

A segunda refere-se aos trabalhos desenvolvidos nos laboratórios de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio, EMBRAPA SOLOS e Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ, abrangendo ensaios de caracterização; ensaios mineralógicos; análises químicas; obtenção das curvas características; ensaios de erodibilidade; ensaios especiais para a determinação de parâmetros de resistência e de compressibilidade.

A partir dos resultados obtidos, espera-se que os mesmos proporcionem uma contribuição para um melhor entendimento de perfis intempéricos em rochas de caráter básico.

## **1.2.**

### **Escopo do Trabalho**

Esta dissertação está dividida em 8 (oito capítulos), incluindo esta introdução. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica abordando estudos que tiveram como objetivo correlacionar características químicas e mineralógicas com características geotécnicas em solos provenientes de rocha de caráter ácido e intermediário, tal capítulo também abordará alguns resultados em perfis de alteração de rochas de caráter básico, que foram motivos de estudo, mas com objetivos distintos. O capítulo 3 apresenta uma caracterização da área de estudo com uma descrição da localização, clima, vegetação, relevo, bem como aspectos referentes à geologia e históricos de deslizamentos no local. No capítulo 4 serão evidenciados os estudos realizados no campo e laboratório com suas respectivas metodologias. O capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos juntamente com comentários específicos para cada ensaio; a análise conjunta dos resultados é apresentada no capítulo 6.

Por fim, no capítulo 7, serão apresentadas algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na bibliografia nacional a maioria dos trabalhos disponíveis a respeito do estudo em solos residuais de perfis de intemperismo, objetivando correlacionar características químicas e mineralógicas com características geotécnicas, se referem a perfis desenvolvidos em rochas de caráter ácido e intermediário. Serão apresentadas algumas conclusões sobre os dados químicos, mineralógicos bem como algumas correlações entre estes e alguns dados geotécnicos.

Serão também abordadas algumas descrições de alguns perfis de intemperismo de rochas de caráter básico, encontrados na literatura, que é o objeto da presente dissertação.

### 2.1. Perfis de Solos Residuais de Rochas Ácidas e Intermediárias

Brito (1981), Sertã (1986) e Polivanov (1998), estudaram solos residuais provenientes de rocha ácida do Estado do Rio de Janeiro; enquanto Lima et al. (2002) estudaram um solo residual de biotita-gnaïsse, considerado um solo proveniente de rocha de caráter intermediária. Todos os autores tiveram como um dos objetivos correlacionar características químicas e mineralógicas com características geotécnicas.

Brito (1981), realizou estudos em um perfil de intemperismo de uma rocha gnaïsse situado no campo experimental I da PUC-RJ. O trabalho abrangeu ensaios de caracterização, identificação mineralógica, análise química total e ataque sulfúrico. Também foram realizados ensaios de compressão confinada e resistência ao cisalhamento.



A autora concluiu que o mineral de neoformação mais representativo foi o do grupo caulinita, proveniente principalmente da alteração de feldspatos. Em algumas amostras ocorreu a illita, possivelmente proveniente da alteração da biotita. A análise mineralógica das frações areias mostrou que o quartzo é um mineral comum a todas amostras, seguido dos feldspatos e biotita em graus variáveis de alteração química.

Pelos resultados das análises químicas concluiu-se que houve uma concentração de óxido de ferro, titânio e alumínio e uma lixiviação dos álcalis, durante a transformação da rocha em solo. A única correlação feita pela autora se refere ao limite de liquidez, que diminui com o menor grau de intemperismo, o que já era esperado, pela dominância das frações arenosas, nas camadas menos alteradas.

Falcão (1984), analisou resultados de ensaios de campo e laboratório realizados por pesquisadores que estudaram o Campo Experimental I da PUC-RJ, como Brito (1981).

A autora sugere que para rochas de caráter ácido não é necessário proceder a uma análise mineralógica através de difração raios X na fração argila, pois esta não ocorre em quantidade significativa neste tipo de solo residual jovem. Também afirma que para esse perfil pode-se correlacionar a variação do módulo de elasticidade, bem como os valores de coesão, e ângulo de atrito com o  $\beta$  (índice de intemperismo).

Polivanov (1998) caracterizou dois perfis de intemperismo desenvolvidos de gnaisses, procurando investigar correlações entre a caracterização química, mineralógica, física e geotécnica dos solos em estudo. O argilomineral predominante foi a caulinita para os dois perfis em estudo. Verificou que para ambos perfis, o quartzo e os feldspatos potássicos eram predominantes nas frações areia.

Os resultados das análises químicas totais dos dois perfis revelaram que o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se concentram durante os processos químicos de intemperismo, enquanto que os álcalis sofrem intensa lixiviação ao longo dos perfis, como já havia citado por Brito (1981).

A autora não observou correlação nítida entre os parâmetros de resistência com os dados granulométricos.

Em ambos perfis analisados observou que o ângulo de atrito aumentou com o decréscimo do índice de vazios. Além disso, os perfis apresentaram elevado grau de correlação inversa entre o ângulo de atrito e a coesão aparente. Em relação à atividade dos solos, a autora conclui que o gráfico de atividade de Skempton não é adequado para o estudo de solos residuais jovens.

Lima et al. (2002), correlacionaram parâmetros físico-químicos com parâmetros geotécnicos de um solo residual de biotita-gnaiss da região do Espinhaço da Gata-PE. O intemperismo físico-químico da rocha biotita-gnaiss granatífera em clima quente e úmido, resultou na formação de um regolito (solo + saprolito) com cerca de 14 m. Os autores correlacionaram as feições mineralógicas e geoquímicas (percentagem de mica e argilas e índice de intemperismo) com os índices de caracterização (índice de vazios, limites de Atterberg e índice de plasticidade) e de compressibilidade (ensaios edométricos).

Os autores observaram que com o intemperismo físico-químico, as micas diminuem de tamanho além de se argilizarem juntamente com os feldspatos, que apresentam rápida argilização mesmo em se tratando de membros sódicos; conseqüentemente os álcalis são lixiviados gerando um aumento de vazios no solo residual.

O autor constatou correlação positiva entre o aumento da percentagem de micas, os índices de vazios e a compressibilidade dos solos. Entretanto, os autores alertam que outros fatores também podem influir na compressibilidade do solo.

Considerando os limites de Atterberg, verificou que o solo residual apresenta um comportamento coerente com os percentuais de argila.

## 2.2.

### Perfis de Solos de Rochas Básicas

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura sobre solo residual de basalto refere-se à Bacia do Paraná, a qual cobre uma vasta área da Região Sul e Centro-Sul do Brasil.

Segundo Melfi (1988), a Bacia do Paraná é constituída por formações sedimentares, as quais foram posteriormente encobertas, em uma grande área, pelos derrames basálticos. Estes derrames originaram-se no final do período Jurássico e início do Cretáceo entre 140 e 120 milhões de anos.

A seguir, serão descritos alguns perfis de solo residual de rocha básica, localizados na Bacia do Paraná.

Tanaka (1975) procurou obter resultados referentes à resistência de corpos de prova indeformado e deformado de solos residuais de um basalto denso e um vesicular proveniente da ombreira direita da barragem de São Simão, a qual se localiza entre os municípios de Santa Vitória (MG) e São Simão (GO). Neste estudo foram realizados ensaios de caracterização completa dos solos, análise mineralógica da fração argila através de difração raios X, ensaios de cisalhamento direto com caixa quadrada e circular, ensaios de compressão triaxial adensado não drenado (C.U) com medida de pressão neutra e ensaios de cisalhamento direto de múltiplo estágio. A área de estudo foi marcada por sucessivos derrames, geralmente intercalados com o arenito Botucatu, em que ambos se mostravam geralmente descontínuos. Os basaltos da área estudada eram constituídos essencialmente de plagioclásio básico e augita, com ou sem olivina, com textura variando de vítrea à porfirítica. As amostras do solo residual de basalto denso apresentavam coloração marrom-avermelhada, com fissuras geralmente realçadas na massa, pela coloração diferente do seu material de preenchimento, geralmente preto. Já as amostras do solo residual de basalto vesicular, apresentavam coloração avermelhada, com fissuras levemente inclinadas, e preenchidas com material de coloração preta (óxido de manganês). Notava-se a existência eventual de estrias de fricção, idênticas aos espelhos de falha (“slickenside”).

Em análises de difração observou-se que a caulinita era o argilomineral predominante para os dois solos estudados.

A Tabela 1 apresenta valores percentuais das frações granulométricas dos solos, densidade dos grãos ( $\gamma_s$ ), faixa encontrada dos limites de Atterberg e faixa do índice de atividade (IA) para os solos residuais de basalto denso e basalto vesicular estudados por Tanaka (1975).

Tabela 1 - Frações Granulométricas,  $G_s$ , limites de consistência e IA dos solos estudados por Tanaka (1975).

Solo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$G_s$	LL (%)	LP (%)	IA
Basalto denso	8,0	50,2	41,8	3,03	62 - 70	33 - 37	0,69 - 0,79
Basalto vesicular	32,0	35,0	33,0	3,00	60 - 66	38,5 - 39	0,65 - 0,86

A tabela 2 apresenta resultados de parâmetros efetivos de resistência de pico obtidos em amostras indeformadas quadradas através de ensaios de cisalhamento direto drenado submerso, bem como a faixa do índice de vazios inicial ( $e_i$ ) das amostras cisalhadas.

Tabela 2 – Índice de vazios iniciais e parâmetros efetivos de resistência de pico dos solos estudados por Tanaka (1975).

Localização	$e_i$	Parâmetros de pico	
		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Basalto denso	1,52 - 1,66	37	27,5
Basalto vesicular	1,56 - 1,66	16	23,5

Rigo (2000) estudou solos residuais de basalto provenientes de perfis de intemperismo selecionados ao longo das rodovias estaduais RS-453 e RS-486 – Rota do Sol, situados na formação Serra Geral.

O objetivo principal do autor foi obter parâmetros de resistência residual; porém o mesmo realizou ensaios de caracterização, análise mineralógica da fração argila através de difração raios X e ensaios de cisalhamento direto drenado para obter parâmetros efetivos de resistência de pico. Ao todo foram escolhidos 4 pontos de coleta, cujas denominações atribuídas foram:

- Teutônia – Solo Residual de basalto localizado em uma encosta, tal camada encontrava-se abaixo de um solo coluvionar. Em análises de difração de raios X foram detectadas montmorillonita e caulinita como argilominerais existentes, além de indicar a presença de hematita (óxido secundário).
- Km 109+180 – Talude constituído de uma camada de 0,5 m de solo superficial que apresentava grande quantidade de matéria orgânica; a segunda camada possuía uma espessura média de 1,5 m sendo constituída por um solo argiloso extremamente plástico. O autor atribuiu tal característica ao fato dessa camada possuir argilas esmectitas. O mesmo indica que a esmectita seria responsável pela baixa condutividade hidráulica do solo, possibilitando a formação de um lençol d'água suspenso na camada superficial; A terceira camada de onde foram retiradas as amostras apresentava uma espessura de 2 m. Este solo tinha estrutura granular de cor amarela, apresentando descontinuidades reliquias que eram preenchidas por argilas. Em análises de difração de raios X foram detectadas montmorillonita, caulinita e quartzo.
- km 113+100 – Neste local o solo residual encontrava-se a 0,5 m de profundidade. Através de sondagens detectou-se que a espessura máxima do solo residual era de 3 m. O solo residual possuía estrutura granular e sua coloração variava com a profundidade, com tonalidades mais avermelhadas até 1,5 m e mais amareladas em profundidades maiores. As amostras foram coletadas a 1,5 m de profundidade. Em análises de difração de raios X foram detectadas montmorillonita, caulinita, além de indicar a presença de goethita (hidróxidos).

- Km 119+120 – O Perfil era composto por uma camada superficial de solo residual laterítico maduro (horizonte B) com 1 m de espessura. Abaixo desta camada, encontrava-se o solo residual saprolítico (horizonte C) com espessura de aproximadamente 3 m. Este solo de até 2 m de espessura, de onde foram coletadas as amostras, possuía coloração marrom e se mostrava bastante argilizado. Em análises de difração de raios X foram detectadas montmorillonita, caulinita e quartzo.

A Tabela 3 apresenta valores percentuais das frações granulométricas, densidade dos grãos ( $\gamma_s$ ), limites de Atterberg e índice de atividade (IA) para os solos residuais de basalto estudados por Rigo (2002).

Tabela 3 – Frações Granulométricas,  $G_s$ , limites de consistência e IA dos solos estudados por Rigo (2002).

Localização	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$G_s$	LL (%)	LP (%)	IA
Teutônia	22	56	22	2,72	72	38	1,54
km 109 + 180	30	28	42	2,66	72	32	0,95
km 113 + 100	64	26	6	2,93	40	26	2,33
km 119 + 120	28	48	24	2,71	68	37	1,29

A tabela 4 apresenta resultados de parâmetros efetivos de resistência de pico obtidos em amostras indeformadas cilíndricas através de ensaios de cisalhamento direto drenado submerso, bem como a faixa dos índices de vazios inicial das amostras cisalhadas dos solos estudados por Rigo (2002).

Tabela 4 - Índice de vazios iniciais e parâmetros efetivos de resistência de pico dos solos estudados por Rigo (2002).

Localização	índice de vazios	Parâmetros de pico	
		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Teutônia	1,73-1,90	25,5	29,5
km 109 +180	1,31-1,38	16,4	33,2
km 113+100	1,02-1,13	11,9	35,2
km 119+120	1,70-1,72	25,1	29,3

Lacerda et al. (2002) realizou na região de Lavras (MG), investigações do comportamento geoquímico ao longo dos processos de alteração e evolução pedológica em perfis de solos provenientes de um piroxenito granulizado de composição geoquímica básica. Basicamente a mineralogia essencial da rocha mãe era composta de plagioclásio, piroxênios e anfibólios. A caulinita, o talco e a esmectita foram os principais argilominerais encontrados no perfil.

Foram coletadas amostras dos horizontes C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, BC, B<sub>t</sub> e A. A Tabela 5 descreve a granulometria dos horizontes estudados.

Tabela 5 – Granulometria dos horizontes estudados por Lacerda et al. (2002).

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
A	0 - 18	48,0	36,0	16,0
B <sub>t</sub>	18 - 55	14,0	34,0	52,0
BC	55 - 85	20,0	39,0	41,0
C <sub>1</sub>	85 - 120	56,0	32,0	12,0
C <sub>2</sub>	120 - 230	70,0	26,0	4,0
C <sub>3</sub>	230+	74,0	22,0	4,0

Os resultados da análise química total para os elementos maiores-óxidos obtidos por meio de fluorescência de raios-X para os perfis estudados por Lacerda et al. (2002), encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados analíticos através de espectrometria de fluorescência de raios-X dos elementos maiores-óxidos constituintes, Lacerda et al. (2002).

Amostra	Profundidade (cm)	(%)										
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF
A	0-18	43,95	11,94	18,86	4,49	5,24	0,20	0,26	1,01	0,29	0,01	13,75
B	18-55	38,27	18,84	22,54	0,72	0,86	0,03	0,21	1,12	0,16	0,01	17,23
BC	55-85	37,71	18,60	23,10	0,72	0,80	0,01	0,14	1,14	0,16	0,01	17,6
C <sub>1</sub>	85-120	42,21	15,64	20,56	2,64	2,84	0,01	0,18	1,08	0,19	0,01	14,64
C <sub>2</sub>	120-230	47,46	13,27	16,99	4,66	6,31	0,27	0,21	0,86	0,17	0,01	9,78
C <sub>3</sub>	230+	52,61	11,51	14,84	6,56	8,20	1,03	0,31	0,73	0,17	0,01	4,03
R		52,12	9,08	11,58	10,9	11,8	2,89	0,09	0,73	0,17	0,05	0,6

Onde: A = horizonte A (fácies sólum), B = horizonte B<sub>t</sub> (fácies sólum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (SRJ), R = fácies rocha fresca de origem, PF = perda ao fogo.

Segundo o autor, os minerais primários destruídos nos estágios iniciais de alteração intempérica são exatamente os silicatos ferromagnesianos e cálcio-sódico, tais como os anfibólios, piroxênios e plagioclásios cálcio-sódicos. O autor ainda menciona que o enriquecimento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  no horizonte  $B_t$  é justificado pela concentração de sesquióxidos de Fe, Al e Ti. Tais elementos são liberados, também pelo intemperismo de minerais primários que os contêm na estrutura, como: silicatos ferromagnesianos (piroxênios e anfibólios), de acordo com a seqüência de intemperização destes estabelecidas por Goldich (1969).

A EPC (1986) realizou estudos na fase de projeto da Ferrovia Norte-Sul, em solos provenientes de rochas básicas (basalto). Dentre os resultados obtidos podem ser apontados dados, como: granulometria, densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ), limites de consistência, índices de atividade e parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento de pico, obtidos em amostras indeformadas. Tais dados estão apresentados na tabela 7. É importante ressaltar que os parâmetros de resistência foram advindos de ensaios de compressão triaxial não-drenado saturado.

Tabela 7 – Granulometria, limites de Atterberg,  $G_s$ , IA e parâmetros efetivos de resistência de pico do solo estudado pela EPC (1986).

Localização	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$G_s$	LL (%)	LP (%)	IA	Parâmetros de pico	
								$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
FNS km 229 + 260	18	39	43	2,84	60	37	0,53	7,5	25

O tema da presente dissertação se refere a estudos de um perfil de intemperismo situado no mesmo talude de corte desta ferrovia.



### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

A caracterização da área em estudo, apresentada neste capítulo, inicia-se com uma descrição de sua localização, clima, vegetação, relevo, bem como aspectos referentes à geologia da área. Tais informações foram obtidas através de relatórios cedidos pela empresa responsável pela execução da obra. No entanto, como estas informações se referiam a um trecho de aproximadamente 45 km, houve a necessidade de adequá-las ao foco do presente estudo.

Informações referentes a aspectos geométricos do local e ao histórico de movimentos de massa também serão evidenciados nesse capítulo.

#### 3.1. Localização

A área de estudo se localiza em um corte da Ferrovia Norte-Sul, atualmente em construção, com características de projeto bastante peculiares, tais como:

- Rampa máxima 0,6%;
- Raio mínimo 343 m.

Essas características fazem com que a presença de cortes e aterros de grande porte, seja comum ao longo de seu traçado.

A área de estudo está situada no Município de Arguiópolis no Estado de Tocantins, a qual faz fronteira com o Município de Estreito no estado do Maranhão por intermédio de uma ponte rodoviária e uma ferroviária sobre o rio Tocantins; em um local onde este rio reduz bruscamente sua largura de cerca de 800 m, chegando a ter aproximadamente 134 m.

O traçado da Ferrovia Norte-Sul (Figura 1), após atravessar a ponte sobre o rio Tocantins, intercepta a Rodovia Belém-Brasília, por intermédio de um túnel ferroviário. O local escolhido para o estudo está situado no emboque sul do túnel no lado direito (sentido crescente da quilometragem), sendo denominado de “Corte 1”.



Figura 1- Mapa com o Traçado da Ferrovia Norte-Sul (fonte: Valec, 2004).

### 3.2. Condições Climáticas do Local

O trecho da ferrovia está localizado na zona de transição equatorial. A principal característica desta zona é a transição bem definida para o clima equatorial muito úmido. As características predominantes são as seguintes:

- A época chuvosa bem definida estende-se de outubro até maio;
- Junho, julho e agosto são os meses menos chuvosos, porém não podem ser definidos como secos;
- O trimestre mais chuvoso é formado pelos meses de janeiro, fevereiro e março.

O Clima é considerado quente e sempre associado a uma umidade elevada.

As figuras 2 e 3 retratam algumas informações pluviométricas do Município de Imperatriz-Ma, no período de 1926 a 1985, cujos resultados disponíveis encontram-se cerca de 120 km do Município de Arguanópolis-To.

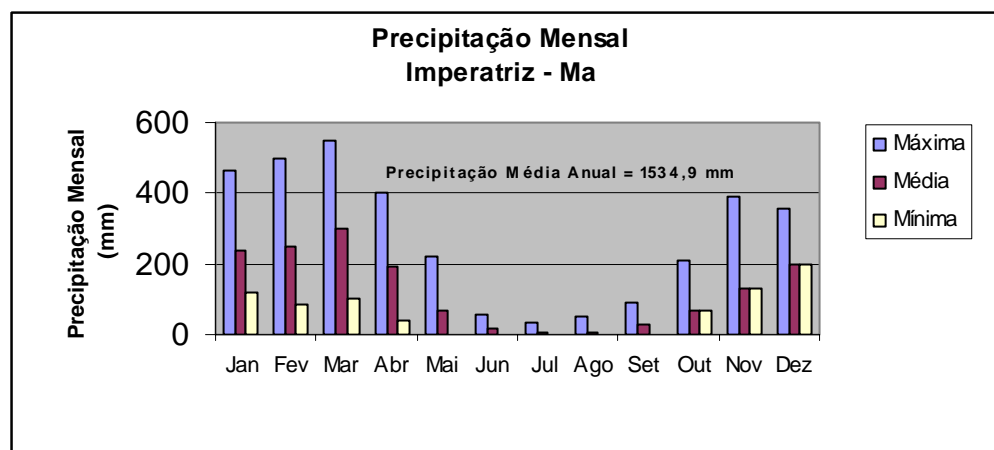


Figura 2 - Precipitações pluviométricas mensais (fonte: EPC, 1986).

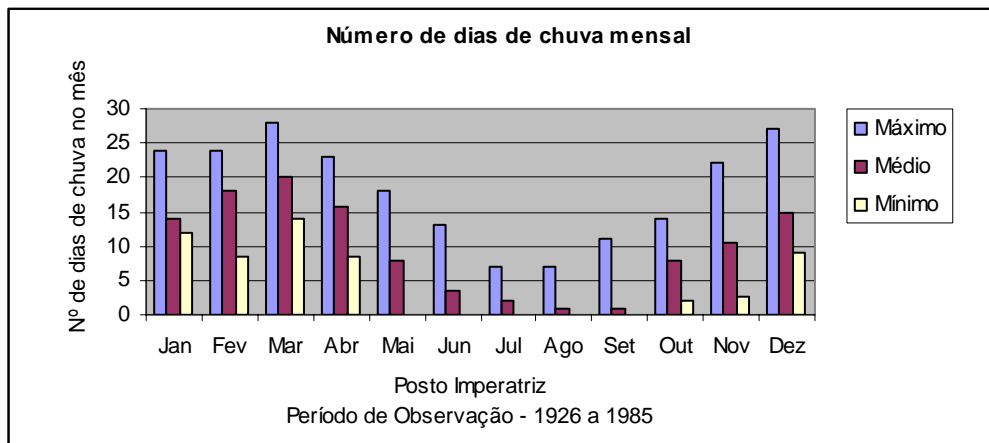


Figura 3 - Número de dias com chuva em um dado mês (fonte: EPC, 1986).

### 3.3. Vegetação

A vegetação predominante é do tipo cerrado, com formação de novos cerrados nas depressões periféricas dos chapadões (“canyons”) que se alargam com o decorrer dos tempos.

O cerrado é típico da região, com unidades esparsas e forrado com gramíneas. À medida que se definem os talwegues, nota-se nitidamente a formação da mata galeria típica, onde a água se manifesta em níveis acessíveis para o seu desenvolvimento.

Aproximando-se das margens do Rio Tocantins desenvolve-se vegetação densa com predominância de babaquais.

### 3.4. Características Geológicas da Área

Com base em informações obtidas na CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais), pode-se concluir que a área de estudo está situada em duas formações geológicas dominantes (Figura 4), compreendidas por:

- Formação Mosquito (Jurássico), que aflora entre os quilômetros: 227+900 e 229+500; 230+450 e 232+800; 238+800 e 239+320 da Ferrovia constituída por basaltos de cor cinza a verde escura, quando são; e apresentando diversas colorações quando alterados: vermelho, róseo e outros.

No local de coleta das amostras de solos, observou-se a ocorrência de basaltos vesiculares a amigdaloidais. Notou-se também, que a textura do basalto variava de afanítica a microfanerítica, ou melhor, até uma textura típica de diabásio.

A espessura mínima desta formação regula por volta de 100 m, sendo que a máxima não deve ultrapassar 150 m. Podem existir arenitos interdigitados com o basalto.

- Formação Sambaíba (Triássico), constituída por arenitos terrígenos com ocorrência de grãos arredondados e foscos de quartzo, além de estratificação cruzada planar em grande porte, típicos de deposição eólica. São arenitos de coloração variando de rosa a avermelhados com granulometria fina a média.

O contacto com o basalto da formação Mosquito pode estar endurecido devido ao efeito térmico do derrame.

O comportamento dos arenitos no traçado da ferrovia apresenta-se homogêneo não havendo variações de fácies na formação.

A figura 4 apresenta um mapa geológico da região em estudo, cedido pela CPRM. Tal mapa mostra a presença marcante do domínio basalto em boa parte da região em estudo.

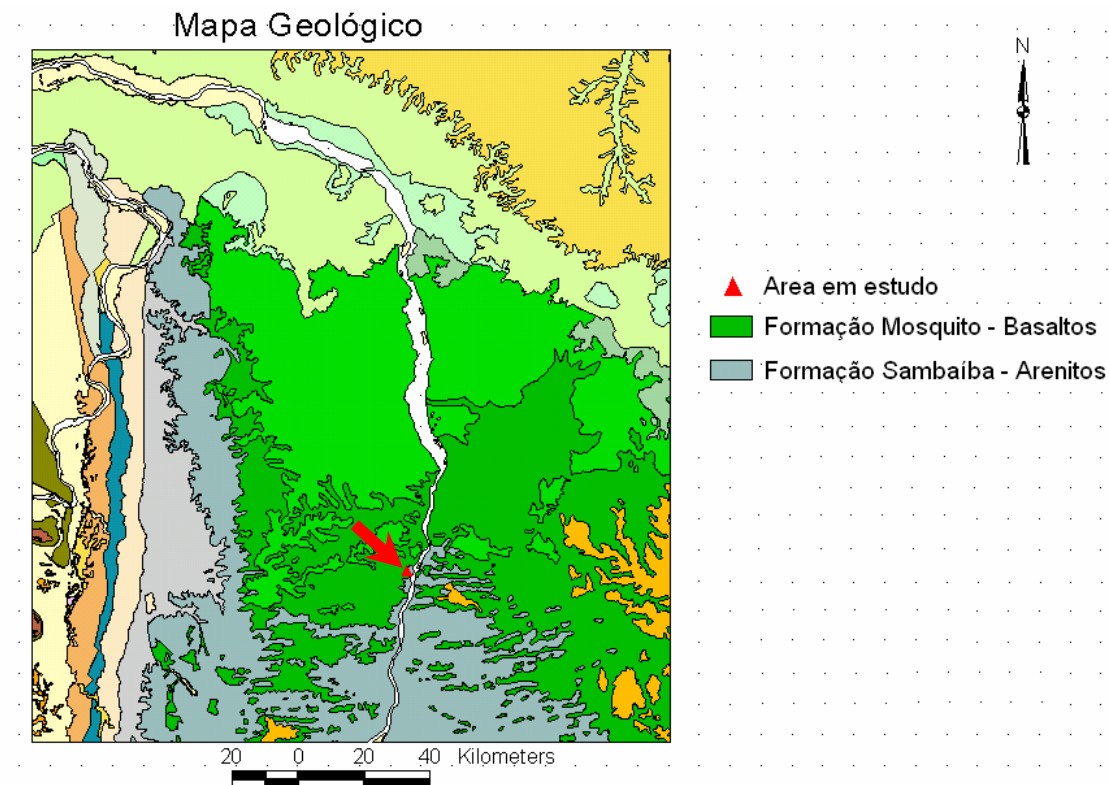


Figura 4 - Mapa geológico da área em estudo (Fonte: CPRM, 2004).

### 3.5. Solos

Sobre o ponto de vista pedológico, ocorrem nas áreas mais elevadas latossolos enquanto que nas áreas próximas à margem do rio Tocantins encontram-se solos classificados como neossolos e gleissolos.

### 3.6. Algumas Considerações do Local de Estudo

O Corte 1 inicia-se na estaca km 228 + 850, tendo seu fim na km 229+610, tendo portanto uma extensão de 760 m; sua altura máxima é de aproximadamente 25 m. Os taludes do corte foram projetados para terem declividade de 3V:2H e banquetas com 4 m de largura com um desnível de 8 m.

Em dezembro de 2000, durante as escavações do corte para implantação da ferrovia ocorreram três escorregamentos no emboque sul do túnel sob a rodovia Belém – Brasília (figura 5), quando as mesmas alcançavam a cota 168 m aproximadamente.

O primeiro deslizamento (figura 6) situa-se próximo ao lado direito entre a estaca km 229 + 024m a 229 + 060m, enquanto que o segundo situa-se também no lado direito na estaca km 229 + 120m; já o terceiro (figura 7) de menor proporção ocorreu no lado esquerdo do talude na estaca km 229 + 120m.

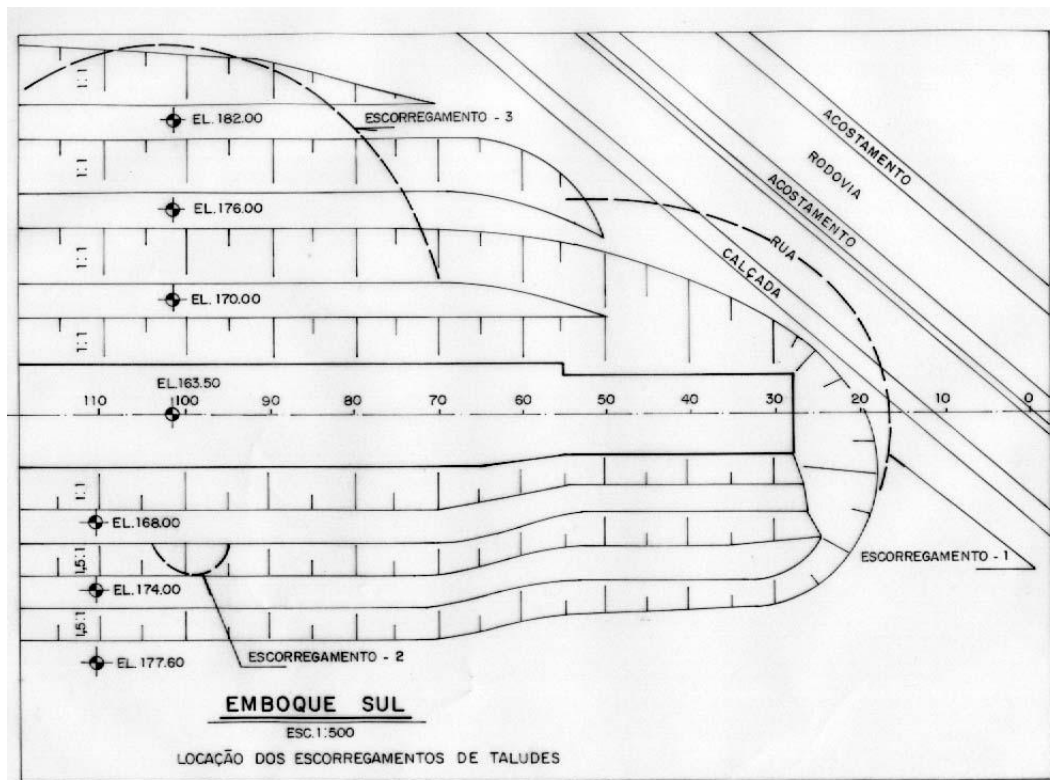


Figura 5 - Croqui com locação dos escorregamentos no emboque sul do corte 1 CESBE(2000).





Figura 6 - Deslizamento entre as estacas km 229 + 24 a 229 +060 LD



Figura 7 - Deslizamento, estaca km 229+ 120 LE.



## 4

### ESTUDOS REALIZADOS E METODOLOGIAS ADOTADAS

Neste capítulo serão evidenciados os estudos realizados, abrangendo as respectivas metodologias para o desenvolvimento dessa dissertação.

O estudo foi realizado em duas etapas. A primeira refere-se à visita ao local do Corte 1, onde foram realizadas coletas de amostras de solo, com as respectivas descrições morfológicas. A segunda refere-se aos trabalhos desenvolvidos nos laboratórios de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio, EMBRAPA SOLOS e Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ, abrangendo ensaios de caracterização; ensaios mineralógicos; análises químicas; obtenção das curvas características; ensaios de erodibilidade; ensaios especiais para a determinação de parâmetros de resistência e de compressibilidade.

#### 4.1.

##### Coleta de Amostras

Em 20 de março de 2004 foi realizada uma visita ao campo, afim de que fossem realizados trabalhos para coleta e descrição do maciço de solo no seu ambiente natural.

Inicialmente foi feita uma avaliação do maciço terroso do Corte 1, nos locais onde ocorreram escorregamentos, com o intuito de se escolher pontos para coleta de amostras que representassem as várias camadas do talude. Para tanto foi feita uma avaliação tátil-visual quanto à estrutura do maciço, que aliada às informações advindas de dados de sondagens fornecidos pela empresa responsável pela obra, foram indispensáveis para se determinar os pontos de abertura de poços para retirada de amostras indeformadas.

Observou-se que o maciço de solo do Corte 1 é composto, em sua maior parte, por solos provenientes de alteração de basalto, cuja textura varia de basaltos afaníticos vesículo-amigdaloidais até diabásios de granulação média. Observou-se também a presença de fraturas sub-horizontais, sub-verticais e inclinadas no solo residual, possivelmente herdadas da rocha mãe, como pode ser visto nas figuras 8 e 9.

Por vezes, no topo do maciço notava-se a presença de uma camada de solo coluvionar ou vestígio de um capeamento antigo, apresentando uma espessura máxima de aproximadamente 5 m (Figura 10). A presença de blocos de arenito (Figura 11) com espessura máxima de 2 m, exibindo fraturas sub-horizontais e sub-verticais, também fazia parte da paisagem local.



Figura 8 – Fratura inclinada apresentando estrias de fricção no talude de solo residual.



Figura 9– Compartilhamentos de fraturas sub-horizontais e sub-verticais no solo residual jovem.



Figura 10– Solo coluvionar ou vestígio de capeamento antigo.





Figura 11- Arenito apresentando descontinuidades sub-horizontais e sub-verticais.

Após esta etapa, com base na avaliação tátil-visual mencionada, foram escolhidos quatro pontos denominados de PIC (Poço de Inspeção e Coleta) para a retirada de amostras de solo, como mostra a figura 12. As coordenadas destes poços foram marcadas através de um GPS de bolso, MAP 76S da marca Garmin, de maneira que se surgisse à necessidade de coleta de outros blocos, estes seriam de locais circunvizinhos aos da primeira amostragem, tentando então garantir a similaridade entre amostras.

A tabela 8 mostra o estaqueamento em relação ao traçado da ferrovia dos quatro poços de coleta, bem como suas respectivas cotas e denominações atribuídas a estes solos. O Levantamento altimétrico foi obtido através de levantamento topográfico realizada pela equipe de topografia da empresa responsável pela obra.

O procedimento para a amostragem de solos consistiu na escavação de poços de 2,0 x 2,0 m de área tendo-se o cuidado de proceder uma escarificação dos locais antes da amostragem.

Feito isso, eram retiradas amostras indeformadas na forma de blocos cúbicos de dimensão de 15 x 15 x 15 cm, os quais eram embalados seguindo a metodologia do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio. Os blocos embalados foram etiquetados, com numeração e orientação destes em relação ao eixo da Ferrovia, da Rodovia Belém-Brasília e de uma cortina atirantada existente no local.

O transporte para o laboratório da PUC-Rio foi feito com as amostras acondicionadas em caixas com serragem para evitar perturbações. No laboratório, as amostras foram armazenadas em câmara úmida até a sua utilização.



Figura 12- Corte 1, Emboque Sul, LD – Locais de onde foram retirado amostras.

Tabela 8 - Localização dos poços de coleta e inspeção.

PIC	Poço 1	Poço 2	Poço 3	Poço 4
<b>Denominação Atribuída</b>	SC	SR1	SR2	SR3
<b>Estaca Ferrovia (km + m)</b>	229 + 225 LD	229 + 113 LD	229 + 112 LD	229 + 75 LD
<b>Cota (m)</b>	192	183	178	172
<b>Coordenada GPS</b>	N 0226893 9273906	N 0226954 9273976	N 0227002 9273974	N 0227002 927390

As características morfológicas dos solos para cada poço de inspeção são:

- Poço 1, possivelmente um capeamento antigo ou material coluvionar. Apresenta uma coloração marrom avermelhada de textura arenosa, por vezes, surgiam pequenas raízes - Solo coluvionar (SC);
- Poço 2, corresponde a uma transição de solo coluvionar com solo residual de basalto com textura vesículo-amigdaloidal. O solo assemelha-se a uma argila rija fraturada, de coloração roxa com pigmentos esbranquiçados (amígdalas intemperizadas). Por vezes, apareciam amígdalas de tamanho maior que os pigmentos esbranquiçados, mas com preenchimento de coloração creme que nem sempre preenchiam as vesículas integralmente. As fraturas verificadas nesta camada apresentavam-se sub-horizontais, inclinadas e sub-verticais, macroscopicamente lisas, além de estarem preenchidas com material ferruginoso de coloração avermelhada a preta - Solo residual 1 (SR1);
- Poço 3, corresponde a um solo residual de basalto de textura amigdaloidal argiloso de coloração avermelhada, com amígdalas esbranquiçados e/ou amareladas. Esta camada também apresentava fraturas preenchidas por material de coloração preta; Notava-se também a presença de material esverdeado, na forma de veios e/ou amígdalas - Solo residual 2 (SR2);

O material preenchimento de coloração preta já havia sido percebido por Tanaka (1976) em solos residuais de basalto provenientes da fundação da Barragem de São Simão, e foram apontados como sendo óxidos de manganês.

Deve-se acrescentar, que as fraturas horizontais presentes nesta camada se apresentavam ligeiramente inclinadas para o eixo do corte da ferrovia, sendo que o espaçamento entre fraturas variava; chegando a possuir no mínimo 1 cm.

Existiam também fraturas sub-verticais e inclinadas, porém o espaçamento entre estas se mostrava maior do que os das fraturas sub-horizontais.

- Poço 4 , corresponde a um solo proveniente de um diabásio de granulação média, predominantemente siltoso com coloração marrom acinzentada mostrando fenocristais de feldspatos alterados de coloração amarelada. Foi verificado que o solo apresentava um sistema de fraturamento similar aos encontrados no poço 2, em que as fraturas se mostravam preenchidas com um material de coloração preta - Solo residual 3 (SR3).

Com base nas características morfológicas das amostras coletadas, observações de campo e sondagens disponíveis; se propõe um perfil esquemático da distribuição dos solos para o “Corte 1”, como mostra a figura 13.

A figura 14 apresenta um croquis do perfil longitudinal do eixo da Ferrovia no “Corte 1”, com a distribuição dos solos em estudo, bem como com os níveis d’água coletados através de dados de sondagens da área, cedidos pela empresa responsável pela obra. É importante ressaltar que a área do presente estudo está localizada a partir do encontro da Rodovia Belém-Brasília (BR – 010), ou seja, à direita do encontro da BR-010 com o corte em estudo (Sentido crescente de quilometragem).

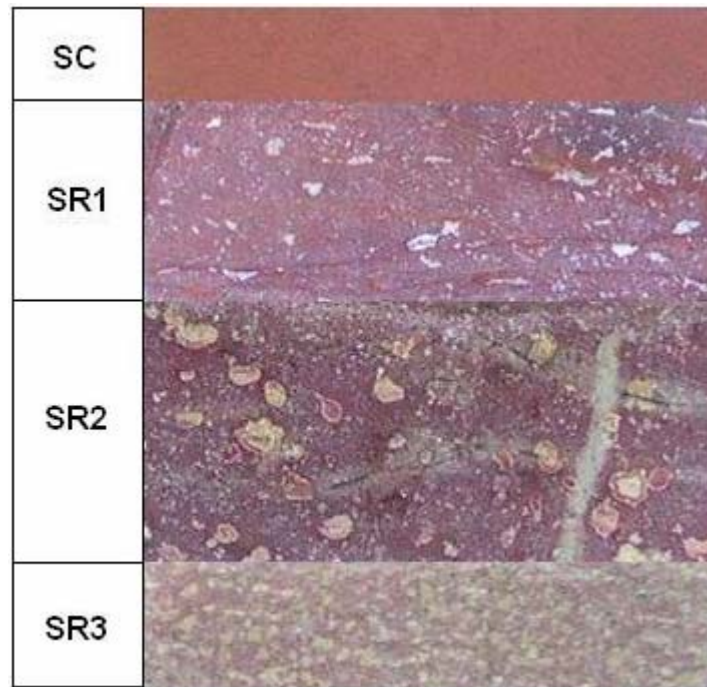


Figura 13 – Perfil esquemático da distribuição dos solos

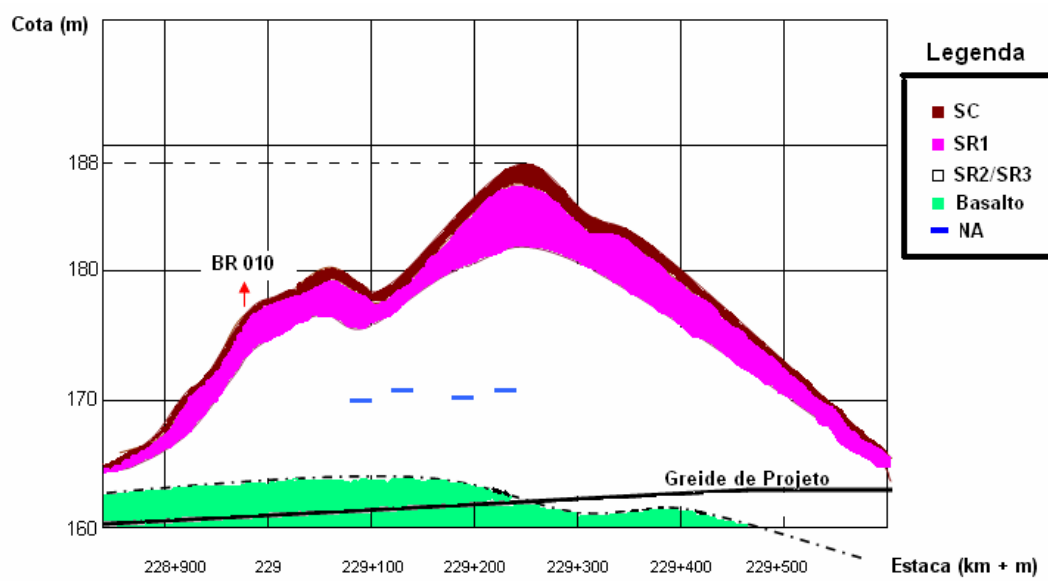


Figura 14 – Croquis do perfil longitudinal do eixo da Ferrovia no “Corte 1”, com a distribuição dos solos em estudo, bem como com as cotas dos níveis d’água.



## **4.2. Ensaio de Laboratório**

### **4.2.1. Determinação de Índices Físicos**

Durante a etapa inicial do estudo, foram determinadas em laboratório as curvas granulométricas, os limites de Atterberg, assim como a massa específica real dos grãos dos tipos de solo estudados.

Tanaka (1976), Futai (2002) e muitos outros autores afirmam que a utilização de índices físicos para a caracterização de solos sedimentares dá boas indicações do comportamento de engenharia, tanto para massa deformada, como indeformada.

Para solos residuais indeformados, muitos autores têm mencionado o valor limitado dos ensaios de caracterização (granulometria e limites), principalmente quando conservam características da rocha de origem. Características como o espaçamento, a orientação e o grau de fraturamento de solos residuais devem ser consideradas para a definição de novos índices.

Para os solos residuais deformados Cruz (1969), Jimenez-Quinones e Deere (1967) apud Tanaka (1976), têm demonstrado que a determinação de propriedades físicas usuais tem sido úteis para dar indicação do comportamento mecânico.

Segundo Sowers (1967), Souza Neto & Lacerda (2001), entre outros, os limites de consistência e os das análises granulométricas usuais estariam mais bem relacionados com a mineralogia, bem como ao ambiente de intemperismo. Solos provenientes de rochas ácidas, tal como os gnaisses, tendem a ser menos argilosos do que os provenientes de rochas básicas, tal como os basaltos. Já os índices de vazios estariam mais bem relacionados com a estrutura do solo.

A seguir descreve-se a metodologia utilizada para os ensaios de caracterização.

#### 4.2.1.1. Ensaio de Caracterização

Foram realizados ensaios para os 4 tipos de amostras de solo em estudo: Análise Granulométrica, Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade e Massa Específica Real dos Grãos.

Os procedimentos para a execução de tais ensaios foram desenvolvidos de acordo com as seguintes recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade
- NBR 6508/1984 – Massa Específica Real dos Grãos

É importante ressaltar, que o procedimento adotado referente à análise granulométrica foi adaptado, tendo em vista que o contido na ABNT recomenda a realização de ensaios de sedimentação e massa específica real dos grãos com material passante na peneira de 2 mm (#10); e o realizado se deu através do material passante na peneira de 0,42 mm (#40).

O procedimento de lavagem, tanto para o material retido na peneira de 0,42 mm (#40), como para o material proveniente do ensaio de sedimentação foi realizado com água potável a baixa pressão com o auxílio da mão do operador, em que se realizavam movimentos suaves e circulares contra a peneira.

A determinação dos pesos específico ( $\gamma_t$ ) do estado natural foi realizada através de ensaios que utilizaram amostras indeformadas, onde era possível aferir o volume das amostras. A umidade inicial das amostras ( $\omega_i$ ) foi determinada através de cápsulas com material deformado proveniente do processo de moldagem. O índice de vazios ( $e$ ), o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), bem como o grau de saturação ( $S$ ) foram obtidos a partir de correlações encontradas na literatura clássica de Mecânica dos Solos.

O procedimento para a execução de tais ensaios seguiu as seguintes recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural
- NBR 2887/1988 – Massa Específica Natural

A partir dos ensaios de limites e distribuição granulométrica foram determinados por fórmulas, os seguintes índices físicos:

- Índice de plasticidade (IP, %), obtido pela diferença entre o limite de liquidez (LL, %) e o limite de plasticidade (LP, %);
- Índice de atividade das argilas (IA), determinado segundo proposta por Skempton, como:

$$Ia = \frac{\text{Índice de Plasticidade (Ip)}}{\% < 2\mu m}$$

Onde,

% < 2 µm é igual a fração argila.

Segundo a classificação de Skempton, os solos podem ser classificados como:

- $Ia < 0,75$                                       inativas
- $1,25 > Ia > 0,75$                               atividade normal
- $Ia > 1,25$                                         ativa

#### **4.2.2. Análise Mineralógica**

Além dos aspectos físicos e químicos, as características mineralógicas podem ter grande influência nas propriedades mecânicas de solos tropicais. Ao se analisar parâmetros do solo, diversos autores se utilizam de informações mineralógicas, para justificá-los.

Segundo Souza Neto e Lacerda (2001): “Em caso de correlações, a mineralogia de alguns solos residuais pode ser tão ou mais importante do que os índices físicos, resultando em grande dispersão, quando a mesma não é considerada”.

Os autores ainda mencionam que, “Apesar da importância da mineralogia, o maior problema em se estabelecer correlações, que levam em conta os aspectos mineralógicos, é a pouca quantidade de dados existentes na literatura, uma vez que não se trata de ensaios rotineiros nos laboratórios de mecânica dos solos”.

Mitchell (1993) considera que o tipo de argilomineral se constitui como um parâmetro controlador do tamanho, forma e características superficiais das partículas de um solo. O mesmo ainda considera estes fatores determinantes na expansibilidade, na plasticidade e na resistência do solo.

Assim sendo, neste trabalho se procedeu à análise das diversas frações dos solos.

#### Análise Mineralógica das areias

Teve como objetivo identificar os principais componentes mineralógicos da fração areia, abrangendo minerais primários e secundários (óxidos e hidróxidos de ferro), além da descrição dos seus hábitos.

Assim, foi coletada a fração passante na peneira 0,84 mm (#20) e retido na peneira 0,42 mm (#40), este material então era lavado utilizando o mesmo procedimento de lavagem mencionado no ensaio de granulometria. A seguir, as amostras foram analisadas utilizando-se lupa binocular, disponível no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio.

#### Difratogrametria de Raios-X

Teve como objetivo identificar os principais componentes mineralógicos das frações argila e silte. As frações silte e argila foram obtidas através do método de sedimentação.

O material argiloso coletado foi inicialmente seco em estufa a uma temperatura inferior a 60°C. Quando este se apresentava com aspecto pastoso, era então colocado em lâminas de vidro, e orientado através de uma lâmina auxiliar, e então seco ao ar.

O silte foi coletado através do método de sedimentação, com amostra de solo contendo apenas a fração passante na peneira 0,074 mm (#200). A metodologia na confecção da lâmina de silte foi à mesma utilizada para a de argila.

Parte das lâminas de silte e argila do solo SR3 foram saturadas com etilenoglicol. Para tanto as amostras foram colocadas em dessecador de vidro contendo etilenoglicol. Este ensaio é utilizado na identificação de argilomineral expansivo.

Para as análises utilizou-se o equipamento de difração raios-X modelo D5000, marca Siemens pertencente ao Laboratório de Difração de Raios-X do DCMM da PUC-Rio.

#### Lâminas Delgadas de Solo e rocha

Foram confeccionadas lâminas delgadas dos 4 solos estudados, além de lâminas da rocha básica pertencente ao perfil e do arenito que por vezes surgia no corte.

As lâminas foram preparadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ.

O procedimento consistiu basicamente no desbaste mecânico de amostras indeformadas previamente secas e lentamente impregnadas com araldite e corante azul, resultando numa espessura final da ordem de 30µm. O corante azul foi utilizado com o intuito de se visualizar o espaço poral das lâminas.

Deve-se acrescentar que eventuais irregularidades nas lâminas podem ocorrer no período de confecção; como a presença de vazios (bolhas) provocada pela perda de algum mineral no momento de desbaste mecânico, fissuras que podem ser decorrentes devido ao processo de secagem das amostras, bem como problemas referentes à impregnação do corante. Tais irregularidades podem contribuir para erros na interpretação.

As amostras foram analisadas em conjunto com especialistas na área de petrografia nos Laboratório de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ e Laboratório do DCMM da PUC-Rio. As fotomicrografias, que serão apresentadas nesta dissertação foram obtidas fazendo-se atravessar luz natural e polarizada nas lâminas de solo e rocha em estudo utilizando um microscópio pertencente ao Laboratório do DCMM da PUC-Rio. Os aumentos utilizados foram de 25 vezes, 50 vezes e 100 vezes.

#### **4.2.3. Caracterização Química**

As análises químicas em amostras de solos pertencentes a perfis de alteração vêm sendo rotineiramente utilizadas quando se deseja conhecer o grau de alteração de cada camada que compõe o perfil, além dos reflexos dessas alterações no comportamento de certos parâmetros mecânicos.

No caso da presente dissertação a caracterização dos solos se torna mais significativa por tratar-se de um perfil desenvolvido de rocha básica, pouco estudado no país. Assim, as amostras de solo foram submetidas a dois métodos de análise química, os quais estão descritos abaixo.

#### Análise Semiquantitativa

Essas análises foram feitas no Laboratório de Fluorescência e Difração de raios X do Depto. de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro em amostras dos solos residuais SR1, SR2, SR3 e amostra de rocha de diabásio retirada do perfil em estudo.

Foram realizados ensaios de fluorescência e difração de raios x, com o intuito de se verificar a composição química dos materiais por análise semiquantitativa, através de Espectrômetro de Fluorescência de raios X Philips PW2400, com tubo de Rh. O software utilizado para as análises semiquantitativas foi o Squant14, desenvolvido pela Philips e que acompanha o equipamento.

A perda ao fogo foi determinada através da obtenção do peso da amostra, antes e depois da mesma ser levada a 950°C por meia hora. Os elementos foram detectados a partir da fusão de pó do material misturados com fundente tetraborato de lítio. As condições analíticas para a dosagem dos elementos presentes nas amostras foram: detectores selado e de fluxo, cristais analisadores PET, Ge, PX1, PX3 e LIF200 e potência do tubo 24 Kv e 90 mA ou 50 Kv e 50 mA, dependendo do elemento químico detectado. Os erros analíticos para os elementos maiores (> 0,1% em peso) não é superior a 1% e para os elementos traços (< 0,1% em peso) não ultrapassa 10%.

#### Análise por Ataque Sulfúrico e Complexo Sortivo

Nessas análises apenas os minerais secundários como argilominerais, óxidos cristalinos de ferro e de alumínio e amorfos são decompostos. Esses minerais são os representantes principais das frações finas dos solos e principais responsáveis pela sua atividade. Pelo ataque sulfúrico determinam-se os teores de óxidos de sílica, alumínio, ferro e titânio expressos em g/kg; enquanto que o complexo sortivo se refere à presença de cátions trocáveis existentes nos solos, sendo os resultados expressos em cmol/kg.

Os ensaios referentes às análises químicas foram realizados no Centro Nacional de Pesquisa de Solos CNPS/EMBRAPA. As análises realizadas na CNPS/EMBRAPA seguiram as metodologias apresentadas no Manual de Métodos de Análise de Solo (CNPS/EMBRAPA, 1997), e foram realizadas em amostras do solo coluvionar (SC), solo residual 1 (SR1), solo residual 2 (SR2) e solo residual 3 (SR3).

Também foram determinados o pH, objetivando determinar a acidez dos solos em estudo.

#### 4.2.4.

#### Curva Característica

Para uma análise mais realista das condições de fluxo e infiltração de águas em taludes não saturados, é de fundamental importância um conhecimento prévio da sucção, bem como a sua variação com o teor de umidade.

Segundo Marinho (1997), a sucção pode ser definida como a pressão isotrópica da água intersticial, fruto das condições físico-químicas, que faz com que o sistema água – solo absorva ou perca água dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação.

Marshall (1959), apud de Campos et al. (1992), sugere que só duas componentes devem ser consideradas para definir a sucção total de um solo não saturado, ou seja:

$$St = S_m + S_{om}$$

onde,  $St$  = sucção total

$S_m$  = sucção mátrica

$S_{om}$  = sucção osmótica

A sucção osmótica está associada à ocorrência de diferença de solutos no solo.

A sucção mátrica engloba a sucção capilar, que está relacionada com o nível macro-estrutural do solo; e a sucção de adsorção, associada ao nível micro-estrutural, ou seja, de hidratação dos minerais argílicos.

A curva característica de sucção define a relação entre o conteúdo de umidade gravimétrica,  $w$ , ou conteúdo de umidade volumétrico,  $\theta$ , ou o grau de saturação,  $S$ , e a sucção.



de Campos et al. (2002), Marinho (1994, 1997), Hernandez (2004), apresentam diversas técnicas para se obter a curva característica, bem como os procedimentos utilizados, além de suas respectivas vantagens e desvantagens.

Segundo de Campos et al.(2002), para se obter a curva característica de sucção é importante que se parta de uma condição de umidade natural do solo.

O mesmo autor conclui que procedimentos, os que utilizam a saturação ou a secagem prévia do solo podem induzir a respostas não representativas, já que tais técnicas modificariam a estrutura dos solos.

Para se obter uma avaliação dos solos em estudo quanto à curva característica optou-se pela realização do ensaio aplicando a metodologia do papel filtro, o qual, segundo Hernandez (2004) e Marinho (1994), tem se mostrado bastante eficiente.

Segundo Fredlund (1979), Edil e Motan (1984), Hernandez (2004), o comportamento de solos não saturados em condições naturais depende basicamente da sucção mátrica.

#### **4.2.4.1. Metodologia Utilizada**

Segundo Marinho (1997), o método do papel filtro baseia-se no princípio de que quando um solo é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, a mesma irá passar do solo para o material poroso, até que o equilíbrio seja alcançado. O estado de equilíbrio do sistema (papel filtro + solo) fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém com umidades diferentes. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da correta sucção.

Para os ensaios de sucção pelo método do papel filtro realizados nesta dissertação, foram utilizados papéis da marca Whatman N°42 cortados no mesmo diâmetro das amostras de solo retiradas de blocos indeformados.

Estas foram moldadas em anéis bizelados de metal com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, os quais permaneciam com a amostra durante todo o ensaio.

O procedimento de moldagem, bem como a coleta de dados referentes a cada amostra, seguiu a mesma rotina apresentada em ensaios de cisalhamento direto drenado. Para a obtenção da curva característica, foram moldados em média 8 anéis para cada tipo de solo em estudo. Ressalta-se que grande parte das amostras dos solos residuais SR1, SR2 e SR3 apresentavam fraturas subhorizontais conforme mostra a figura 15.

De acordo com a umidade natural de cada amostra, estas eram secas ou umedecidas dependendo do ponto da curva que a amostra em questão iria representar.

É importante ressaltar que, durante o processo de secagem em amostras de SR2 e SR3, a partir de aproximadamente 20 horas notava-se a redução de volume de tais amostras (Figura 16), bem como o aparecimento de trincas na superfície (figura 17). O volume modificado foi quantificado através de paquímetro.

Bastos et al. (1998) na secagem de amostras em solo argilo siltoso cinza com presença acentuada de argilominerais expansivos do Município de Paulista-PE, verificou que, com cerca de 24 horas de secagem, os corpos de prova apresentavam fissuras, além da redução de volume.

O processo de secagem se deu através de secagem natural ao ar, enquanto que o processo de umedecimento foi através de inserção de água destilada por meio de pipeta graduada, fazendo-se percolar água nas duas faces das amostras de maneira igualitária.

Quando as amostras eram submetidas ao processo de umedecimento, estas eram então envolvidas com plástico tipo PVC, e isoladas em caixa de isopor de 10 cm de espessura durante 2 dias de maneira que se pudesse garantir a equalização de umidade nessas amostras.

O papel filtro com o auxílio de pinça e luvas cirúrgicas era então posto em contato com as superfícies planas de solo em cada amostra. Tal procedimento é utilizado para a obtenção de sucção mátrica.

As amostras foram embrulhadas em plástico tipo PVC e papel alumínio, e então colocadas em uma caixa de isopor, que era lacrada durante 15 dias, tempo este considerado suficiente para que as amostras atingissem o equilíbrio de sucção.

Decorrido o tempo de equilíbrio, os papéis filtros foram retirados do embrulho e pesados em balança com capacidade de leitura de 0,0005g durante intervalos de 10 segundos até 2 minutos, e a partir disso, em intervalos de 15 segundos até 3 minutos.

Os papéis então eram secos em estufa a 105°C durante 24 horas.

Os papéis secos em estufa passaram pelo mesmo procedimento de pesagem mencionado acima.

É importante ressaltar que cuidou-se para que o tempo de transferência do papel retirado do embrulho ou da estufa para as pesagens não ultrapassasse 5 segundos.

A umidade do papel foi obtida e, com uso das curvas de calibração de Chandler et al. (1992) a sucção foi determinada.

A umidade final do solo também foi calculada, a fim de obter a curva característica para os 4 tipos de solo em estudo.



Figura 15 – Amostras com fraturas sub-horizontais dispostas aleatoriamente.



Figura 16 - Amostras de SR2 apresentando redução de volume após secagem.



Figura 17 – SR2 apresentando trincas, após secagem ao ar.

#### 4.2.5. Erodibilidade

Em virtude da ocorrência de uma série de sulcamentos ao longo do corte em estudo, houve o interesse em avaliar o grau de erodibilidade dos horizontes ou camadas de solo presentes no talude, na tentativa de correlacionar tais resultados com observações feitas em campo.

Segundo Bastos et al. (1998), a erodibilidade é entendida como a propriedade que retrata a facilidade com que partículas do solo são destacadas e transportadas. O mesmo autor alega que ainda são insuficientes os esforços para o entendimento e quantificação do potencial a erosão através de propriedades do comportamento estabelecidas pela Mecânica dos Solos. Tal afirmação é atribuída a fatores como a complexidade dos mecanismos envolvidos no processo de erosão hídrica (mobilização, destacamento, transporte e deposição de partículas e / ou agregados), bem como a vários fatores externos que condicionam a intensidade da ação erosiva (erosividade da chuva, geometria da encosta, cobertura vegetal...); além de um grande número de fatores intrínsecos do solo que condicionam sua erodibilidade (textura, mineralogia, cimentação, estrutura, sucção).

Santos (1997) realizou ensaios de erodibilidade em amostras representativas dos perfis de alteração presentes na região de Goiânia.

Os ensaios realizados pelo autor compreenderam em ensaios de pinhole, ensaios de Inderbitzen e ensaios de desagregação, para todos os ensaios foram utilizadas amostras indeformadas. O procedimento do ensaio de pinhole adotado por Santos (1997) pode ser encontrado no Projeto 02:004.02-022 (1996) da ABNT, já no ensaio de Interbidzen adotou o procedimento descrito por Fácio (1991).

Segundo Fonseca & Ferreira (1981) e Santos (1997), ensaios de desagregação representam um bom índice qualitativo na previsão do comportamento dos solos frente aos esforços erosivos.

de Araújo (2000) e Ramidan (2003) estudaram o comportamento erosivo de perfis de solo. O primeiro estudou um perfil de solo localizado na Formação Macacu, considerada como representante do Grupo Barreiras, já o segundo estudou um perfil localizado a jusante da ombreira direita da UHE de Itumbiara-GO. Ambos autores descrevem alguns métodos de avaliação da erodibilidade em solos.

Foram realizados ensaios de desagregação em amostras indeformadas dos solos em estudo, visto que diversos autores o descrevem como um ensaio simples e com resultados qualitativos coerentes com outros ensaios de erodibilidade como o de Inderbitzen.

#### **4.2.5.1. Metodologia do Ensaio de Desagregabilidade**

Para a realização dos ensaios de desagregação foram moldados para cada tipo de solo corpos de prova cúbicos indeformados com 6 cm de aresta. De cada amostra foram retiradas às respectivas umidades, através de cápsulas com sobras das moldagens.

Os corpos de prova foram colocados sobre papel filtro com pedra porosa em uma bandeja de alumínio nivelada com capacidade volumétrica de aproximadamente 20 litros. Em seguida colocou-se água até o nível da altura das bases das amostras por um período de 30 minutos.

A seguir, o NA foi aumentado sucessivamente para 1/3, 2/3, até a submersão total das amostras, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos. Após a submersão total, o ensaio prosseguiu por um período de 24 horas.

A partir de observações realizadas durante o ensaio, espera-se avaliar o grau de erodibilidade das amostras de maneira qualitativa e comparativa entre os corpos de prova.

#### 4.2.6. Compressibilidade

Os parâmetros de compressibilidade são obtidos corriqueiramente por ensaios edométricos. Ensaios triaxiais também são utilizados, mesmo que de forma menos usual.

Em solos tropicais, os parâmetros de compressibilidade são obtidos similarmente aos de solos sedimentares. A tensão de pré-adensamento para o caso dos depósitos sedimentares tem uma representação física, que é a máxima tensão a que o solo esteve submetido.

Segundo Vargas (1953), contrariamente aos solos sedimentares, os solos tropicais não apresentam correlações entre a pressão de sobre-adensamento e a pressão de pré-consolidação. O mesmo autor chamou a suposta tensão de sobre-adensamento como “tensão de pré-adensamento virtual” para o caso de solos tropicais.

Esta tensão de escoamento sob condições edométricas depende, segundo Barksdale & Blight (1997), da resistência entre as partículas do solo ou da interligação dos minerais que permanecem após o intemperismo do material.

Maccarini e Mello (1994), Maccarini et al. (1989), através de ensaios edométricos verificaram a influência das cimentações entre as partículas nas propriedades de compressibilidade em solos residuais de gnaisse e diabásio respectivamente.

Maccarini e Mello (1994), em solos residuais de gnaisse constataram que os valores de pressão de pré-adensamento são significativamente superiores à pressão da terra para a profundidade correspondente.

Maccarini et al. (1989), em solos residuais de diabásio, detectaram a existência de cimentação, comparando a compressibilidade de duas amostras, uma indeformada e uma remoldada com o mesmo índice.

Os mesmos concluíram que as amostras remoldadas apresentaram um aumento significativo na compressibilidade. Os autores sugerem que a presença de argilominerais expansivos pode quebrar significativamente a cimentação presente nas amostras, quando submersas.

Objetivando a determinação de parâmetros de compressibilidade de amostras indeformadas dos solos em estudo, foram realizados ensaios edométricos convencionais, utilizando 4 prensas do tipo Bishop pertencentes ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC–Rio.

#### **4.2.6.1.**

##### **Procedimento utilizado – Ensaio Edométrico**

As amostras foram moldadas de blocos indeformados através de anéis de metal com 71,5 mm de diâmetro e 20 mm de altura, os quais permaneciam com a amostra durante todo o ensaio.

O procedimento de moldagem, bem como a coleta de dados referentes a cada amostra, seguiu a rotina apresentada nos ensaios de cisalhamento direto.

Os ensaios edométricos foram realizados através da aplicação de tensões verticais nominais de carregamento e descarregamento; através de um sistema de alavanca com uma relação de 1:10, ou seja, a cada 1 kg de incremento de carga, este correspondia a uma carga de 10kg atuando sobre as amostras.

As tensões verticais eram mantidas constantes durante 24 h nos carregamentos e até a estabilização das leituras nos descarregamentos.

As tensões utilizadas foram as seguintes: 10, 20, 40, 80, 110, 200, 300, 400, 640, 1280, 840, 540, 300, 200 e 80 kPa.

Depois da aplicação do primeiro carregamento, as bacias dos edômetros foram preenchidas com água destilada, e mantidas cheias até o final do último descarregamento.



Após a retirada da água sobrenadante desmontou-se os edômetros e os corpos de prova integrais foram levados à estufa para determinação dos teores de umidade finais.

As leituras de variação de altura das amostras foram efetuadas utilizando-se extensômetros, com resolução de 2 $\mu$ m.

#### 4.2.7.

#### **Avaliação de Expansibilidade**

Jucá et. al (1997), Negro & Gonçalves (1997) atribuem grande parte dos problemas geotécnicos relacionados com o movimento e desempenho de obras e de escorregamentos de taludes à presença de solos expansivos em maciços terrosos.

Em solos expansivos as expressivas variações de volume comprometem a segurança e funcionamento das obras provocando perdas econômicas e atrasos de cronograma.

Segundo Ferreira et. al (1998), o mecanismo de expansão dos solos argilosos é complexo devido ao grande número de fatores intervenientes no processo. Esses fatores podem ser classificados em três grupos, que se interagem:

Os relacionados com as propriedades do solo, em seu estado natural, incluindo a físico-química e mineralogia; os fatores ambientais, que influenciam nas variações das forças internas do sistema solo-água e finalmente, os fatores relacionados com o estado tensional do solo. Segundo os mesmos autores, o processo de expansão do solo está associado ao estado tensional em que se encontra (tensão vertical de consolidação, sucção e estrutura) e ao carregamento a que está submetido.

Na tentativa de se avaliar a expansibilidade dos solos residuais em estudo, foram realizados ensaios de expansibilidade de caráter qualitativo.

#### 4.2.7.1. Inserção de Etilenoglicol

Tendo em vista o elevado grau de saturação apresentado em amostras de SR1, SR2, SR3, houve a necessidade de avaliar qualitativamente os solos através da inserção de etilenoglicol, um composto de caráter bipolar. Tal composto é rotineiramente utilizado na identificação de minerais expansivos na mineralogia das argilas.

- Metodologia

Foram preparadas amostras dos SR1, SR2 e SR3 na umidade natural e em forma de torrões de 6 a 10 mm, e então colocadas em tampas de acrílico, conforme figura 18. O etilenoglicol então era adicionado a uma Placa Petri, e após cerca de 2 horas, foram avaliadas as possíveis modificações no volume dos torrões.

Aliado ao alto grau de saturação, a heterogeneidade dos tipos de solo avaliado constitui-se como um dos principais fatores para realizar tal estudo, tendo em vista que era possível selecionar torrões com materiais em que havia suspeita de serem expansíveis.



Figura 18 – Amostras de SR1, SR2 e SR3, que seriam imersas em etilenoglicol.

#### **4.2.7.2.**

#### **Ensaio de Expansão Axial com Confinamento Lateral e sem Sobrecarga Axial**

Este ensaio tem a finalidade de medir a expansão de uma amostra indeformada, confinada lateralmente, na ausência de sobrecarga, devido à adsorção de água pelos argilominerais expansivos.

Utilizou-se a bacia do ensaio edométrico e um LVDT.

A preparação da amostra, bem como a montagem da bacia é similar ao do ensaio edométrico convencional.

Foram então medidas as alturas iniciais dos corpos de prova.

A seguir procedeu-se à inserção de água destilada na bacia. Com o auxílio de um medidor de deslocamento LVDT media-se a variação de altura ocorrida em função do tempo decorrido, até 48 horas.

#### **4.2.8.**

#### **Resistência ao Cisalhamento**

##### **4.2.8.1.**

##### **Cisalhamento Direto**

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados utilizando-se duas prensas fabricadas pela empresa Wykeham-Farrance (Figura 19) pertencentes ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio.

Neste ensaio, o corpo de prova é colocado no centro de uma caixa bipartida e sobre sua face superior se aplica a tensão normal desejada mantida por um sistema de pesos.

Através da imposição de um deslocamento horizontal de uma das partes da caixa em relação à outra (com velocidade constante) são medidos: a tensão tangencial até a ruptura no plano cisalhante imposto ao corpo de prova pela divisão da caixa, o deslocamento horizontal entre as partes superior e inferior da caixa e o deslocamento vertical do corpo de prova durante o ensaio (devido à variação volumétrica no cisalhamento).

É importante ressaltar que tais medições foram realizadas automaticamente utilizando anel de carga instrumental, desenvolvidas na PUC-Rio, e transdutores de deslocamento resistivos de alta precisão (LVDT).

Estes ensaios foram realizados seguindo procedimentos de Head (1982), pela norma inglesa BS-1377 (BSI, 1990) e pela norma americana ASTM D 3089-9 (ASTM, 1990).



Figura 19 – Prensa de Cisalhamento Direto pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-RIO.

#### 4.2.8.1.1. Preparação das Amostras

As amostras ensaiadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC–RIO foram moldadas de bloco indeformados de (15 x 15 x 15) cm extraídos no campo.

O procedimento de amostragem se deu através de anéis metálicos bizelados de (101,6 x 101,6 x 20) mm; tais anéis eram untados com vaselina em pasta, com o objetivo de minimizar o atrito solo/molde.

O anel era então posicionado sobre a superfície plana do bloco na mesma direção em que se encontrava no campo; e então cuidadosamente cravava-se o molde alguns milímetros no solo. O solo em volta era então removido com uma faca. O procedimento alternado de cravação do anel e desbaste com faca era repetido até o preenchimento completo do interior do anel, com solo. A amostra era separada do bloco e rasada com uma espátula.

Para cada corpo de prova foram medidos o peso, o volume e o teor de umidade, visando à determinação de índices físicos.

A presença de descontinuidades sub-horizontais com espaçamento mínimo de até 1 cm nos solos residuais SR1, SR2 e SR3 foi facilmente verificada; tendo em vista que estas se encontravam preenchidas com óxidos de ferro e / ou óxidos de manganês.

As amostras eram então transladadas para a caixa de cisalhamento direto.

As amostras do solo residual 1 (SR1) se mostraram mais problemáticas tanto na fase de moldagem como no traslado destas para a caixa de cisalhamento.

Essas amostras apresentavam um comportamento frágil durante a fase de moldagem comparada com as outras, tendo em vista que qualquer movimento atípico durante este procedimento fazia com que estas rompessem ao longo de fraturas existentes. A dificuldade de transferir as amostras do solo residual 1 (SR1) para a caixa de cisalhamento também foi verificada, já que houve a necessidade de aplicar um carregamento sobre a amostra para conseguir move-las de dentro dos anéis.

Tendo em vista que o solo residual 1 (SR1) não indicava a presença argilomineral expansivo, acredita-se que a expansão lateral deve-se ao estado tensional do solo; haja visto que o solo encontrava-se bastante cimentado.

#### **4.2.8.1.2.**

##### **Metodologia Utilizada**

Os ensaios de cisalhamento direto foram iniciados em amostras do SR2.

Na primeira rotina, os corpos de prova eram instalados na caixa bipartida, a tensão normal era aplicada e posteriormente o interior da caixa era inundado.

Com o intuito de se verificar o comportamento dos solos em estudo quando submersos em água e sem sobrecarga axial modificou-se o procedimento.

Os corpos de prova passaram então a ser submersas em água, e após 24 horas procedeu-se à aplicação da pressão de adensamento durante 24 horas.

Deve-se destacar que este procedimento também foi utilizado por Ferreira (1997), porém com um tempo maior de submersão sem carregamento axial. O mesmo autor realizou ensaios de cisalhamento direto convencional em argilas expansivas não saturadas coletadas do Município de Paulista – Pe na condição natural e submersa. Na condição submersa as amostras foram inundadas por um período de 48 horas, sendo observada a expansão para cada amostra. Posteriormente foram adensadas para o carregamento desejado durante 24 horas. O autor atribui a variação da resistência observada nos dois procedimentos (natural e submersa), ao fato das amostras durante a fase de saturação expandirem, ocasionando uma redução de tensão total e, conseqüentemente, em sua resistência.

No presente estudo, para cada tipo de solo utilizaram-se pressões normais nominais de adensamento de 40, 65, 110, 210 e 300kPa aplicadas em uma única etapa.

As duas partes da caixa bipartida foram separadas de 0,5 mm através de um dispositivo implementado na PUC-Rio.

A velocidade de ensaio foi calculada baseado em Gibson e Henkel (1954), nos ensaios para o solo residual 2 (SR2), com velocidades calculadas variando de 1 mm/min a 0,0975 mm/min, com o intuito de garantir a condição de cisalhamento drenado. No entanto para garantirmos que estar-se-ia utilizando uma velocidade, que de fato atendesse aos 4 tipos de solo em estudo utilizou-se a velocidade de 0,00975 mm/min encontrada na especificação do equipamento utilizado, a qual encontrava-se bem abaixo das velocidades calculadas.

Tanaka (1976) em ensaios de cisalhamento direto drenado realizados em solos residuais de basalto denso e amigdaloidal da barragem de São Simão utilizou também a velocidade de 0,00975 mm/min para todos os ensaios.

Maccarini (1980), em estudos de solo residual gnáissico jovem do campo Experimental da PUC-Rio verificou a influência da abertura das duas partes da caixa, bem como a variação da velocidade de cisalhamento em parâmetros de resistência de pico.

É importante ressaltar que não fazem parte do escopo desta dissertação, detalhes como a influência da abertura entre as duas partes da caixa, bem como a influência da variação da velocidade de cisalhamento em parâmetros de resistência de pico.

#### **4.2.8.2. Ensaio Triaxial Drenado**

O ensaio triaxial axi-simétrico é o mais conhecido e utilizado. Este é executado através de amostras cilíndricas sólidas, que são colocadas no interior de uma câmara, dentro do qual ficam sujeitos a um estado de tensão axi-simétrico. A tensão principal na direção perpendicular ao topo e base da amostra é aplicada através de uma haste rígida e as tensões principais perpendiculares à superfície lateral do cilindro são aplicadas através de um fluido que preenche a câmara pressurizada.

Os ensaios triaxiais, dos tipos  $CD_{sat}$ , foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio . Nestes ensaios foram utilizadas prensas fabricadas pela empresa Wykeham-Farrance (Figura 20), de velocidade de deslocamento controlada e instrumentação eletrônica para monitorar força, deslocamento, pressão confinante, poro-pressão e variação de volume.

No monitoramento da carga axial utilizou-se células de carga internas à câmara, com capacidade máxima de 5 kN, propiciando uma resolução da ordem de 1,5 kPa na medida de tensão desviadora tomando-se como base a área inicial das amostras. Medidas de deslocamento foram efetuadas externamente à câmara, com transdutores do tipo LSCDT com resolução da ordem de  $10\mu\text{m}$ .

Pressões na câmara e poropressões foram medidas com uma resolução de 1kPa, utilizando-se transdutores com capacidade máxima de 10Bar (1000kPa). Variações de volume foram medidas utilizando-se medidores automáticos desenvolvidos na PUC-Rio com resolução de  $0,01\text{ cm}^3$ .



Figura 20 - Prensa de Ensaio Triaxial pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-RIO.



#### 4.2.8.2.1. Preparação das Amostras

Com o intuito de se verificar a influência na resistência ao cisalhamento de fraturas presentes nos solos residuais de basalto submetidas, foram moldadas amostras, a partir de blocos que eram inclinados com o auxílio de maderites, de maneira que essas descontinuidades fizessem uma inclinação de 45°, aproximadamente (Figura 21).



Figura 21 – Moldagem de amostras do SR2, com fraturas com inclinação de 45°.

A presença de fraturas reliquias interligadas observadas nos blocos de solo residual de basalto fez com que a operação de moldagem se tornasse difícil. Em virtude disso, só foi possível moldar 4 corpos de prova, dos quais três advindos de bloco do solo residual 2 (SR2), e um do bloco de solo residual 3 (SR3). Os corpos de prova foram moldados com dimensões de 38,1 mm de diâmetro e 78,2 mm de altura.

#### 4.2.8.2.2.

##### Metodologia Utilizada

Nos ensaios triaxiais CD os corpos de prova foram saturados utilizando-se a técnica de aumento de contra-pressão.

No início do processo foi aplicada uma pressão confinante em torno de 50 kPa, onde as poro-pressões no topo e na base de igual valor eram conhecidas; a partir disso mediu-se quanto entrou de água (pela variação de volume), então sob condições não drenadas, aumentava-se a tensão confinante para 100 kPa medindo-se de novo o valor das poro-pressões. Para saber se a amostra estava saturada, calculava-se o valor do parâmetro B de Skempton, isto é,  $B = \Delta U / \Delta \sigma$ . Este valor teria que estar próximo de 1. Caso não estivesse próximo de 1, tal procedimento era repetido aumentando as pressões cerca de 50kPa até que se obtivesse uma medida do parâmetro B igual ou superior a 0,98.

Em seguida procedeu-se ao adensamento das amostras, mantendo-se o valor da pressão confinante aplicada e variando-se o valor da contra-pressão. Nesta fase foram utilizadas as pressões nominais de 50, 100 e 200 kPa.

Após o adensamento, procedeu-se ao cisalhamento sob uma velocidade constante de deslocamento axial. Tal velocidade foi estabelecida de acordo com Gibson & Henkel (1954) de forma a garantir uma variação de poropressão nula durante o cisalhamento drenado. Para o ensaio realizado no corpo de prova de solo residual 3, utilizou-se a velocidade de 0,008 mm/min, enquanto que para as do solo residual 2 utilizou-se a velocidade de 0,004 mm/min.

## 5

# APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa, juntamente com comentários específicos direcionados à análise conjunta das informações obtidas, que será desenvolvida no Capítulo 6.

### 5.1.

#### Ensaio de Caracterização

##### 5.1.1.

##### Índices físicos do estado natural

A Tabela 9 apresenta um resumo dos índices físicos do solo coluvionar e dos solos residuais de basalto estudados. Os índices físicos do estado natural contidos em tal tabela foram calculados através de amostras submetidas a ensaios que requeriam corpos de prova de caráter indeformado. Para cada tipo de solo foi obtido apenas um valor para a densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ), obtidos através da média de quatro resultados, para cada tipo de solo. Os valores de peso específico total ( $\gamma_t$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), teor de umidade ( $\omega_i$ ) e grau de saturação ( $S_i$ ) e índice de vazios iniciais ( $e_i$ ) são apresentada a faixa de variação dos valores obtidos, bem como os valores médios apresentados entre parênteses.

Tabela 9 – Índices físicos dos solos estudados

Solo	$G_s$	$\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\omega$ (%)	$S_i$ (%)	$e_i$
SC	2,65	16,5 - 18,8 (17,6)	15,6 - 17,4 (16,5)	3,5 - 8,0 (7,0)	14,8 - 40,0 (31,5)	0,52 - 0,62 (0,58)
SR1	2,91	17,3 - 20,6 (19,0)	13,7 - 16,9 (15,0)	21,8 - 28,1 (26,9)	75,1 - 94,4 (84,6)	0,72 - 1,08 (0,92)
SR2	2,85	15,02 - 17,5 (17,0)	10,0 - 12,2 (11,7)	42,4 - 50,7 (45,0)	77,8 - 96,1 (90,5)	1,29 - 1,85 (1,42)
SR3	2,81	16,4 - 18,2 (17,2)	11,1 - 13,0 (12,1)	36,8 - 47,8 (41,5)	81,09 - 97,4 (90,5)	1,14 - 1,46 (1,27)

( ) Valores Médios

O valor da densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) de um solo depende do constituinte mineralógico das partículas.

A Tabela 10 refere-se a valores do peso específico dos grãos de alguns minerais.

Tabela 10 – Peso específico dos grãos de alguns minerais (modificado – Deer et al, 1981).

Mineral	$\gamma_s$ ( $\text{kN/m}^3$ )
Quartzo	26,5
Muscovita	27,0 - 31,0
Caulinita	26,1 - 26,8
Ilita	26,0 - 28,6
Montmorilonita	27,5 - 27,8
Gibbsita	24,0
Goethita	43,0
Hematita	52,0
Maghemita	42,3 - 55,0
Rutito	43,3 - 55,0

Analisando a Tabela 10, percebe-se que o solo coluvionar possui densidade relativa dos grãos, típica de solos arenosos quartzosos. Para os solos residuais de basalto vê-se um decréscimo da densidade relativa dos grãos com o aumento da profundidade.

Observou-se na preparação de amostras, que o índice de vazios nos solos residuais de basalto é condicionado pela presença de fraturas, quase sempre percebidas nos corpos de prova. Dada a proximidade entre fraturas nos solos residuais de basalto não foi possível calcular índice de vazios que, de fato, representassem apenas o meio poroso contínuo.

O índice de vazios do solo coluvionar apresentou uma menor gama de variação, além de se mostrar bem menor, quando comparado com os demais.

Os solos residuais SR2 e SR3 apresentaram valores de  $\gamma_t$ ,  $\gamma_d$ , e índice de vazios relativamente similares.

O solo residual 1 (SR1), dos solos residuais de basalto foi o que apresentou um comportamento mais diferenciado, haja vista que este já se encontrava em processo de laterização, onde seu índice de vazios mostrou-se inferior, quando comparado aos dos solos residuais SR2 e SR3.

Segundo Gidigas (1976), em horizontes concrecionários, onde ocorre uma maior densificação física dos componentes dos solos, o índice de vazios tende a diminuir.

Todas as amostras de solo residual de basalto apresentaram-se com graus de saturação elevados. Isto possivelmente se deve ao fato da coleta de amostras no campo ter se dado em período chuvoso. Ressalta-se que as sondagens realizadas no local pela empresa responsável pela obra apontavam o nível d'água (NA) na estaca km 229 + 80 LD estava na cota 169,95 m. Como o solo SR3 foi retirado da estaca km 229 + 75 LD, em que este se encontrava na cota 172 m. Sugere-se que o NA encontrava-se cerca de 2m de profundidade desse solo.

### 5.1.2. Granulometria

Conforme descrito no Capítulo 4, foi realizada uma série de ensaios de granulometria no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio para cada tipo de solo em estudo. A figura 22, apresenta as curvas granulométricas obtidas para os 4 tipos de solos.

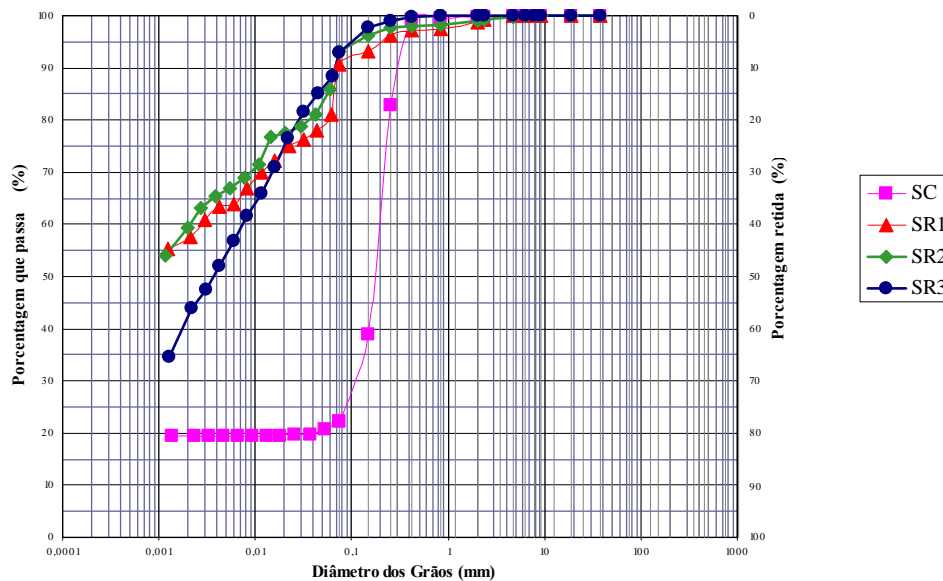


Figura 22 – Curvas granulométricas dos solos em estudo.

Analisando a Figura 22 nota-se que os solos residuais SR1, SR2 e SR3 apresentam uma descontinuidade na transição entre o peneiramento fino e a sedimentação.

Rigo (2000) em ensaios de granulometria em solos residuais de basalto verificou uma acentuada descontinuidade na transição entre o peneiramento fino e a sedimentação. O mesmo autor atribui esta descontinuidade ao processo de lavagem, onde os grãos tamanho areia podem ter sido quebrados fazendo com que estes passassem na peneira #200.

O SC apresentou-se como sendo o mais arenoso e com um comportamento distinto quando comparado com os demais tipos de solo.

Os SR1 e SR2 apresentaram uma granulometria similar, apesar do SR1 ter uma fração areia mais elevada, o que pode ser explicado pela quantidade de concreções ferruginosas em tal solo.

O SR3 se mostrou o mais siltoso. Tal solo quando analisado mineralogicamente ainda possuía minerais essenciais constituintes da rocha mãe.

Com o intuito de se verificar o grau de heterogeneidade dos solos em estudo, também foram realizadas análises granulométricas dos solos na CNPS/Embrapa. Tais análises foram realizadas em amostras de blocos diferentes aos da granulometria inicial, porém advindas dos mesmos poços de inspeção e coleta. É importante ressaltar que a análise granulométrica realizada pela Embrapa Solos utilizou amostras de solo passante na peneira 0,42 mm (#40).

A tabela 11 apresenta valores percentuais das frações dos solos obtidas nos ensaios de granulometria conduzidos na PUC-Rio e CNPS / Embrapa. A tabela também apresenta valores de umidade higroscópica para cada tipo de solo. A umidade higroscópica foi obtida através da secagem do solo ao ar, até a constância de peso dos mesmos.

Tabela 11 – Resultados ensaios de granulometria dos solos em estudo.

Solo	LOCAL ENSAIO	AREIA (%)				SILTE (%)	ARGILA (%)	SILTE + ARGILA (%)	Whigroscópica (%)
		Grossa	Média	Fina	Total				
SC	PUC	-	38	40	78,0	2,0	20,0	22	0,6
	EMBRAPA	-	78,0		78,0	2,0	20,0	22	-
SR1	PUC	2,7	2,7	9,3	14,7	23,6	61,7	85,3	1,6
	EMBRAPA	-	2,8	14	16,8	21,2	62,0	83,2	-
SR2	PUC	2,0	1,4	5,2	8,6	25,8	65,6	91,4	12,4
	EMBRAPA	-	1,6	2,0	3,6	26,4	70,0	96,4	-
SR3	PUC	0,1	1,5	10,5	12,1	45,7	42,2	87,9	15,6
	EMBRAPA	-	4,2	14	18,2	49,8	32,2	82,0	-

Levando-se em consideração a diferença entre as metodologias para a obtenção da granulometria, onde o procedimento utilizado pela CNPS / Embrapa está descrito no Manual de Métodos de Análise de Solos - CNPS (1997); de acordo com a Tabela 11 verifica-se que não houve uma variabilidade significativa quanto aos valores percentuais das frações nos solos em estudo.

Quanto ao teor de umidade higroscópica nota-se que o SR1 apresenta um teor consideravelmente menor que os dos solos residuais SR2 e SR3.

### **5.1.3.**

#### **Limites de Atterberg**

A realização dos limites de liquidez e de plasticidade seguiu as metodologias contidas nas normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984). Porém a preparação das amostras para os referidos ensaios se deu de duas maneiras. Na primeira utilizamos a fração passante na peneira 0,42 mm (#40) previamente secas ao ar, enquanto que na segunda utilizamos a fração passante na peneira 0,075 mm (#200) também previamente secas ao ar.

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para as duas metodologias de limites dos solos SR1, SR2 e SR3, a mesma também apresenta valores de índice de atividade calculados com a percentagem de fração argila dos ensaios de granulometria realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

É importante ressaltar que o solo coluvionar se mostrou não plástico para a metodologia com material passante na peneira 0,42 mm (#40).



Tabela 12 – Limites de consistência dos SR1, SR2 e SR3.

SOLO	Metodologia	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IA
SR1	#40	61,6	35,2	26,4	0,43
	#200	81,4	42,0	39,4	0,64
SR2	#40	82,5	52,9	29,6	0,45
	#200	118,3	53,5	64,8	0,99
SR3	#40	77,2	50,8	26,4	0,63
	#200	84,1	52,0	32,1	0,76

Analisando a Tabela 12 observa-se que para todos os solos houve um aumento nos limites de liquidez e plasticidade para ensaios com amostra passante na peneira 0,075 mm (#200), quando comparado aos de amostra passante na peneira 0,42 mm (#40). A amostra de SR3 apresentou um aumento significativamente menor dos limites de consistência quando comparado aos dos solos residuais SR1 e SR2.

#### 5.1.4.

#### Atividade das Argilas e Classificação SUCS

Segundo o critério de atividade de Skempton, os solos residuais de basalto SR1, SR2 e SR3, se comportaram como solos com baixa atividade a atividade normal.

Van Der Merwe (1975) apud Dias Junior (1983) propôs modificações nos contatos de atividade 0,5 com as regiões de expansões médias, alta e muito alta, propondo o critério indicado na figura 23.

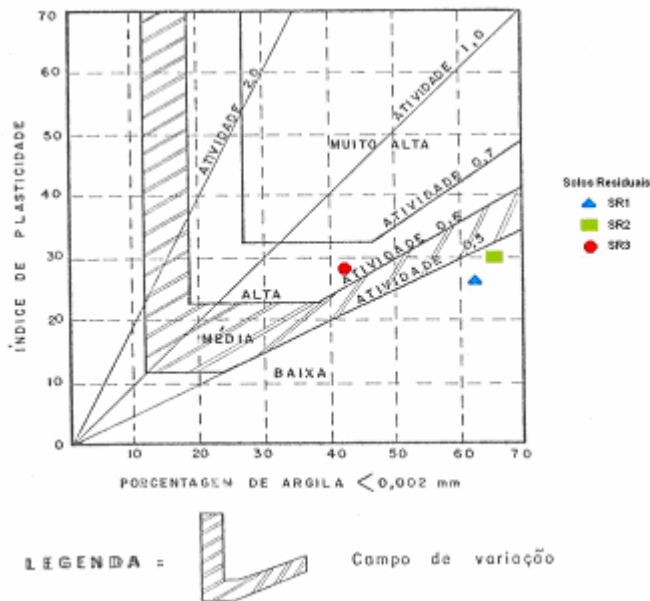


Figura 23 – Graus de potencialidade de expansão (Willians, 1958 e Van Der Merwe, 1975).

Os valores plotados na figura 23 referem-se aos ensaios de limites de Atterberg com amostras passante na peneira #40, em que a granulometria considerada foi a realizada no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, para os SR1, SR2 e SR3.

Nota-se que os SR1, e SR2 apresentam-se com grau baixo de potencialidade, enquanto que o SR3 apresentou-se com sendo de potencialidade alta de expansão.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo coluvionar é classificado com sendo SC, areia argilosa; enquanto que os solos SR1, SR2 e SR3 são classificados como sendo MH, solos de alta plasticidade (Argilas Siltosas / Silte Argilosos).

## 5.2. Análises Mineralógicas

### 5.2.1. Lâminas Delgadas

Com o objetivo de se verificar possíveis alterações mineralógicas ao longo perfil geológico-geotécnico proposto foram confeccionadas lâminas de solos, bem como da rocha (diabásio e arenito) que também se faziam presentes ao longo do perfil em estudo.

A fotomicrografia de diabásio em luz natural (Figura 24) mostra os feldspatos calco-sódicos (F) alongados apresentando sinais de alteração química e microfraturamento. Entre os grãos de feldspatos observam-se piroxênios já bastante oxidados. Na fotomicrografia em luz polarizada (Figura 25), percebe-se o grau de alteração dos feldspatos, originando-se microvazios decorrentes da mobilização dos álcalis; o mesmo ocorre com os piroxênios, que se encontram em estágios mais avançados de alteração.

A oxidação começa a liberar o ferro que vai se precipitando sob a forma de óxidos ao passo que o magnésio vai sendo liberado e mobilizado.

Tanto a sílica como o alumina, que vão sendo liberados pela alteração dos feldspatos e piroxênios, vão se recombinar dando origem aos argilominerais que vão compor a estrutura inicial do solo residual SR3, como se pode observar na figura 26.

Esta figura mostra ainda uma estrutura reliquiar da rocha com feldspatos extremamente alterados e o aparecimento de micro e macro vazios. As regiões escurecidas correspondem a formação de óxidos/hidróxidos de ferro.

A figura 27 mostra uma organização das partículas de argilominerais dando origem à estrutura do SR2 mais nítida do que a amostra de SR3.

Na figura 28, vê-se um contacto nítido do SR1 com o solo coluvionar. Um detalhe da amígdala (sílica amorfa e cripto-cristalina) inclusa na massa argilosa de solo é evidenciada na figura 29, além de mostrar uma cimentação intensa no solo residual 1 (SR1).

A figura 30 mostra em detalhe o solo coluvionar (SC) com alterações quanto ao seu grau de cimentação.

A figura 31, mostra a configuração do arenito presente no perfil, mostrando uma macro porosidade elevada.

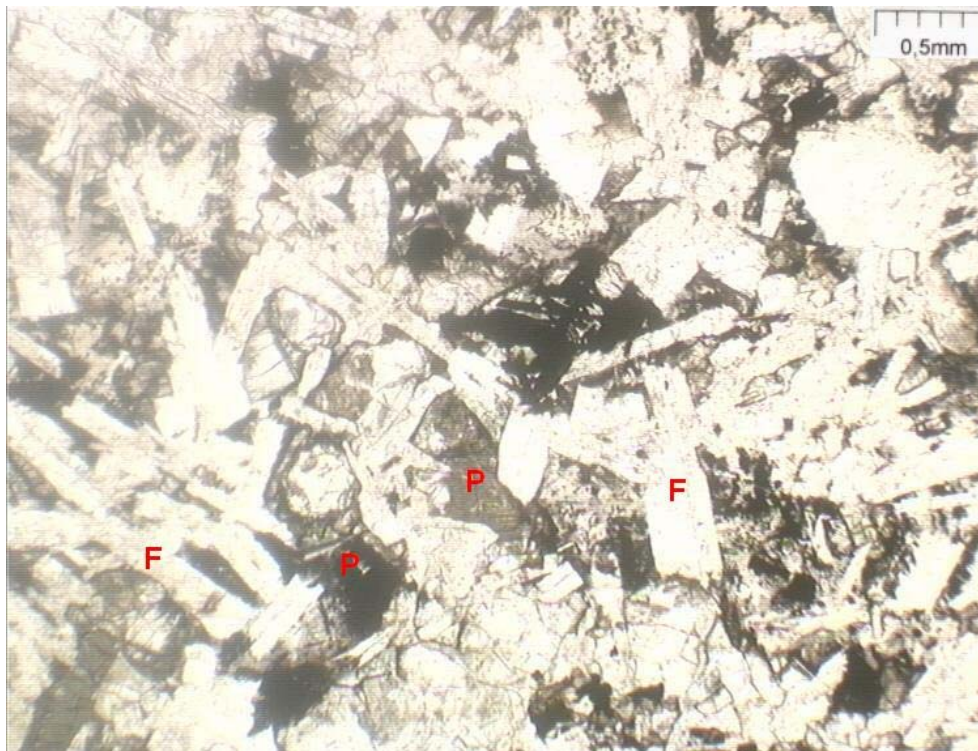


Figura 24 – Fotomicrografia da rocha diabásio com luz natural, em que (F) são os Feldspatos Calco-Sódicos e (P) são os piroxênios em processo de oxidação.

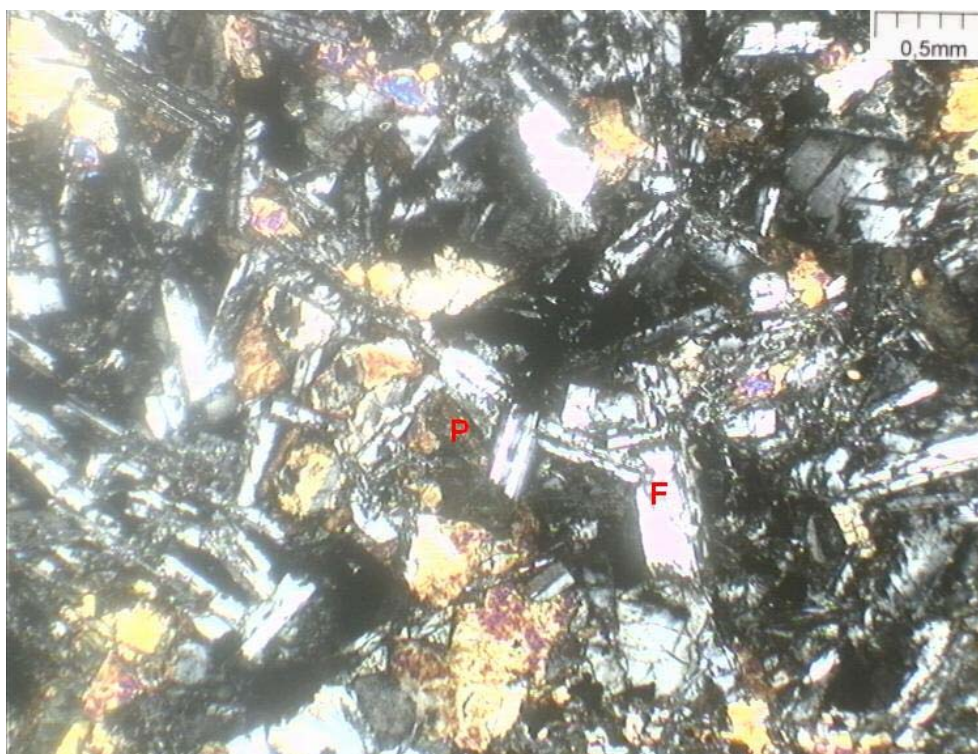


Figura 25 - Fotomicrografia da rocha de diabásio com luz polarizada em que (F) são os Feldspatos Calco-Sódicos e (P) são os piroxênios em processo de oxidação.





Figura 26 – Fotomicrografia do solo residual 3 (SR3), em que (F) são feldspatos calco-sódicos apresentando um microfraturamento.



Figura 27 – Fotomicrografia do solo residual 2 (SR2), mostrando os feldspatos calco-sódicos completamente argilizados.



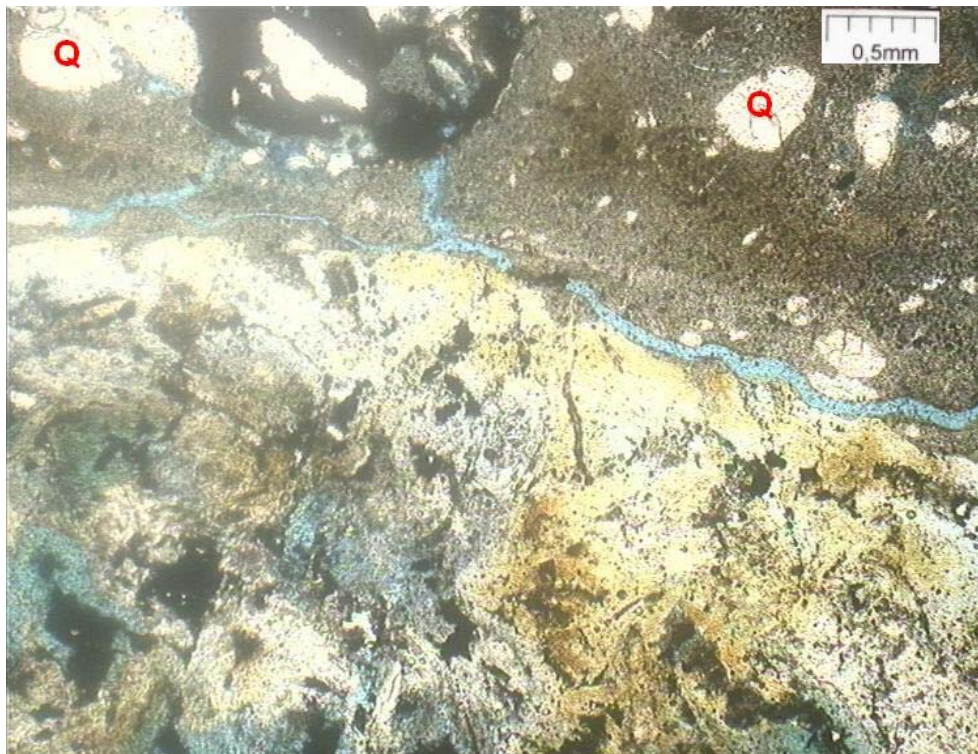


Figura 28 – Fotomicrografia do solo residual 1 (SR1), mostrando o contacto com o solo coluvionar (acima), em que (Q) são grãos de quartzo pertencentes ao solo coluvionar.

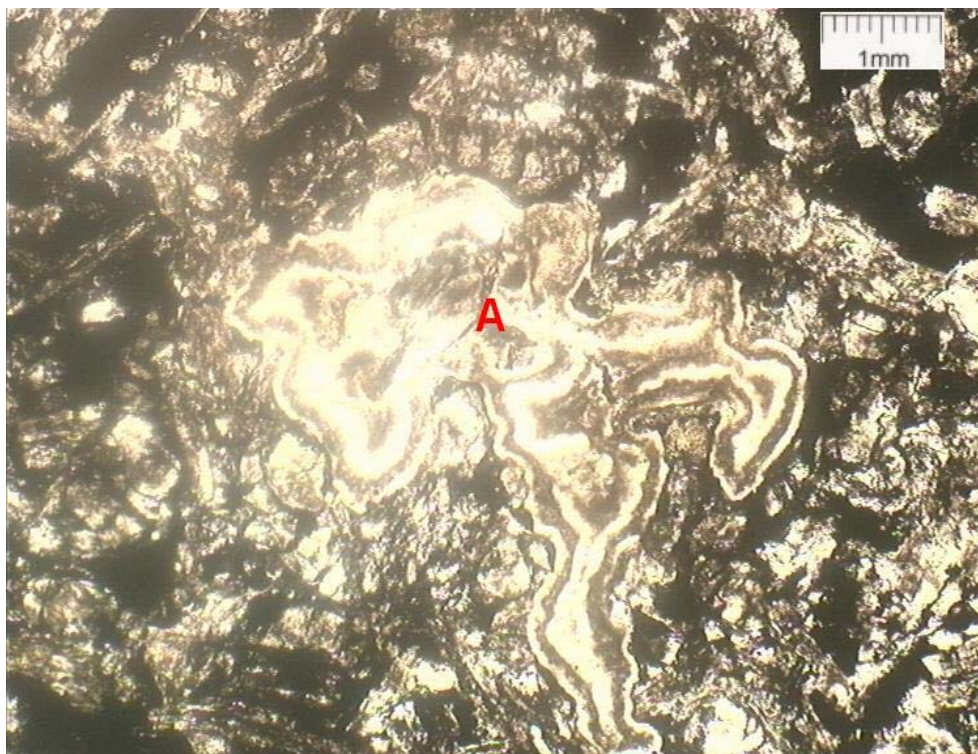


Figura 29 – Detalhe de uma amígdala (A) presente no solo residual 1 (SR1).



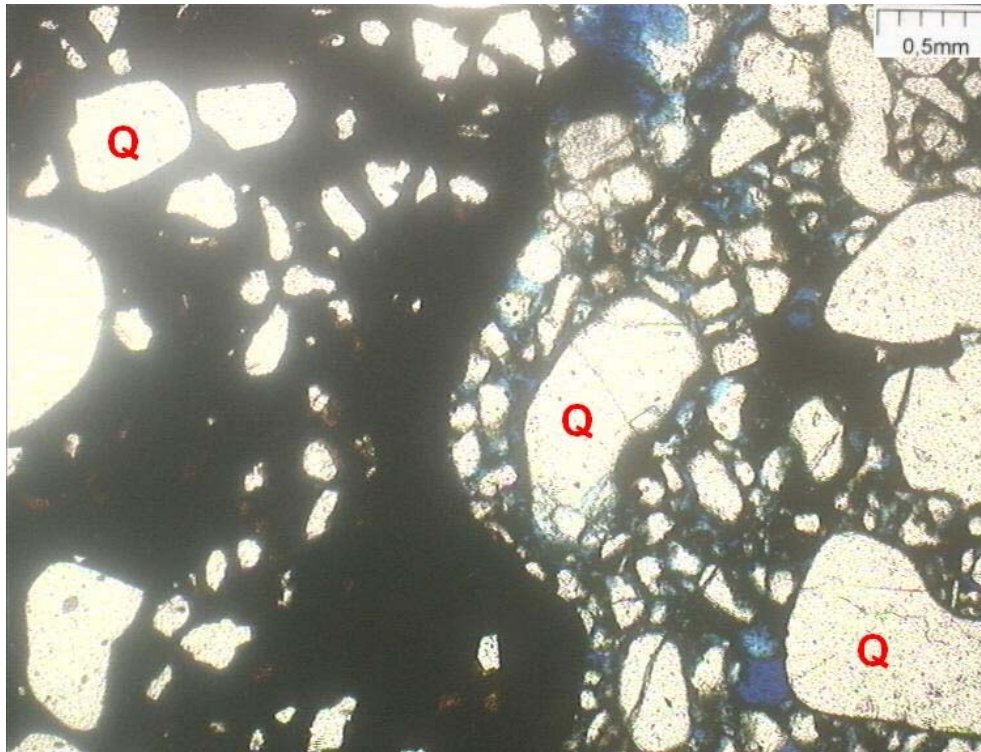


Figura 30 – Detalhe do solo coluvionar (SC), apresentando diferenciações quanto a sua cimentação, sendo que (Q) são grãos de quartzo.

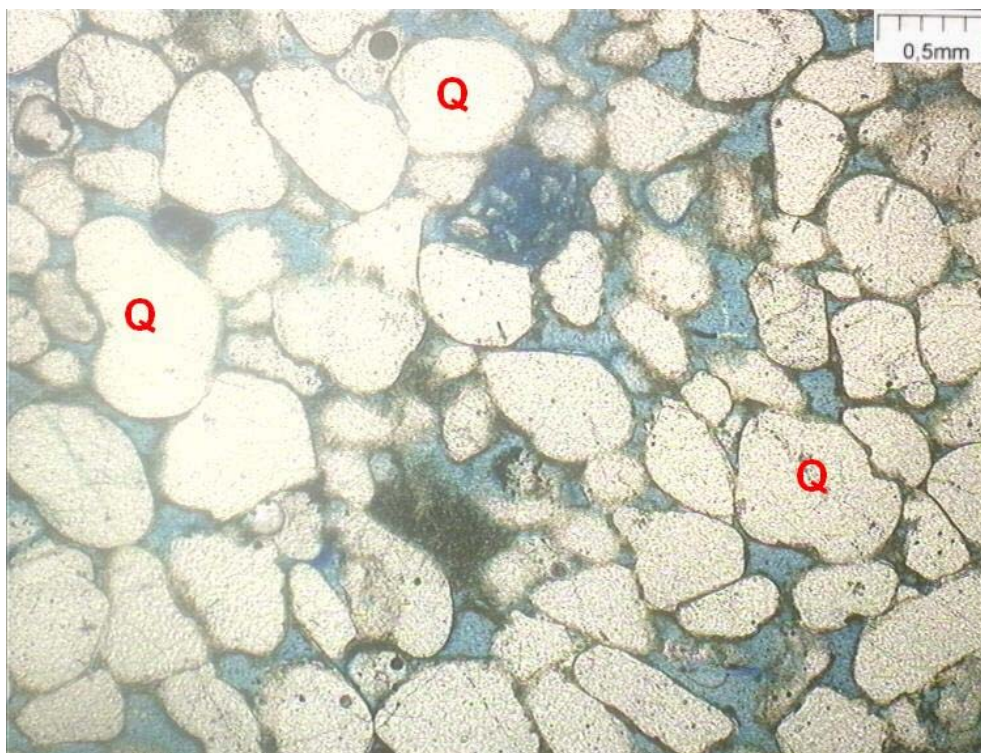


Figura 31 – Detalhe de um arenito presente no perfil, apresentando grãos de quartzo (Q) arredondados e facetados.



### 5.2.2. Fração Fina (Silte e Argila)

Conforme mencionado no capítulo anterior a caracterização das frações finas dos quatro solos pertencentes ao perfil foram realizadas através de ensaios de difração de raios x.

Para as amostras de solo coluvionar (SC) e solos residuais SR1 e SR2 foram realizadas análises apenas nas frações argilas.

Os resultados obtidos para os três materiais são apresentados nas figuras 32, 33 e 34, respectivamente. Analisando os difratogramas dos três tipos de solo observa-se que a caulinita é o argilomineral predominante. No entanto para amostra de material esverdeado encontrado em alguns blocos de solo SR2 fez-se a análise de difratogrametria de raios X (Figura 35), em que observou-se além de picos típicos do argilomineral caulinita, a presença de pico difratado a 15 Å. Sugerindo a presença também de esmectita em tal solo.

Para análise do solo residual 3 (SR3), foi necessário a preparação de lâminas de argila e silte, que foram analisadas naturalmente e saturadas com etilenoglicol.

As figuras 36 e 37 mostram os difratogramas obtidos para as amostras naturais de caráter natural de argila e silte, respectivamente. Estas indicam a presença de um pico difratado à 13 Å. Sendo necessário o tratamento das amostras com etilenoglicol, para caracterizar o grupo do argilomineral dominante. Os resultados são mostrados também nas figuras 36 e 37. Tais figuras mostram um deslocamento dos picos em relação às dos difratogramas em lâminas de caráter natural, tanto de argila como em silte.

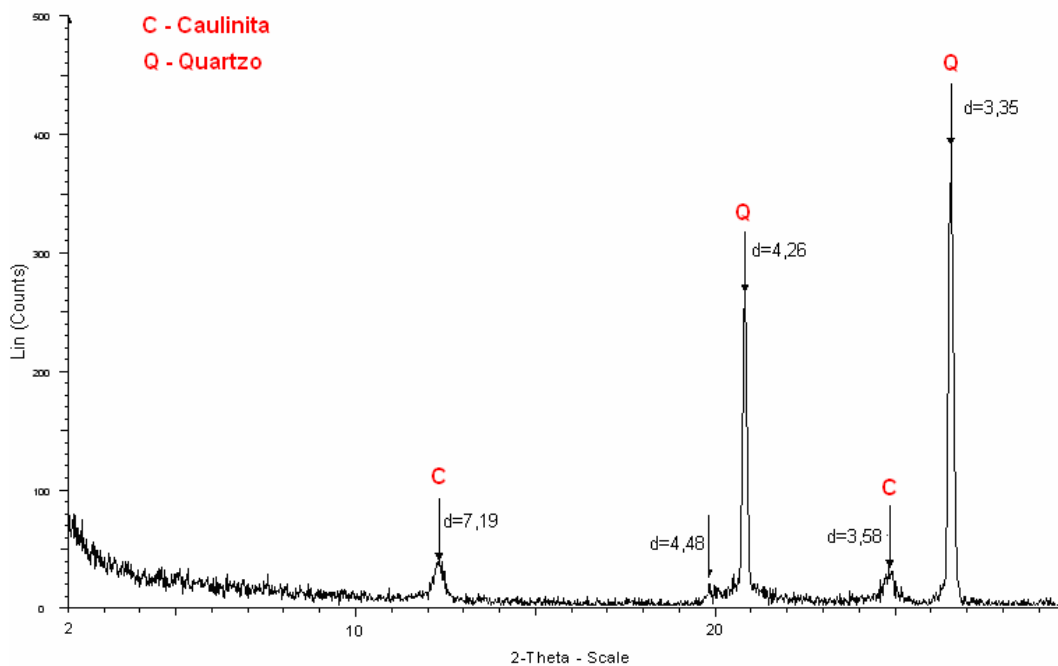


Figura 32– Difratoograma de Raios- X de argila do solo coluvionar.

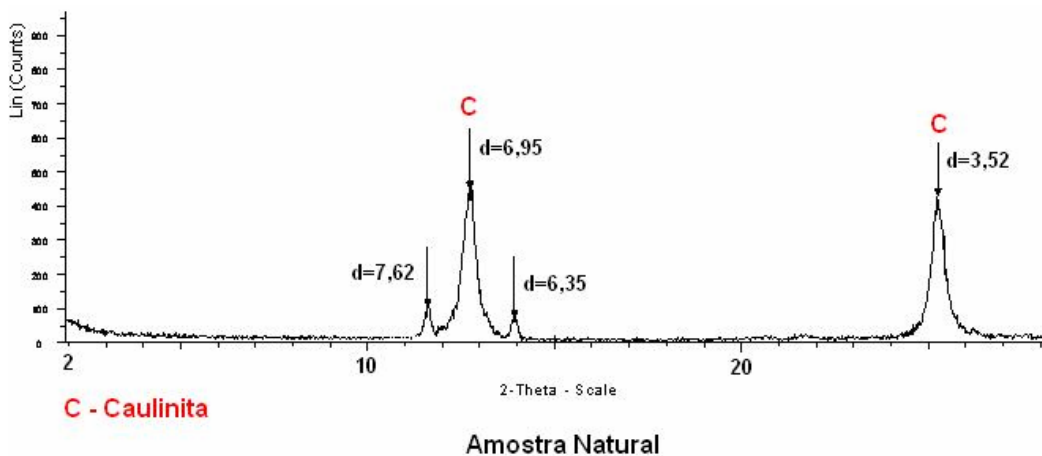


Figura 33- Difratoograma de raios-x de argila do solo residual 1 – amostra natural.

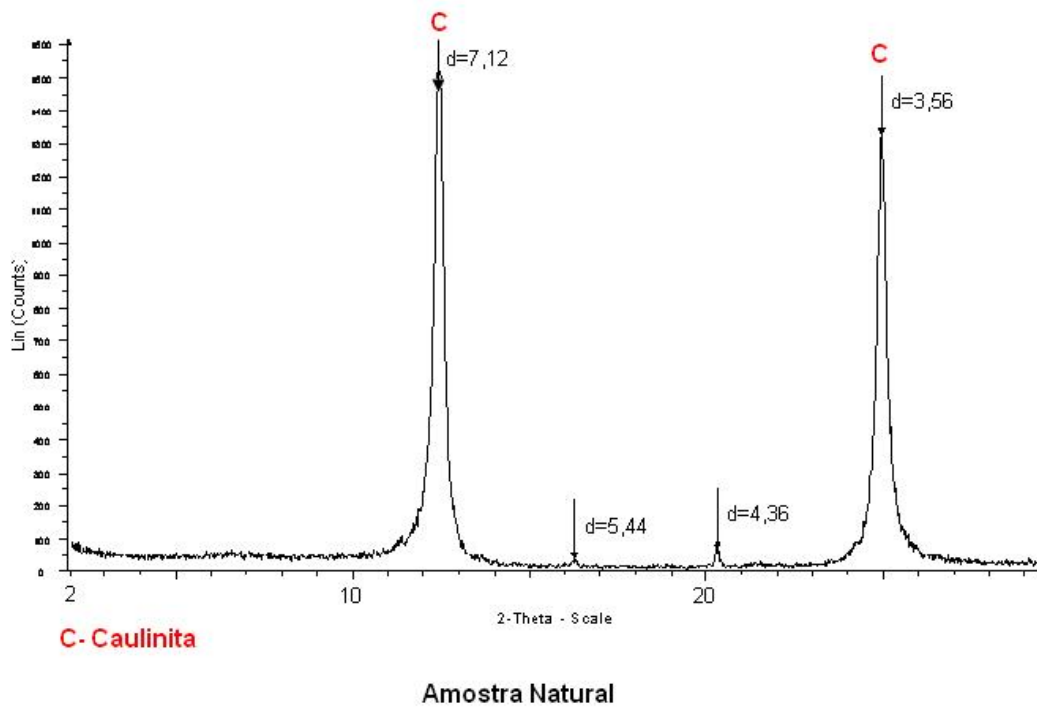


Figura 34 - Difratoograma de raios-x de argila do solo residual 2 – amostra natural.

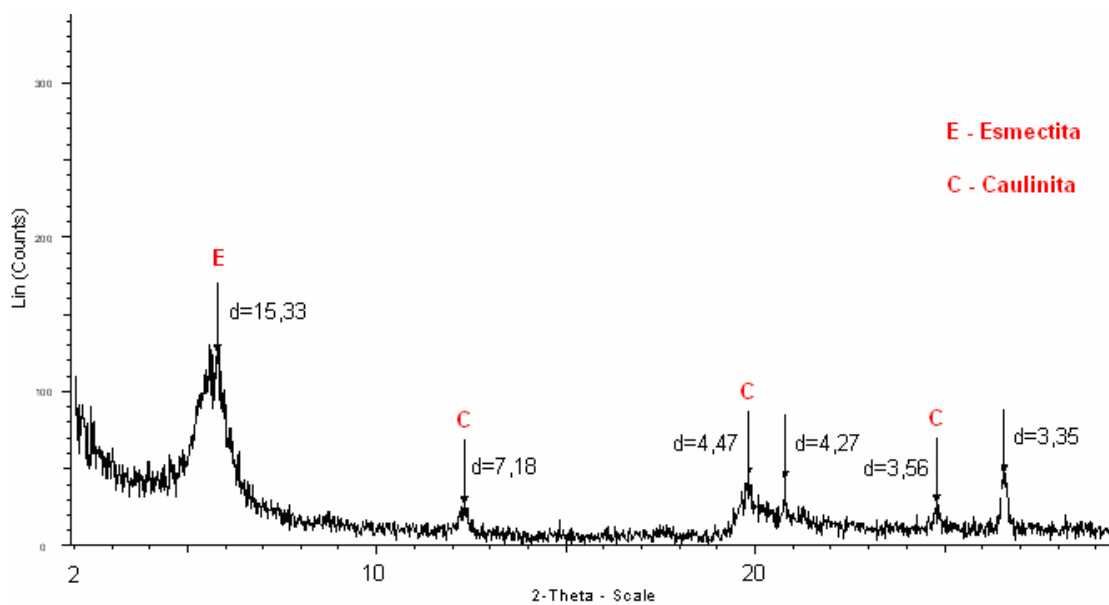


Figura 35 – Difratoograma de raios X de material esverdeado do solo SR2.

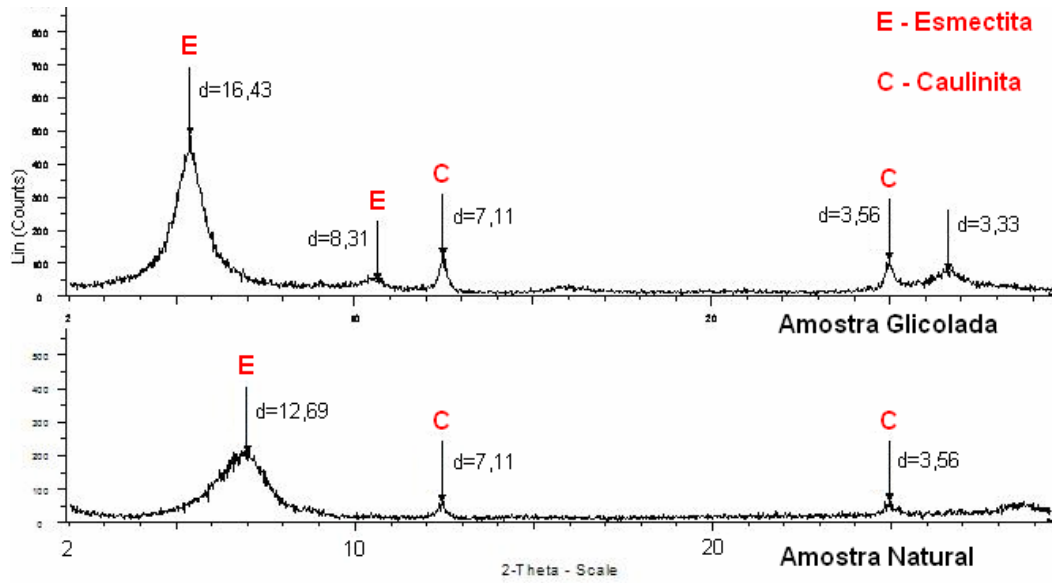


Figura 36- Difratoograma de raios-x de argila do SR3 (natural e glicolada).

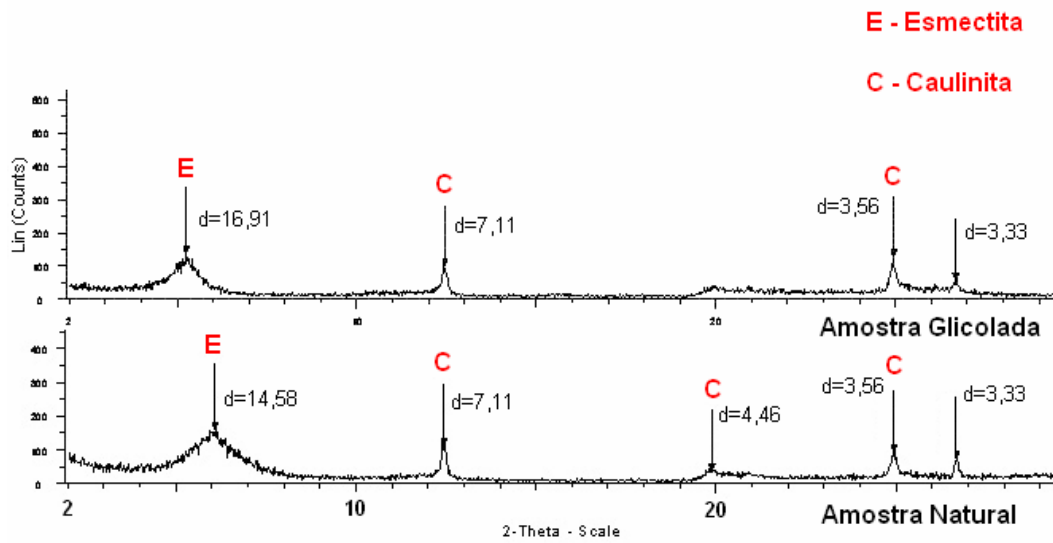


Figura 37 - Difratoograma de raios- X de silte do solo residual 3 (natural e glicolada).

### 5.2.3. Fração Areia

A composição mineralógica das frações areias dos solos foi analisada utilizando-se lupa binocular, disponível no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio, onde a distribuição estava disposta da seguinte forma:

- Solo Coluvionar - apresentou um predomínio de quartzo sub-arredondado e concreções ferruginosas;
- Solo Residual 1 – concreções ferruginosas, quartzo hialino e pequena quantidade de quartzo sub-arredondado;
- Solo Residual 2 – concreções ferruginosas, hematita e fragmentos de geodo, zeólitas e quartzo hialinos. Em análise em blocos distintos, porém advindos do mesmo poço, notou-se uma variação acentuada quanto a presença de concreções ferruginosas.
- Solo Residual 3 - apresentou Feldspatos cálcicos intemperizados, magnetita e quartzo hialino.

A fração areia do solo residual 1 (SR1) mostrou composição mineralógica bastante diferenciada dos demais solos residuais, o que pode evidenciar adições de detritos transportados. Também pôde-se notar uma presença acentuada de concreções ferruginosas.

### 5.3. Análise Química

Conforme mencionado no capítulo anterior foram realizadas análises químicas no solo coluvionar (SC) e nos solos residuais SR1, SR2 e SR3 no CNPS/Embrapa.

As análises químicas realizadas na CNPS/Embrapa consistiram em ensaios de complexo sortivo, ataque sulfúrico e na determinação do pH dos solos. Os resultados das mesmas encontram-se resumidos nas tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Resultado dos ensaios de complexo sortivo.

SOLO	Complexo Sortivo cmol/kg							
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T
SC	0,2		0,05	0,08	0,3	0,1	0,9	1,3
SR1	0,6		0,04	0,01	0,6	1,6	2,50	4,7
SR2	10,2	33,9	0,26	0,14	44,5	4,7	3,9	53,1
SR3	7,8	62,9	0,34	0,07	71,1	0,9	3,9	75,9

Tabela 14 – Resultado dos ensaios de pH e ataque sulfúrico.

SOLO	pH (1:2,5) Água	Ataque por H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - NaOH (0,8%) g / kg				Ki	Kr
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>		
SC	4,8	81	54	31	4,4	2,55	1,86
SR1	4,7	278	215	209	18,4	2,20	1,36
SR2	5,4	364	190	132	13,4	3,26	2,25
SR3	5,8	378	148	114	8,7	4,34	2,91

$$Ki = SiO_2 \cdot 1,70 / Al_2O_3; Kr = (SiO_2 / 0,60) / (Al_2O_3 / 1,02) + (Fe_2O_3 / 1,60)$$

Os dados referentes ao complexo sortivo (Tabela 13), representam os valores da soma das bases (S) e dos valores da capacidade de troca catiônica (T), obtido através da soma das bases (S) mais Al<sup>+3</sup> + H<sup>+</sup>.

Os resultados indicaram valores muito baixos de S e T, para as amostras do solo coluvionar (SC) e solo residual 1 (SR1), refletindo o grau de alteração intenso de ambos. Ressaltando-se que quanto mais lixiviado o solo, menores são os valores de S e T. O que não se verifica nas amostras de solo (SR2) e (SR3), considerados com base nesses valores, os menos intemperizados.

Os resultados obtidos pelo ataque sulfúrico e pH (Tabela 14), mostram concentrações expressivas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nas amostras de solos (SR1), indicando estágio de laterização avançada; concordando com os dados obtidos no complexo sortivo. Os valores de pH também mostram tendência de crescimento nas amostras menos alteradas, como evidenciam os valores de  $K_i$  (relação molecular sílica/alumina). Os dados químicos referentes aos percentuais de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , podem ser utilizados como referências para confirmar que a camada referente ao solo coluvionar superficial, foi transportada.

A tabela 15 apresenta os resultados das análises químicas semiquantitativas, através da fluorescência de raios X, nas amostras dos solos: SR1, SR2, SR3 e respectiva rocha coletada no perfil de solo.

Os resultados estão expressos em porcentagens dos principais elementos, sob a forma de óxidos. Os dados obtidos revelam acentuada tendência das concentrações de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na camada superficial (SR1), além da lixiviação de parte de  $\text{SiO}_2$  e da totalidade das bases ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+1}$ ,  $\text{K}^{+1}$ ). Caracterizando um processo geoquímico de laterização. Fato esse, que não se verifica nas amostras correspondentes aos solos SR2 e SR3.

Tabela 15 – Análise química semiquantitativa de óxidos para os solos SR1, SR2, SR3 e rocha alterada.

SOLO/ROCHA	(%)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
SR1	45,21	31,13	21,38	-	-	-	-	2,07	-
SR2	51,50	27,23	15,61	0,238	3,06	-	0,382	1,73	0,17
SR3	57,36	19,71	14,3	0,437	5,61	-	0,560	1,51	0,37
Rocha	52,43	15,65	10,13	9,197	7,97	1,73	1,532	1,02	0,24

#### 5.4. Curva Característica

Conforme evidenciado no capítulo anterior foram determinadas as curvas características através do método papel filtro para os solos em estudo.

As tabelas 16, 17, 18 e 19 apresentam os índices físicos iniciais dos corpos de prova ensaiados para os solos SC, SR1, SR2 e SR3, respectivamente.

Tabela 16 – Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SC para a obtenção da curvas características.

SC					
$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>i</sub> (%)	ei	n (%)	Si (%)
18,8	17,4	7,85	0,52	34,2	40,0
18,6	17,2	7,85	0,54	34,9	38,8
17,9	16,6	7,85	0,59	37,1	35,2
18,3	17,0	7,85	0,55	35,7	37,4
17,9	16,6	7,95	0,59	37,2	35,6
18,0	16,7	7,95	0,58	36,8	36,1
17,6	16,3	7,95	0,62	38,2	34,0
18,1	16,7	7,95	0,58	36,7	36,3

Tabela 17 - Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR1 para a obtenção da curvas características.

SR1					
$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>i</sub> (%)	ei	n (%)	Si (%)
20,3	16,1	26,2	0,81	44,6	94,4
18,3	14,3	27,5	1,02	50,6	78,1
19,2	15,2	26,1	0,90	47,5	83,8
19,4	15,2	28,1	0,91	47,7	89,2
19,6	15,4	27,1	0,88	46,9	88,8
18,7	14,7	26,5	0,97	49,2	79,6
19,8	15,6	27,2	0,87	46,4	91,3
20,6	16,9	21,8	0,72	41,8	88,4



Tabela 18 - Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR2 para a obtenção da curvas características.

SR2					
$\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>i</sub> (%)	e <sub>i</sub>	n (%)	Si (%)
16,8	11,7	44,0	1,44	58,9	87,1
16,9	11,7	44,6	1,43	58,8	89,0
17,5	12,0	46,6	1,38	57,9	96,1
17,2	11,9	45,3	1,40	58,3	92,2
17,5	12,2	43,3	1,33	57,1	92,5
16,7	11,6	43,3	1,44	59,0	85,4
17,4	11,9	45,4	1,39	58,2	92,7
17,3	12,0	44,3	1,36	57,7	92,4

Tabela 19 - Índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR3 para a obtenção da curvas características.

SR3					
$\gamma_{tl}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>i</sub> (%)	e <sub>i</sub>	n (%)	Si (%)
17,5	12,5	39,90	1,22	55,0	90,9
17,6	12,2	43,63	1,28	56,1	95,2
16,4	11,8	39,31	1,18	54,1	80,5
17,9	11,7	40,41	1,19	54,4	94,6
17,7	12,5	42,19	1,23	55,2	95,4
18,2	13,0	39,68	1,14	53,2	97,4
18,1	12,9	40,41	1,16	53,7	96,9
18,1	13,0	39,04	1,14	53,3	95,4

As figuras 38 e 39 correspondem a curvas características de grau de saturação versus sucção mátrica e umidade volumétrica versus sucção mátrica, respectivamente.

A figura 40 mostra os resultados de umidade gravimétrica versus sucção mátrica. Com será discutido adiante, tal gráfico é de pouca utilidade no caso dos solos SR2 e SR3.

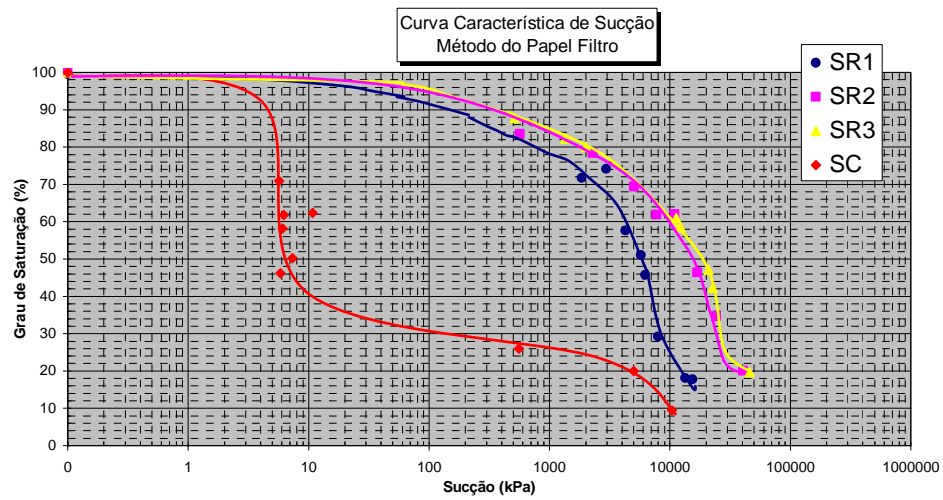


Figura 38 – Curvas características de Grau de Saturação versus Sucção Máfica para os solos em estudo.

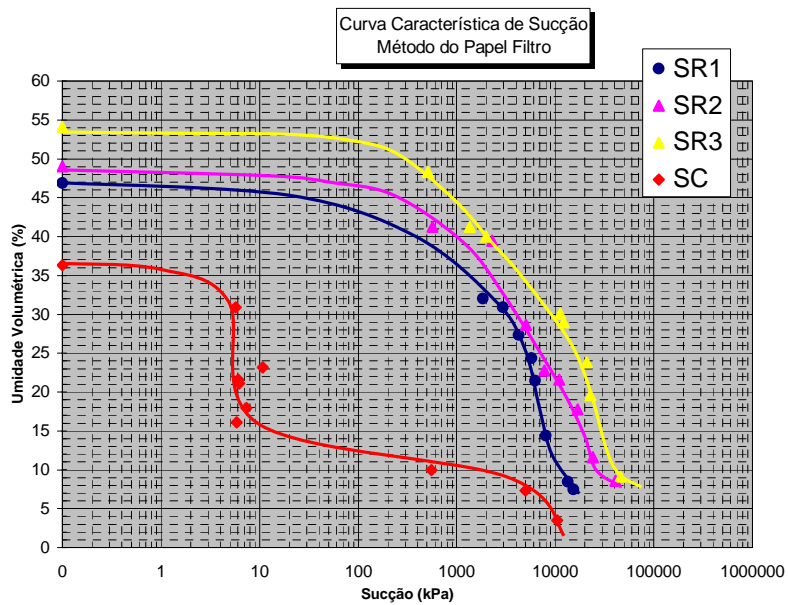


Figura 39 - Curvas características de Umidade Volumétrica versus Sucção Máfica para os solos em estudo.

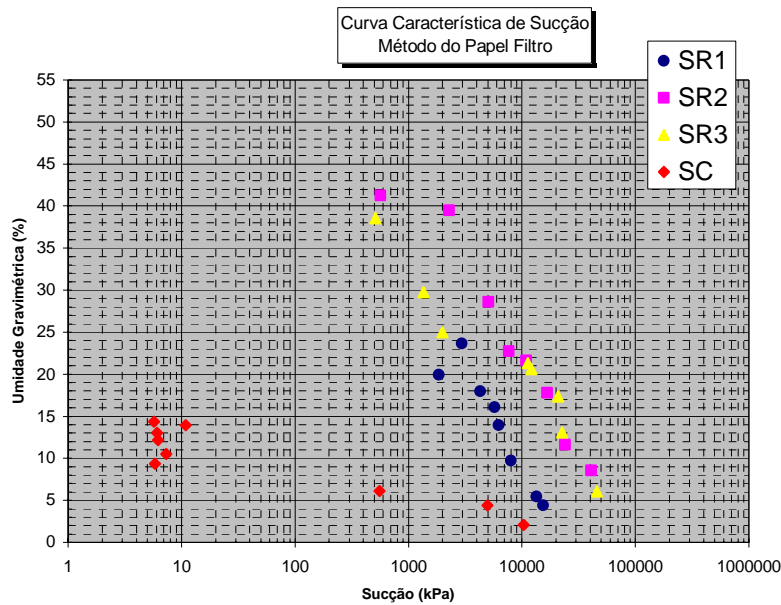


Figura 40 - Curvas características de Umidade Gravimétrica versus Sucção Mátrica para os solos em estudo.

### 5.5. Ensaio de Desagregabilidade

O ensaio de desagregabilidade foi realizado nos 4 tipos de solo em estudo simultaneamente, conforme descrito no capítulo anterior.

Para cada estágio de imersão foram anotadas observações para um melhor entendimento de como as amostras se comportavam quando submetidas a um determinado nível d'água estático.

Com o nível d'água na base das amostras (figura 41), notou-se:

- SC – A amostra começou a desagregar, após 10 minutos;
- SR1 – Permaneceu intacto;
- SR2 – Iniciou a desagregação aos 30 minutos;
- SR3 – Iniciou a desagregação aos 20 minutos.

Com o nível d'água 1/3 da altura das amostras (figura 42), notou-se:

- SC – Se mostrava o mais desagregado, notava-se uma diminuição na base da amostra;
- SR1 – Muito pouca desagregação, notava-se uma expansão;
- SR2 – Pouca desagregação, notava-se também uma expansão;
- SR3 – Se mostrou o segundo mais desagregado, também apresentando uma expansão.

Com o nível d'água 2/3 da altura das amostras (figura 43), notou-se:

- SC – Se mostrava bastante desagregado, com uma perda de material de aproximadamente 40%;
- SR1 – Ainda se mostra quase intacto, com pouca desagregação;
- SR2 – Desagregando-se nas arestas, a mesma era na forma de pastilhas (empastilhamento);
- SR3 – Desagregando-se de maneira uniforme.

Com o nível d'água na altura das amostras (figura 44), notou-se após 2 horas:

- SC – Se mostrou completamente desagregado;
- SR1 – Desagregando-se em pastilhas, com o aparecimento de trincas, coesão intacta;
- SR2 – Continua se desagregando mais nas arestas, coesão intacta;
- SR3 – Continua desagregando uniformemente, amostra apresentando-se com uma folhação horizontal e perda de coesão.

Com o nível d'água na altura das amostras (figura 45), notou após 24 horas:

- SC – Completamente desagregado;
- SR1 – Abertura das trincas, desagregação em forma de pastilhas (empastilhamento);

- SR2 – Perda de coesão, maior desagregação ocorrendo nas arestas, apresentando uma esfoliação horizontal;
- SR3 – Perda de coesão, foliação horizontal, aparecimento de trincas verticais.

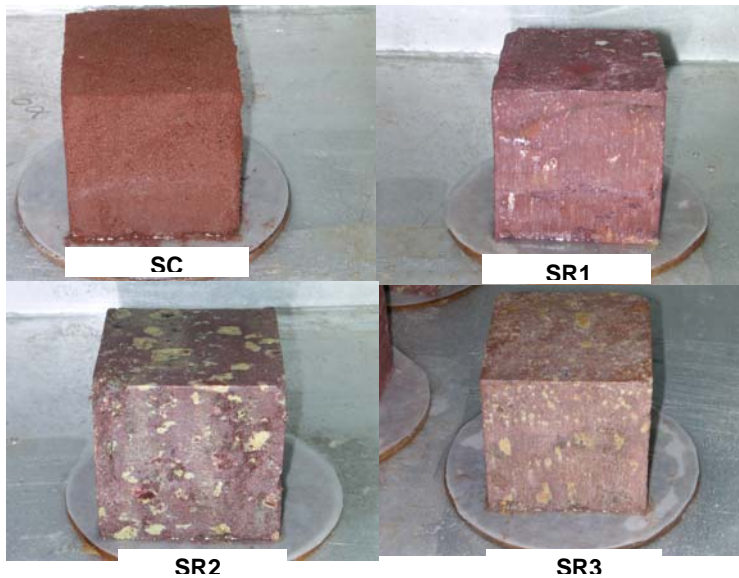


Figura 41 – Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA na base.

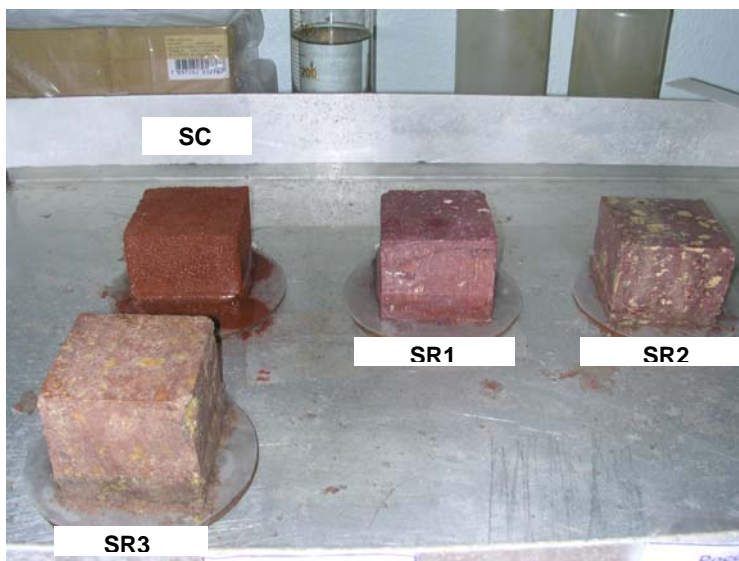


Figura 42- Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA 1/3 da altura das amostras.

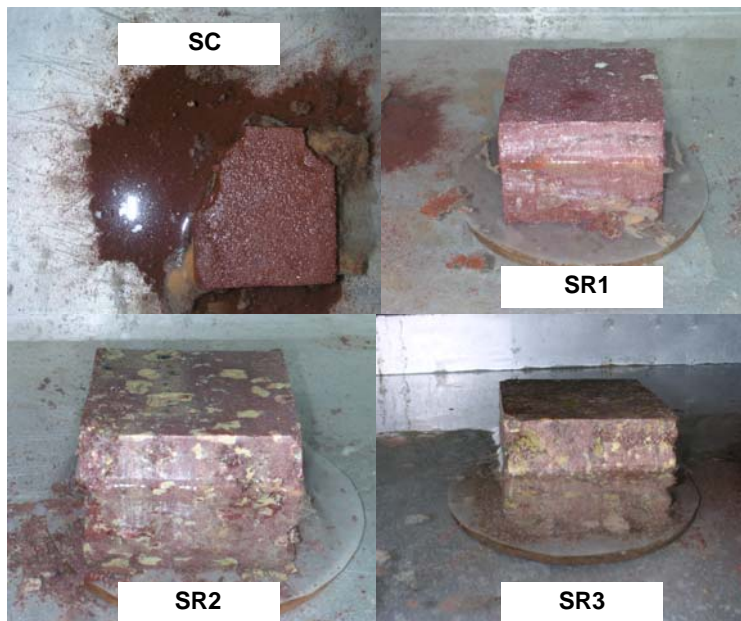


Figura 43 - Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA 2/3 da altura das amostras.

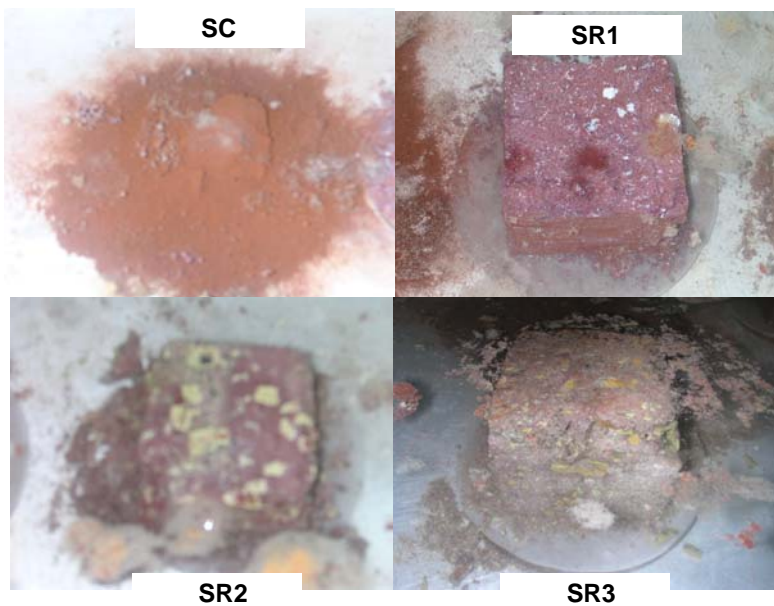


Figura 44 - Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA igual a altura das amostras, após 2 h.

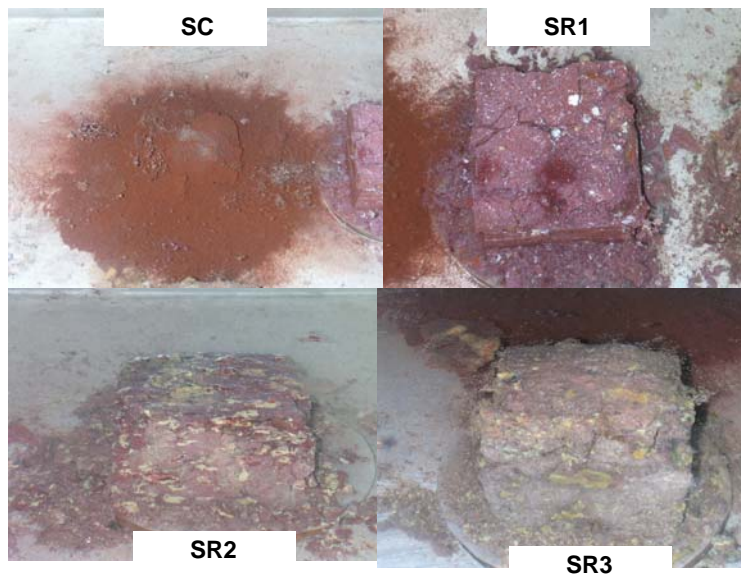


Figura 45 - Amostras submetidas ao ensaio de desagregabilidade com NA igual a altura das amostras, após 24h.

Baseado-se nesse ensaio, o solo coluvionar se mostrou com o grau de erodibilidade mais elevado, seguido do SR3, SR2 e SR1.

## 5.6. Ensaio de Adensamento

Conforme visto no capítulo 4, os ensaios de adensamento foram do tipo edométrico convencional.

Os índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de adensamento executados encontram-se resumidos na tabela 20.

A figura 46 mostra as curvas índice de vazios ( $e$ ) versus logaritmo da tensão efetiva vertical ( $\log \sigma'_v$ ) para os solos SC, SR1, SR2 e SR3.

Valores de pressão de pré-adensamento virtual ( $\sigma'_{oc}$ ) com seus respectivos índices de vazio ( $e_{oc}$ ) e dos índices de compressão ( $c_c$ ) e de expansão recompressão ( $c_e$ ), foram determinados para os solos SC, SR1, SR2 e SR3, tais resultados serão apresentados no capítulo 6.



Os parâmetros de compressibilidade foram estimados a partir de retas traçadas (a sentimento) pelos pontos definidos a reta de compressão virgem (últimos pontos do carregamento) e pelos pontos de descarregamento no gráfico e  $x \log \sigma'$ . Os parâmetros de pré-adensamento foram estimados usando o método Pacheco-Silva.

Tabela 20 – Índices físicos das amostras submetidas ao ensaio edométrico.

Solo	Cota (m)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$S_i$ (%)	$e_i$
SC	192	16,9	16,3	3,5	14,8	0,62
SR1	183	18,7	14,9	25,8	78,8	0,95
SR2	178	17,3	12,2	41,5	87,2	1,35
SR3	172	17,3	12,4	39,2	87,4	1,25

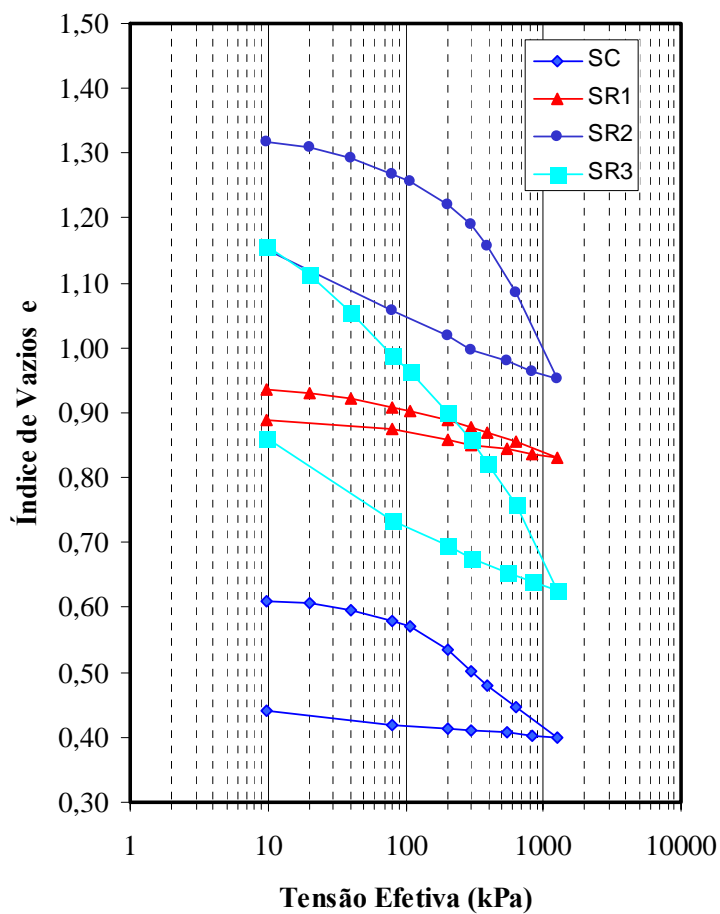


Figura 46 – Relações de  $e$  x  $\log \sigma'_v$  obtidas no ensaio edométrico para SC, SR1, SR2 e SR3.



## 5.7. Avaliação de Expansibilidade

Para o ensaio de inserção de etilenoglicol em torrões dos solos residuais em estudo. Verificou-se uma expansão para todos os torrões pertencentes ao solo residual 3, enquanto que para o solo residual 2 verificou-se a expansão de apenas alguns torrões. Para o solo residual 1 não se observou nenhuma expansão.

A tabela 21 apresenta os índices físicos dos corpos de prova dos solos residuais em estudo, para o ensaio de expansão em amostras confinadas lateralmente e sem carga axial.

A figura 47 apresenta o gráfico de altura dos corpos de prova versus tempo.

Tabela 21 – Índices físicos iniciais dos cp's submetidos ao ensaio de expansão.

Solo	$\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\omega_i$ (%)	$S_i$ (%)	$e_i$
SR1	17,3	13,7	27,9	75,1	1,01
SR2	16,8	11,8	42,4	88,2	1,36
SR3	16,4	11,7	42,4	86,1	1,38

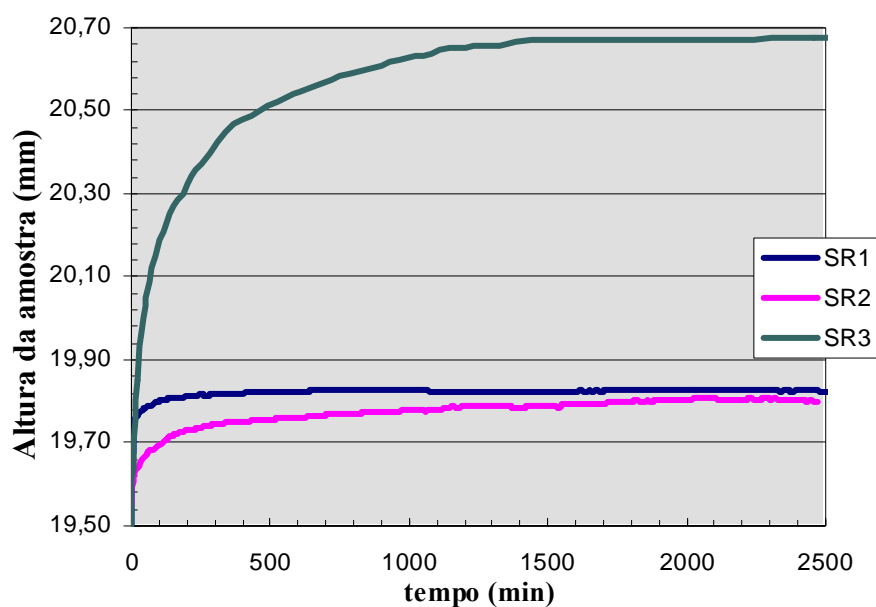


Figura 47 – Gráfico de altura de amostra (mm) versus tempo (min).

## 5.8. Ensaio de Cisalhamento Direto

### 5.8.1. Solo Coluvionar

A tabela 22 apresenta os índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SC submetidos ao ensaio de cisalhamento direto drenado.

As figuras 48, 49 e 50 mostram as curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ); deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) e a envoltória de Mohr-Coulomb no gráfico tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus tensão normal aplicada ( $\sigma$ ) obtidas para o solo coluvionar, conforme procedimento descrito no capítulo anterior.

As curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) (Figura 48), mostram a inexistência de pico de resistência para todos os níveis de tensões verticais utilizados. Por esta razão foi assumido para estas curvas, que o solo havia rompido quando a curva tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) atingisse uma inclinação constante.

de Campos & Carrillo (1995) na intenção de poder ter um critério geral para definir a ruptura em ensaios de sucção controlada e de ensaios submersos em amostras indeformadas advindas da Vista Chinesa na cidade do Rio de Janeiro, para resultados que indicavam a ausência de picos, utilizaram o gráfico de  $\alpha = \Delta\tau / \Delta\delta_h$  versus  $\delta_h$ , para definir a ruptura de tensão cisalhante associada a cada amostra. Admitindo que a ruptura se daria quando  $\alpha$  (inclinação) fosse constante.

Notam-se nas curvas para ensaios realizados com baixas tensões normais (40 kPa), que a tensão cisalhante tende a se estabilizar após ruptura, enquanto que em ensaios com tensões normais acima de 110 kPa foi observado um aumento uniforme de tensão cisalhante pós ruptura.

Com relação às curvas deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) (Figura 49), todos os ensaios apresentaram uma contração. Para baixos níveis de tensão normal (40 kPa) a variação volumétrica tende a se estabilizar após ocorrer a ruptura.

A tabela 23 apresenta as tensões normais e tensões cisalhantes efetivas de ruptura consideradas para determinação da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para o solo SC.

Tabela 22 – Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SC submetidos ao cisalhamento direto drenado.

SOLO COLUVIONAR					
% Pedregulho - 0					
% Areia - 78					
% Silte - 2					
% Argila - 20					
Amostra	(kN/m <sup>3</sup> )		w <sub>i</sub> (%)	S <sub>i</sub> (%)	e <sub>i</sub>
	$\gamma_t$	$\gamma_d$			
1	17,3	16,3	6,5	29,0	0,59
2	16,5	15,6	6,3	25,1	0,67
3	17,2	16,1	6,5	28,1	0,53
4	16,9	15,9	6,2	25,9	0,55
5	17,0	16,1	5,9	25,3	0,61

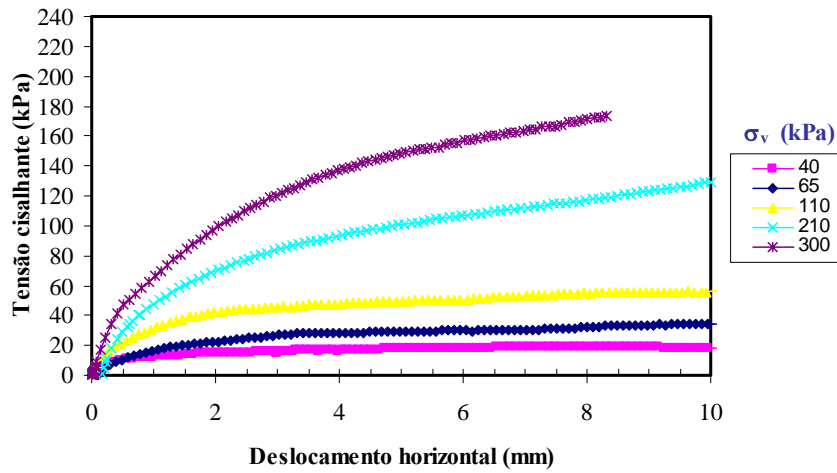


Figura 48 – Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ), para o solo coluvionar.

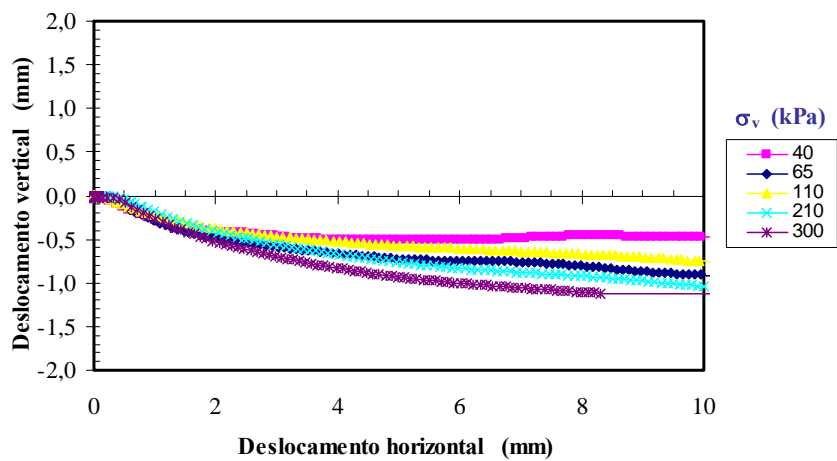


Figura 49 – Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ), para o solo coluvionar.

Tabela 23 – Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SC.

SC		
Amostra	kPa	
	$\sigma_{\max}$	$\tau_{\max}$
1	44,3	19,2
2	68,2	27,5
3	115,5	45,6
4	215,4	98,1
5	315,5	144,8

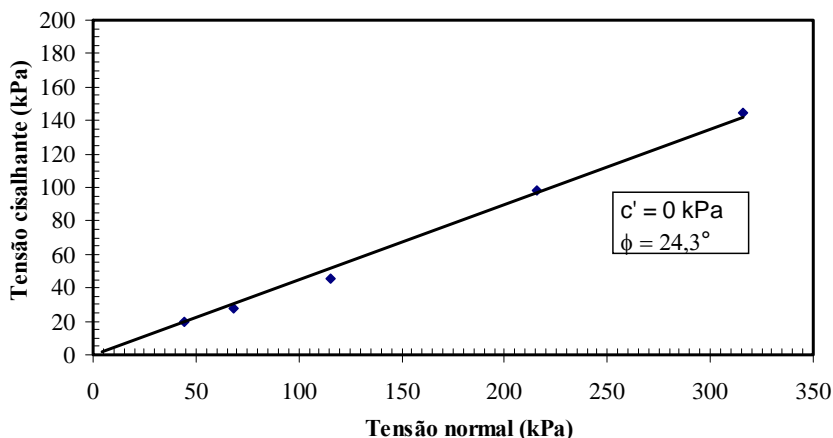


Figura 50 – Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo coluvionar.

### 5.8.2. Solo Residual 1

A tabela 24 apresenta os índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR1 submetidos ao ensaio de cisalhamento direto drenado.

As figuras 51, 52 e 53 mostram as curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ); deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) e a envoltória de Mohr-Coulomb no gráfico tensão cisalhante versus ( $\tau$ ) tensão normal ( $\sigma$ ) obtidos para o solo residual 1 (SR1), conforme procedimento descrito no capítulo anterior.

A curva tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) (Figura 51) mostra a presença de picos pouco pronunciados para tensões normais de até 65 kPa; enquanto que a inexistência de pico de resistência foi notada para os demais níveis de tensão normal. Para ensaios com tensão normal de até 65kPa foi assumido que o solo havia rompido quando a curva tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) atingisse o pico de resistência; enquanto que para os demais níveis de tensão admitiu-se que o solo havia rompido quando a curva tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) atingisse uma inclinação constante.

Com relação às curvas deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_h$ ) (Figura 52), os ensaios para tensões normais de até 110 kPa apresentaram comportamento dilatante, enquanto que para os demais níveis de tensão normal apresentaram contração.

A tabela 25 apresenta as tensões normais e tensões cisalhantes efetivas de ruptura consideradas para determinação da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para o solo SR1.

Tabela 24 - Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SR1 submetidos ao cisalhamento direto drenado.

SOLO RESIDUAL 1					
% Pedregulho -		0,0			
% Areia -		14,7			
% Silte -		23,6			
% Argila -		61,7			
Amostra	(kN/m <sup>3</sup> )		w <sub>i</sub> (%)	S <sub>i</sub> (%)	e <sub>i</sub>
	$\gamma_t$	$\gamma_d$			
1	19,1	14,9	28,0	89,6	0,91
2	17,6	13,7	28,2	75,7	1,08
3	18,8	14,7	28,0	86,7	0,94
4	18,8	14,7	28,1	86,6	0,94
5	18,8	14,9	26,3	83,2	0,92

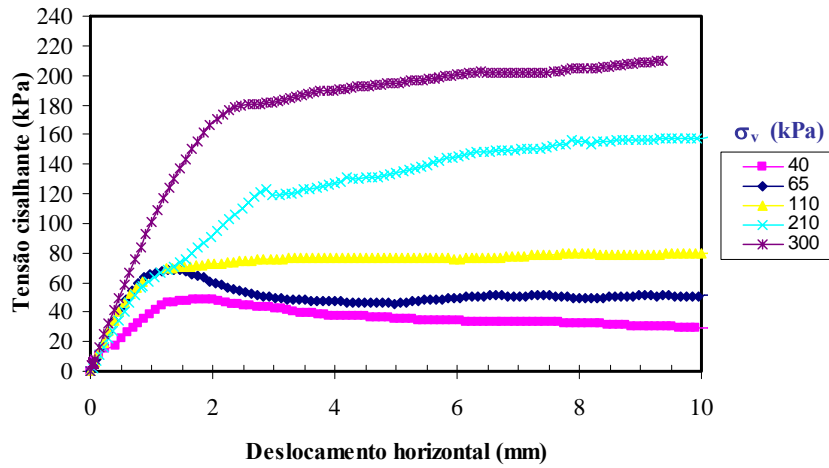


Figura 51 - Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ), para o solo residual 1.

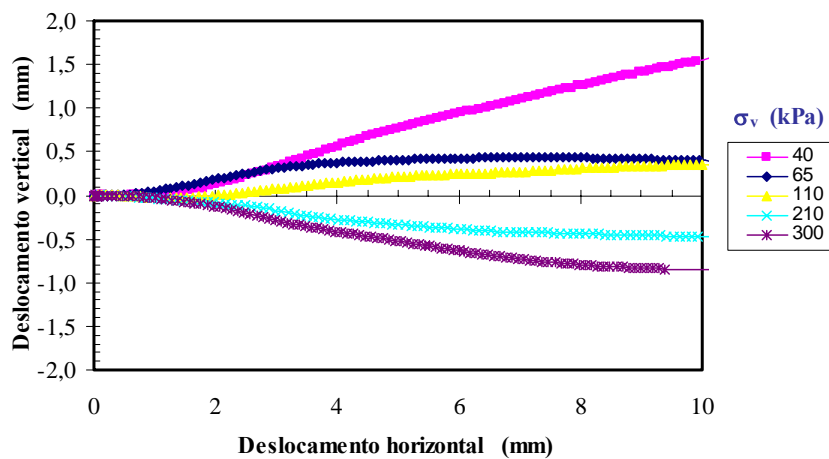


Figura 52 - Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ), para o solo residual 1.

Tabela 25 - Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SR1.

SR1		
Amostra	kpa	
	$\sigma_{max}$	$\tau_{max}$
1	41,5	48,6
2	65,7	68,2
3	113,6	72,6
4	213,3	122,8
5	309,0	181,0

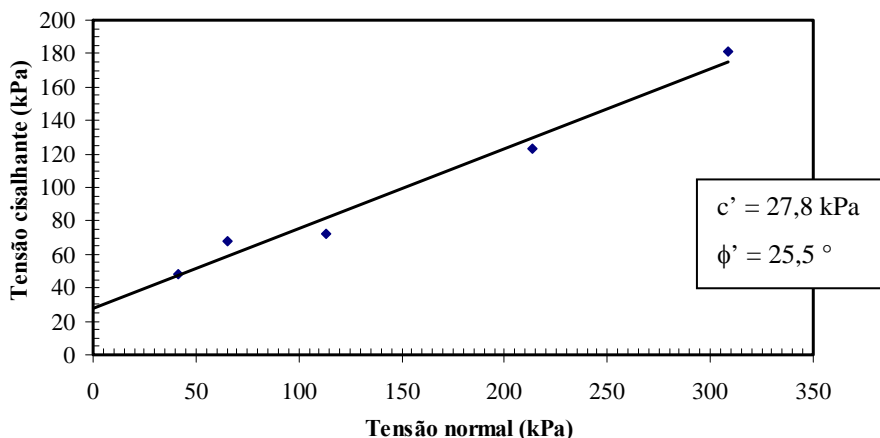


Figura 53 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual 1.

### 5.8.3. Solo Residual 2

A tabela 26 apresenta os índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR2 submetidos ao ensaio de cisalhamento direto drenado.

Os ensaios de cisalhamento direto efetuados no solo residual 2 (SR2) procederam-se através de duas rotinas, as quais estão descritas no capítulo anterior.

Na primeira rotina, foram utilizadas tensões normais iniciais de 40, 65, 110, 210 e 300 kPa, enquanto que na segunda rotina foram utilizadas tensões normais iniciais de 40, 65 e 110 kPa; sendo que a última corresponde a metodologia utilizada para os ensaios de cisalhamento dos demais tipos de solos em estudo.

As figuras 54 e 56 apresentam as curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) das metodologias 1 e 2, respectivamente. As figuras 55 e 57 apresentam as curvas de deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) correspondentes. Devido a quantidade limitada de blocos foram realizados apenas três ensaios para a metodologia 2.



As curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) das duas rotinas (Figuras 54 e 56), mostram a presença de picos pouco pronunciados, ou até mesmo inexistentes. Para ensaios com picos pouco pronunciados, foi assumido que o solo havia rompido quando a curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal atingisse o pico de resistência; enquanto que para os demais níveis de tensão admitiu-se que o solo havia rompido quando a curva tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) atingisse uma inclinação constante.

Com relação às curvas deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) dos ensaios realizados através da rotina 1 e 2 (Figuras 55 e 57), na primeira rotina (Figura 55) nota-se que o ensaio com tensão normal inicial de 40 kPa apresentou comportamento dilatante; enquanto que para o ensaio com tensão normal de 65 kPa houve uma ligeira contração, seguido de um aumento de volume (dilatância) pós ruptura.

Os demais ensaios com tensões normais iniciais de 110, 210 e 300 kPa apresentaram contração. A segunda rotina (Figura 57) apresentou um comportamento diferenciado ao da rotina 1, tendo em vista que para baixas tensões normais iniciais de 40 e 65 kPa houve uma contração seguida de um aumento de volume pós ruptura.

A figura 58, apresenta a envoltória de resistência obtida para as rotinas 1 e 2. Nota-se uma diferença considerável entre os pontos obtidos por meio da rotina 1 e 2. Esta diferença de metodologia será abordada no capítulo 6. É importante ressaltar que foram realizadas análises das areias dos dois blocos ensaiados, onde se verificou uma quantidade acentuada de concreções ferruginosas no bloco utilizado para a implementação da rotina 1.

O bloco utilizado para a implementação da rotina 2 apresentou uma quantidade relativamente baixa de concreções ferruginosas.

Tabela 26 - Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SR2 submetidos ao cisalhamento direto drenado.

% Pedregulho - 0 % Areia - 8,6 % Silte - 25,8 % Argila - 65,6 <b>SOLO RESIDUAL 2</b>						
Rotina	Amostra	(kN/m <sup>3</sup> )		w <sub>i</sub> (%)	S <sub>i</sub> (%)	e <sub>i</sub>
		γ <sub>t</sub>	γ <sub>d</sub>			
1	1	17,3	12,0	43,9	94,8	1,32
	2	17,1	11,8	44,5	93,3	1,29
	3	16,9	11,7	44,6	91,5	1,36
	4	17,1	11,7	46,3	95,3	1,38
	5	16,9	11,6	46,4	93,4	1,42
2	6	17,1	11,8	44,3	92,9	1,36
	7	16,8	11,6	44,9	90,4	1,41
	8	16,5	11,6	42,6	85,7	1,42

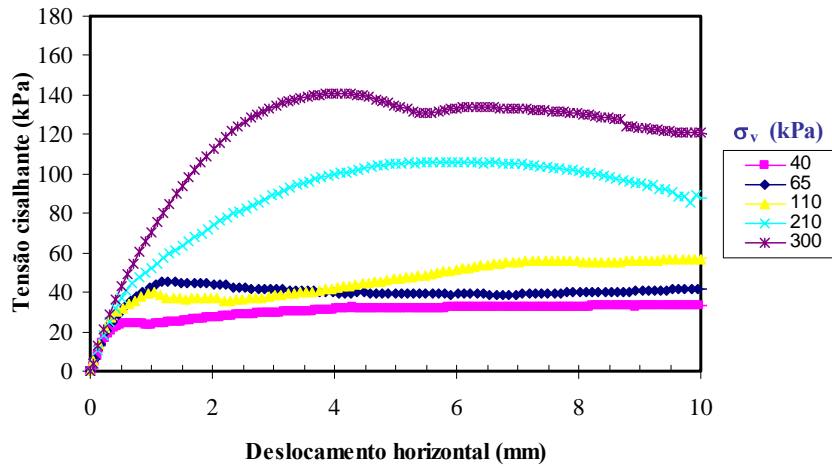


Figura 54 - Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ), para o solo residual 2 utilizando rotina 1.

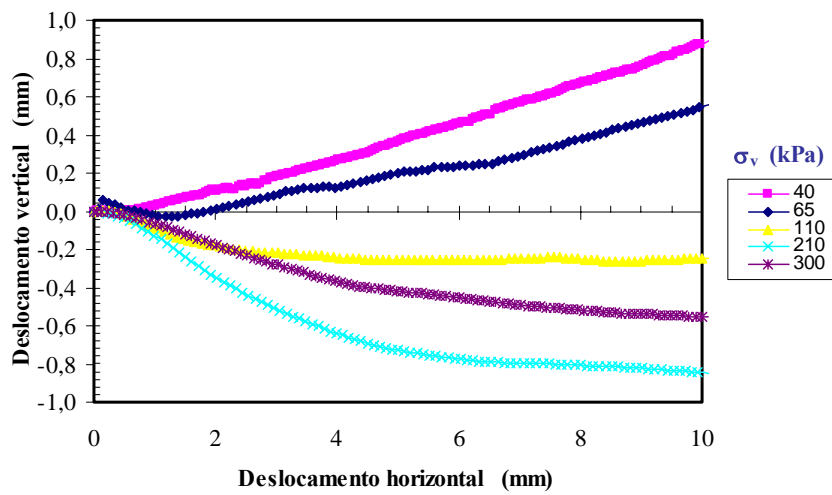


Figura 55 - Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ), para o solo residual 2 utilizando rotina 1.

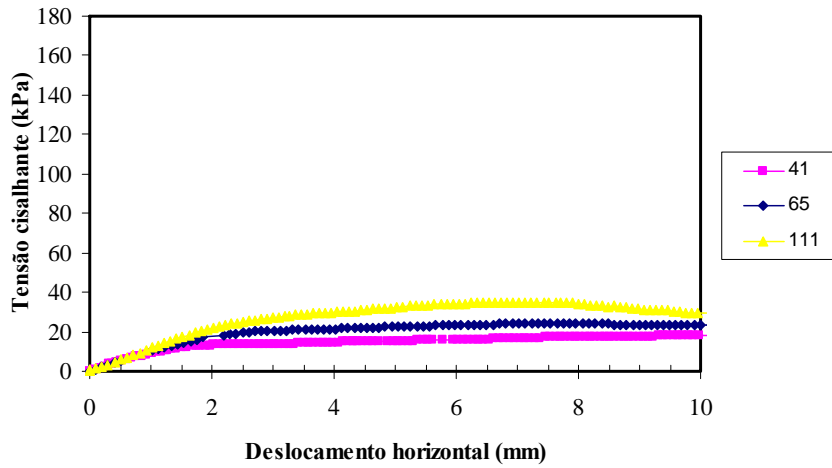


Figura 56 - Curvas de tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) para o solo residual 2 utilizando rotina 2.

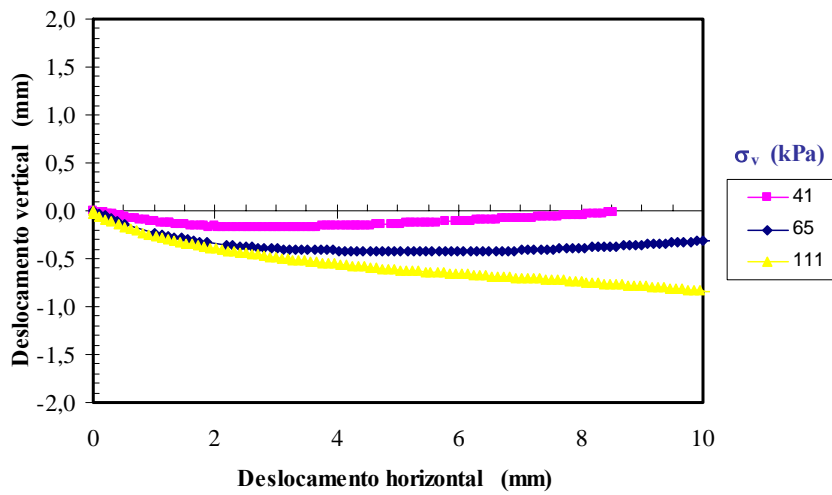


Figura 57 - Curvas de deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) versus deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) para o solo residual 2 utilizando rotina 2.

A tabela 27 apresenta as tensões normais e tensões cisalhantes efetivas de ruptura consideradas para determinação da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para o solo SR2.

Tabela 27 - Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SR2.

SR2		
Amostra	kpa	
	$\sigma_{\max}$	$\tau_{\max}$
1	41,1	23,8
2	65,7	45,3
3	113,6	39,7
4	221,2	106,1
5	312,7	140,7
6	41,9	13,8
7	70,0	24,3
8	119,3	35,0

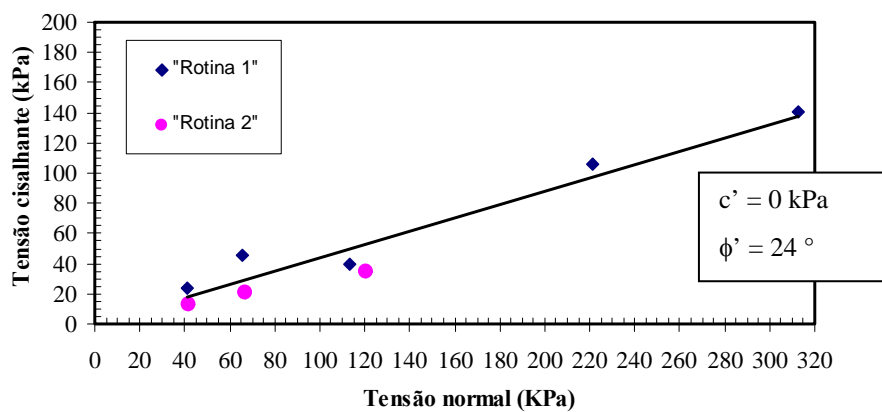


Figura 58 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual 2 utilizando rotina 1 e 2.

#### 5.8.4. Solo Residual 3

A tabela 28 apresenta os índices físicos iniciais dos corpos de prova de solo SR3 submetidos ao ensaio de cisalhamento direto drenado.

As figuras 59, 60 e 61, mostram respectivamente às curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ); deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) e a envoltória de Mohr-Coulomb, no gráfico tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus tensão normal ( $\sigma$ ) aplicada obtidas para o solo SR3 conforme procedimento descrito no capítulo anterior.

A curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal (Figura 59) mostram a inexistência de pico para todos os níveis de tensões normais iniciais aplicadas. Nota-se nas curvas, que a tensão cisalhante se estabiliza após ruptura para todos os ensaios. Para todos os ensaios foi assumido que o solo havia rompido quando a curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal atingisse inclinação constante ou nula.

Com relação às curvas de deslocamento horizontal versus deslocamento vertical (Figura 60); para o ensaio com tensão normal inicial de 40 kPa houve uma ligeira contração seguida de uma dilatância pós ruptura, enquanto que nos demais ensaios houve um comportamento contrativo; onde o ensaio com tensão normal inicial de 65 kPa apresentou estabilização volumétrica pós ruptura.

A tabela 29 apresenta as tensões normais e tensões cisalhantes efetivas consideradas de ruptura para determinação da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para o solo SR3.

Tabela 28 - Índices físicos iniciais dos Corpos de prova de solo SR3 submetidos ao cisalhamento direto drenado.

SOLO RESIDUAL 3					
% Pedregulho - 0					
% Areia - 12,1					
% Silte - 45,7					
% Argila - 42,2					
Amostra	(kN/m <sup>3</sup> )		w <sub>i</sub> (%)	S <sub>i</sub> (%)	e <sub>i</sub>
	γ <sub>t</sub>	γ <sub>d</sub>			
1	16,8	11,9	41,6	88,6	1,31
2	17,0	12,0	41,6	90,7	1,28
3	16,4	11,2	45,7	88,3	1,43
4	16,4	11,5	43,5	87,4	1,39
5	16,4	11,1	47,8	91,3	1,46

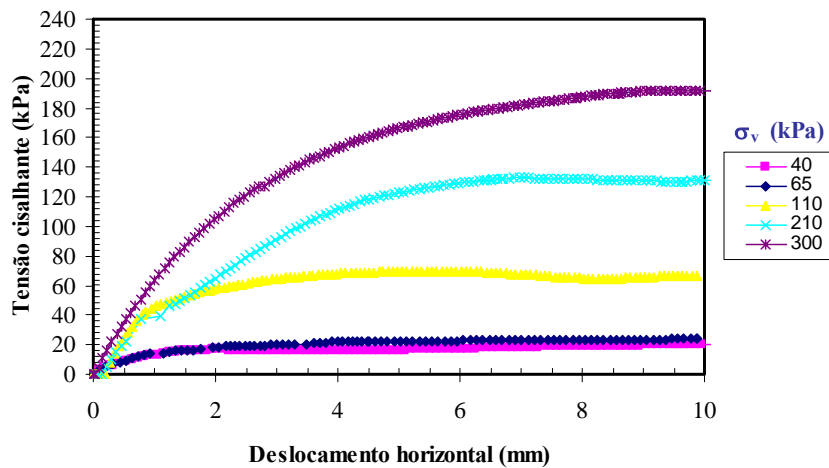


Figura 59 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual 3.

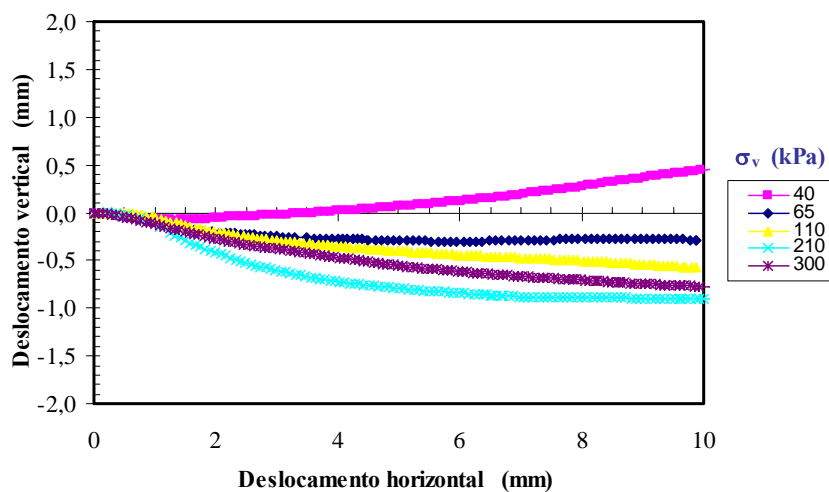


Figura 60 - Curvas de deslocamento horizontal versus deslocamento vertical, para o solo residual 3.

Tabela 29 - Tensões normais e tensões cisalhantes de ruptura observadas em ensaios no solo SR3.

SR3		
Amostra	kpa	
	$\sigma_{\max}$	$\tau_{\max}$
1	41,9	16,7
2	67,5	22,5
3	117,5	69,8
4	222,5	132,8
5	332,6	191,8

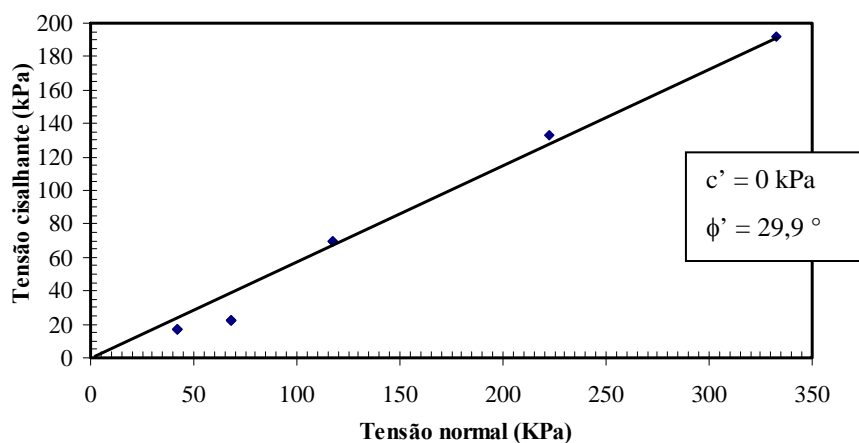


Figura 61 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual 3.

### 5.9. Ensaio Triaxial Drenado

Com o intuito de se verificar a influência das fraturas na resistência, foram realizados ensaios triaxiais drenados em amostras de solo residuais SR2 e SR3. Detalhes referentes ao procedimento de tais ensaios encontram-se no capítulo anterior.

A tabela 30 apresenta os índices físicos dos corpos de prova submetidos aos ensaios triaxiais drenado.



As figuras 62 e 63 apresentam os resultados dos ensaios obtidos através das curvas de tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) versus deformação axial ( $\epsilon_a$ ) com suas respectivas curvas de deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) versus deformação axial ( $\epsilon_a$ ).

As curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) versus deformação axial ( $\epsilon_a$ ) (Figura 62), apresentaram picos pronunciados, exceto a curva referente ao solo residual 3 (SR3) com pressão nominal igual a 50 kPa. Observa-se nas curvas de deformação volumétrica versus deformação axial um comportamento dilatante para os ensaios com pressões nominais de 50 e 100kPa. O ensaio com pressão nominal de 200 kpa houve um comportamento compressível instantâneo seguido de um comportamento dilatante.

Na tabela 31 encontram-se apresentados os valores das tensões desviadoras de pico,  $\sigma_d$ , obtidos para série de ensaios, bem como suas respectivas deformações axiais,  $\epsilon_a$ , e parâmetros de resistência obtidos.

Na figura 64 encontram-se traçada as trajetórias de tensão efetiva obtidas para os ensaios triaxiais saturados drenado ( $CD_{sat}$ ). As trajetórias de tensões foram plotadas usando o diagrama de Lambe, ou seja, com  $p' = (\sigma'_a + \sigma'_c)/2$  e  $q = (\sigma'_a - \sigma'_c)/2$ , onde  $\sigma$  é a tensão normal e os sub-índices a e c representam tensões axiais e radiais ou confinantes, respectivamente.

Tabela 30 – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais.

Solo	Amostra	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$S_i$ (%)	$e_i$
SR2	1	16,9	10,7	49,6	85,4	1,65
	2	15,0	10,0	50,7	77,8	1,85
	3	17,2	11,7	46,6	93,0	1,42
SR3	4	16,8	12,3	36,8	81,1	1,27

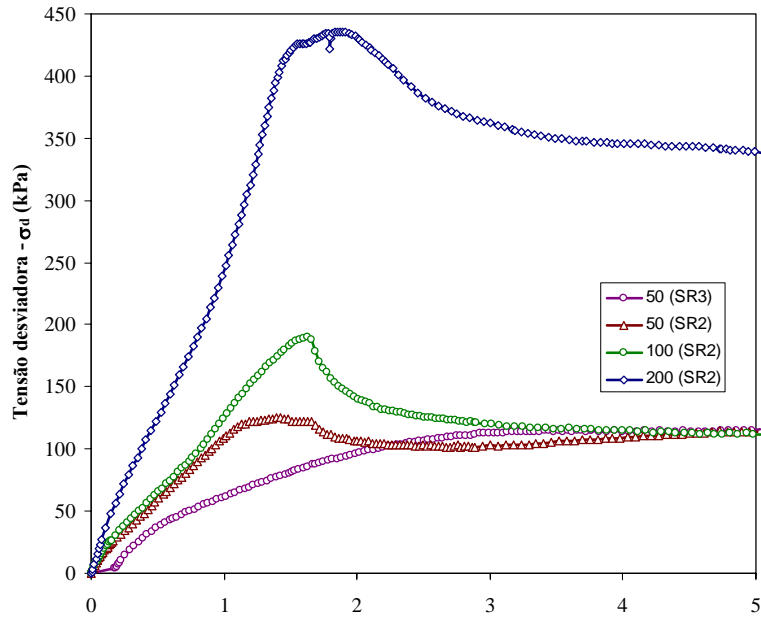


Figura 62 - Curvas de tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) versus deformação axial ( $\epsilon_a$ ) para os solos residuais SR3 e SR2.

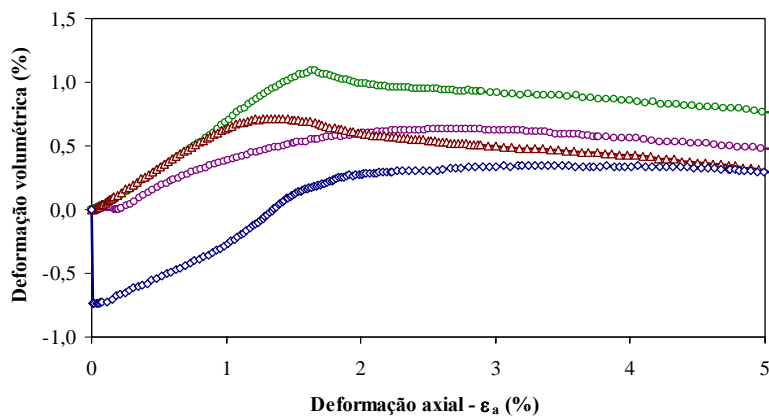


Figura 63 - Curvas deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) versus deformação axial ( $\epsilon_a$ ) para os solos residuais SR3 e SR2.

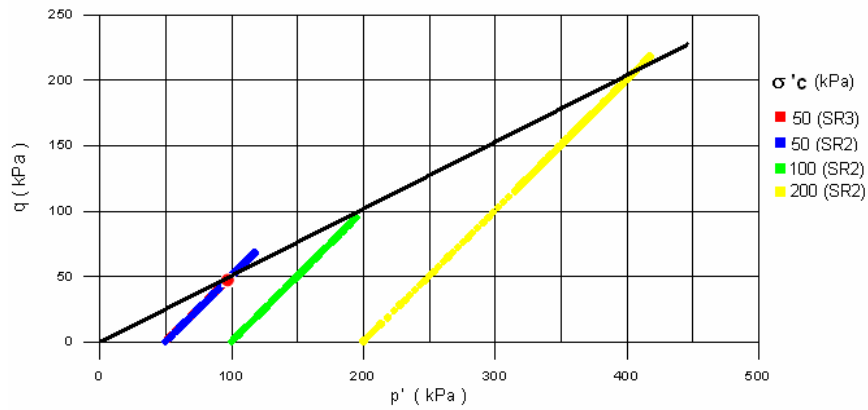


Figura 64 – Trajetória de tensões efetivas no diagrama q versus p'

Tabela 31 – Parâmetros de resistência dos ensaios triaxiais  $CD_{sat}$ .

Solo	Amostra	Tensão Efetiva (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\epsilon_a$ (%)	$a'$ (kPa)	$\alpha'$ (°)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
SR2	1	50	124,7	1,45	0	26,56	0	30
	2	100	189,6	1,63				
	3	200	435,2	1,87				
SR3	1	50	115,4	5,03				

## 6

# ANÁLISE CONJUNTA DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta uma discussão dos resultados obtidos para esse estudo. Inicialmente os solos em estudo serão qualificados mediante aos resultados obtidos quanto à caracterização, mineralogia, análises químicas e curva característica. A seguir, serão abordados, os resultados dos ensaios de expansão, erodibilidade, compressibilidade, resistência ao cisalhamento tentando correlacioná-los, bem como com os outros resultados.

### 6.1.

#### **Análise Conjunta dos Resultados dos Ensaios de Caracterização, Mineralogia e Análises Químicas.**

Verificou-se que o solo SC possuía granulometria bastante diferenciada dos demais solos em estudo mostrando-se tipicamente areno-argiloso. A presença de grãos de quartzo sub-arredondados e pequena quantidade de concreções ferruginosas foi observada através de análise das areias e de lâminas delgada do solo.

Através das lâminas delgadas de solo SC, por vezes, notava-se uma diferenciação quanto ao grau de cimentação do solo. Porém, em geral as lâminas se mostravam com graus de cimentação elevados, justificando os índices de vazios relativamente baixos, na faixa de 0,52 - 0,62.

Quanto aos limites de consistência, o solo coluvionar se mostrou de característica não plástica, a mesma pode ser justificada pelo fato do quartzo ser o mineral predominante encontrado na fração areia, além de tal solo possuir uma fração de finos (silte + argila) de apenas 22%.

Em análise da fração argila através de lâminas orientadas, por meio de difração raio X, pôde-se constatar que o argilomineral predominante foi a caulinita.

Através de análises químicas seletivas, por meio de complexo sortivo, notou-se um valor de capacidade de troca catiônica igual a 1,3 cmol/kg, o que está de acordo com a composição mineralógica da fração argila.

Os solos SR1 e SR2 apresentaram granulometria similar, mostrando-se como uma argila siltosa com fração de finos (silte + argila) de 83,2 e 96,4, respectivamente. O solo SR1 teve uma percentagem de fração areia mais elevada, o que pode ser explicado pela quantidade de concreções ferruginosas em tal solo.

Através de análise qualitativa das areias, observou-se grande quantidade de óxidos/hidróxidos de ferro.

Foi observado através de lâminas delgadas de solo, que o SR1 apresentava-se em contacto com solo coluvionar. Entretanto, como o mesmo em grande parte, era constituído de solo proveniente de alteração de basalto vesículo-amigdaloidal, este foi classificado como sendo residual.

O SR1 apresentou índice de vazios diferenciado quando comparados com os encontrados nos demais solos residuais estudados. É importante ressaltar que os corpos de prova apresentavam-se com algumas vesículas semipreenchidas além de fraturas, e mesmo assim este apresentou índice de vazios relativamente baixos na faixa de 0,72 a 1,08. Acredita-se que tal redução esteja relacionado com o estado de laterização em que este se encontrava. Estas características foram observadas, tanto em análises químicas, como no preparo de corpos de prova em amostras indeformadas.

Em análises químicas percebeu-se um aumento significativo de óxido de ferro e alumínio no solo SR1 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 31,13 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 21,38$ ), quando comparado com os valores da rocha mãe alterada ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15,65 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10,13 \%$ ), tendo ocorrido uma lixiviação quase que total das bases e parte da sílica. Quanto ao procedimento de moldagem dos corpos de prova do SR1, notou-se uma dificuldade na retirada dos corpos de prova dos anéis moldadores. Acredita-se que a forte cimentação, resultante do processo de laterização do solo, foi responsável pela expansão lateral dos solos nos anéis moldadores. A forte cimentação causada pelo processo laterização no solo SR1 foi observada em outros resultados que serão abordados no decorrer dessa discussão.

Em análise da fração argila através de lâminas orientadas, por meio de difração raios-X, pôde-se constatar que o argilomineral predominante foi a caulinita.

Através de análises químicas seletivas, por meio de complexo sortivo, notou-se um valor de capacidade de troca catiônica de 4,7 cmol/kg, o que está de acordo com a composição mineralógica da fração argila. Estes resultados estão compatíveis com o índice de atividade de Skempton, cujo valor foi de 0,43, considerado de baixa atividade.

Os limites de consistência do solo SR1 se mostraram condizentes com a faixa encontrada por Tanaka (1976) para solos desenvolvidos no mesmo tipo de rocha.

O solo SR2 apesar de apresentar granulometria similar a do SR1, apresentou-se com índice de vazios semelhante aos encontrados no SR3, em que os índices de vazios nos corpos de prova do solo SR2 variaram de 1,29 a 1,85, e 1,14 a 1,43 para os corpos de prova de solo SR3.

É importante ressaltar que o limite superior do índice de vazios obtido para o solo SR2 foi obtido através de corpo de prova utilizado para ensaio triaxial saturado drenado. Conforme evidenciado na capítulo 4, tal corpo de prova foi obtido de maneira diferenciada aos demais utilizado para outros fins. Portanto acredita-se que o índice de vazio de 1,85 esteja relacionado com o compartilhamento de fraturas.

Através de lâminas delgadas de solo notou-se que apesar do solo ainda apresentar a estrutura similar a da rocha mãe, os minerais essenciais como os feldspatos calco-sódicos e piroxênios encontravam-se argilizados e / ou oxidados.

Em análise da fração argila através de lâminas orientadas por meio de difração raios X, pôde-se constatar a presença do argilomineral caulinita. No entanto, através da análise de material cinza-esverdeado proveniente de outro bloco e do mesmo poço de inspeção e coleta, pôde-se constatar que a presença do argilomineral esmectita também era observada. A presença de veios esverdeados era mais freqüente que a sua ausência, pois em sete blocos de 15 x 15 x 15 cm coletados em campo, cinco apresentaram tal material. É oportuno ressaltar que em análise qualitativa das frações areias de duas amostras do solo SR2 verificou-se uma quantidade diferenciada de óxidos/hidróxidos de ferro.

Apesar das diferenças mineralógicas de blocos advindos do mesmo poço; foi verificada uma similaridade quanto aos índices físicos apresentados em corpos de prova moldados de blocos do solo SR2.

Quanto aos limites de consistência, estes se apresentaram condizentes com os resultados obtidos por Rigo (2000) cujos solos apresentavam fração de finos (silte + argila) variando de 32 a 78 %, além de apresentarem esmectita e caulinita.

Nas análises químicas seletivas, por meio de complexo sortivo, notou-se um valor de capacidade de troca catiônica igual a 53,1 cmol/kg, o que está de acordo com a composição mineralógica da fração argila. No entanto não houve compatibilidade da composição mineralógica da fração argila com o índice de atividade de Skempton ( $IA = 0,45$ ).

Os valores da Soma de bases, Capacidade de troca catiônica através da análise química por complexo sortivo e  $K_i$ , relação molecular entre a sílica e o óxido de alumínio, obtido através do ataque sulfúrico, indicam que o solo SR2 é menos intemperizado que o solo SR1.

O SR3 se mostrou como silte argiloso. Em análise das areias do SR3, verificou-se a presença de minerais primários constituintes da rocha mãe. Essa característica também foi observada em lâminas delgadas do solo, que mostravam os feldspatos calco-sódicos e piroxênios em processo de alteração.

Em análise da fração argila através de lâminas orientadas por meio de difração raios X, pôde-se constatar a presença dos argilominerais esmectita e caulinita. Em lâminas orientadas da fração silte também foi constatado a presença de esmectita e caulinita, evidenciando assim que a fração silte do solo também é ativa.

Através de análises químicas seletivas, por meio de complexo sortivo, notou-se um valor de capacidade de troca catiônica igual a 75,9 cmol/kg, o que está compatível com a composição mineralógica da fração argila. No entanto não houve compatibilidade da composição mineralógica da fração argila com o índice de atividade de Skempton ( $IA = 0,63$ ), considerando-o de baixa atividade.

Os valores da Soma de bases, Capacidade de troca catiônica através da análise química por complexo sortivo e  $K_i$ , relação molecular entre a sílica e o óxido de alumínio, obtidos através do ataque sulfúrico, indicam que o solo SR3 é o menos alterado do perfil.

Em virtude dos solos SR2 e SR3 não se adequarem ao gráfico de atividade de Skempton utilizou-se o gráfico de Skempton modificado por Van Der Merwe (1975) apud Dias Junior (1983), que propôs modificações nos contatos de atividade 0,5 com as regiões de expansões médias, alta e muito alta. Para esta situação, os solos SR1, e SR2 apresentam-se com grau baixo de potencialidade de expansão, enquanto que o solo SR3 apresentou-se com sendo de potencialidade alta.

Quanto aos limites de consistência do solo SR3, estes se apresentaram condizentes com os resultados obtidos por Rigo (2000) cujos solos apresentavam fração de finos (silte + argila) variando de 32 a 78 %, além de apresentarem esmectita e caulinita.

Para os solos SR1, SR2 e SR3 vê-se um decréscimo da densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) com o aumento da profundidade. Esta tendência pode ser atribuída a percentagem de óxidos/ hidróxidos de ferro mais elevadas nos solos quando mais próximos a superfície. Tal característica pode ser observada na tabela 32, que mostra as respectivas cotas dos solos, bem como os teores de óxido de ferro obtidos através de análise química semiquantitativa e densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) dos referidos solos.

Tabela 32 - Teores de Óxidos de Ferro e densidade dos grãos dos solos em estudo.

Solo	Cota (m)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	G <sub>s</sub>
SR1	183	21,38	2,91
SR2	178	15,61	2,85
SR3	172	14,30	2,81

Atribui-se que a diferença nos valores de umidade higroscópica, observada para os solos residuais, em que o SR1, com  $w_h = 1,6\%$ , apresentou um teor consideravelmente menor que os dos solos residuais SR2 ( $w_h = 12,4\%$ ) e SR3 ( $w_h = 15,6\%$ ) à composição mineralógica da fração argila. Ressaltando-se que o argilomineral predominante no solo SR1 foi a caulinita, enquanto que para os demais solos residuais foi a esmectita e caulinita.



Ao contrário de Brito (1981) e Polivanov (1998), que estudaram perfis em solos de rocha ácida, em que obtiveram correlações entre a fração argila e os limites de consistência. Para esse estudo não observou-se tal correlação, atribuindo tal característica a aspectos referentes a mineralogia.

Comparando os limites de consistência obtidos através de amostras passantes na peneira #40, com os obtidos através de amostras passantes na peneira #200, observou-se uma diferença pequena nesses resultados para o solo SR3, seguido de uma diferença maior no solo SR1, e uma diferença bem maior no solo SR2. Acredita-se que tais resultados estejam também relacionados com a mineralogia da fração argila e areia dos solos em estudo.

Para as curvas características dos solos residuais de basalto, principalmente as dos solos SR1 e SR2, às curvas de umidade gravimétrica versus sucção mátrica não são apropriadas, tendo em vista que os corpos de prova desses solos sofreram perda de volume durante a secagem.

Comparando às curvas características dos solos SR1, SR2 e SR3 da figura 65 (umidade volumétrica versus sucção), vê-se uma influência da mineralogia. Haja vista que o solo SR3 de textura mais grosseira apresentou sucções superiores, seguidos do SR2 e do solo SR1.

Para os solos SR1, SR2 e SR3, sugere-se que o valor de entrada de ar ( $\Psi_{ar}$ ) seja de cerca de 10 kPa e para o solo SC de 2kPa.

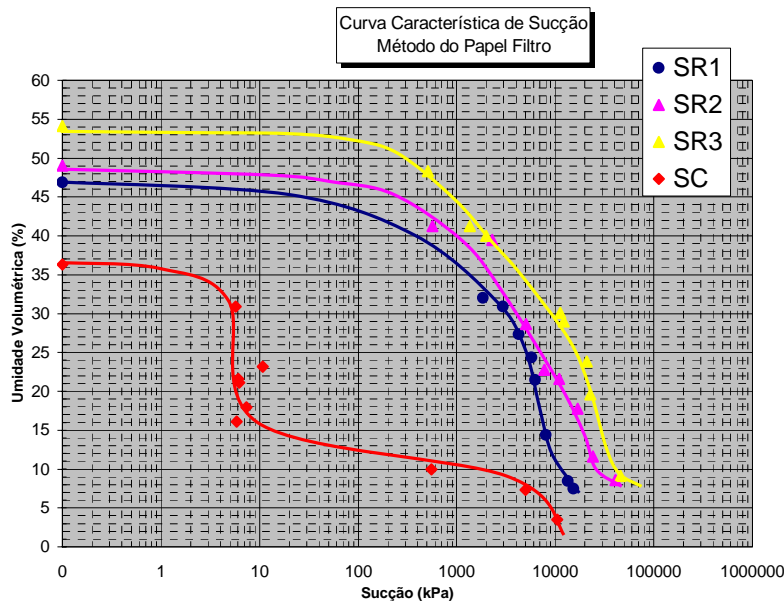


Figura 65 - Curvas características de Umidade Volumétrica versus Sucção Mátrica para os solos em estudo.

## 6.2. Ensaio de Desagregabilidade

Baseando-se nos ensaio de desagregabilidade, o solo coluvionar se mostrou com o grau de erodibilidade mais elevado, seguido do SR3, SR2 e SR1.

Os SR3 e SR2, apresentaram-se com folhações horizontais no decorrer do ensaio.

Maccarini (1994) em solos residuais de gnaiss de Santa Catarina observou um processo de escamação, quando submetia corpos de prova indeformados a submersão em água. O autor verificou que esse processo de “escamação” era progressivo, avançado do exterior para o interior das amostras, sugerindo que tais características eram devidas a mecanismos de expansão.

Para o ensaio de desagregabilidade contido nesse estudo foi observado durante o ensaio uma perda de coesão nas amostras de SR3 e SR2, o que poderia ser explicado pela presença de argilominerais expansivos nesses solos. Essa característica não foi notada no corpo de prova do SR1, que se manteve praticamente intacto.

Deve-se acrescentar que esse solo SR1 se apresentou com uma concentração de óxi-hidroxidos de ferro elevada, o que deve ter sido responsável pela forte cimentação apresentada pelo solo.

O corpo de prova do SC se mostrou quase que totalmente desagregado ao término do ensaio.

### 6.3. Ensaio Edométrico

A tabela 33 apresenta os valores de índice de vazios inicial ( $e_i$ ), de tensão de pré-adensamento virtual ( $\sigma'_{oc}$ ) com seus respectivos índices de vazio ( $e_{oc}$ ) e os índices de compressão ( $c_c$ ) e de expansão ( $c_e$ ) para os solos SC, SR1, SR2 e SR3.

Nota-se uma similaridade quanto aos índices de compressibilidade dos solos SR2 e SR3, que possuíam também índice de vazios semelhantes. Observa-se que os dois solos também apresentaram índice de expansão similar, sendo que o do solo SR3 apresentou-se um pouco mais elevado. Acredita-se que a diferença no índice de expansibilidade dos SR2 e SR3 com o SR1, esteja relacionada com o grau de cimentação e com a mineralogia das argilas.

Nos gráficos de coeficiente de variação volumétrica versus logaritmo da tensão efetiva (Figura 66) observou-se uma diferença acentuada entre as curvas do solo SR2 e SR3 até a tensão de pré-adensamento virtual do SR2 (290 kPa). Sugere-se que tal diferença esteja relacionada com a presença de concreções ferruginosas no solo SR2, as quais impediriam uma possível quebra na estrutura deste solo. Se contrapondo a isso, o SR3 que se mostrou o menos intemperizado apresentou uma quebra em sua estrutura ocasionada pela presença de esmectita em toda sua massa, aliada a fraca cimentação deste solo.

Além disso, analisando os resultados da tabela 33 verificou-se uma diferença sensível quanto aos valores de tensão de pré-adensamento virtual dos solos SR2 e SR3; com o SR3 apresentando um  $\sigma'_{oc} = 175$  kPa e o SR2 com  $\sigma'_{oc} = 290$  kPa. O que novamente sugeriria que tais resultados estariam relacionados com a possível quebra de estrutura ocorrida no SR3.

Tabela 33 - Tensões de Pré-Adensamento virtual e parâmetros Compressibilidade dos solos estudados

Solo	$e_i$	$\sigma'_{oc}$ (kPa)	$e_{oc}$	$c_c$	$c_e$
SC	0,62	90,0	0,58	0,166	0,0161
SR1	0,95	108,9	0,90	0,0086	0,0024
SR2	1,35	290,0	1,20	0,443	0,0939
SR3	1,25	175,0	0,92	0,433	0,0963

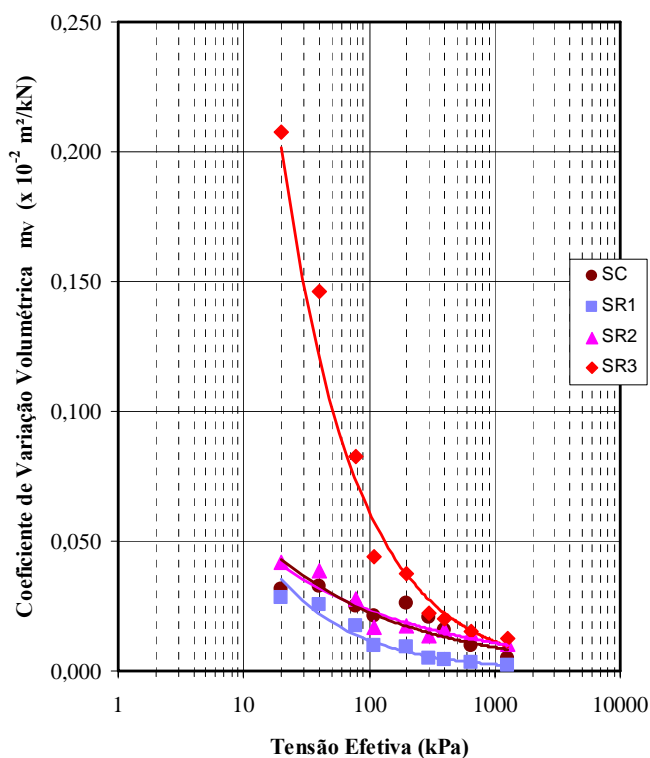


Figura 66 – Gráficos de coeficiente de variação Volumétrica ( $m_v$ ) versus Tensão efetiva para os solos SC, SR1, SR2 e SR3 obtidos através dos ensaios de adensamento edométricos.

Outra tentativa de explicar essa quebra de estrutura durante o ensaio de adensamento seria através da normalização das curvas de adensamento. A Figura 67 mostra as curvas de adensamento normalizadas,  $\Delta e/(e_o+1)$  versus  $\log \sigma'$ , obtidas para os ensaios edométricos.

Comparando as curvas do SR3 e SR2, notou-se que a do SR3 apresentou nos primeiros estágios de carga uma conformação diferenciada quando comparada com a do SR2. Diferindo-se da curva do solo SR2, a diminuição de  $\Delta e/(e_0+1)$  apresentada nos primeiros estágios de carga para o SR3 apresentou-se de maneira quase que linear, indicando praticamente uma ausência de curvatura. Sugerindo então uma possível quebra de cimentação.

É importante ressaltar que não foi avaliado o grau de cimentação dos solos em estudo, ou seja, mais estudos devem ser realizados a fim de comprovar tais suposições.

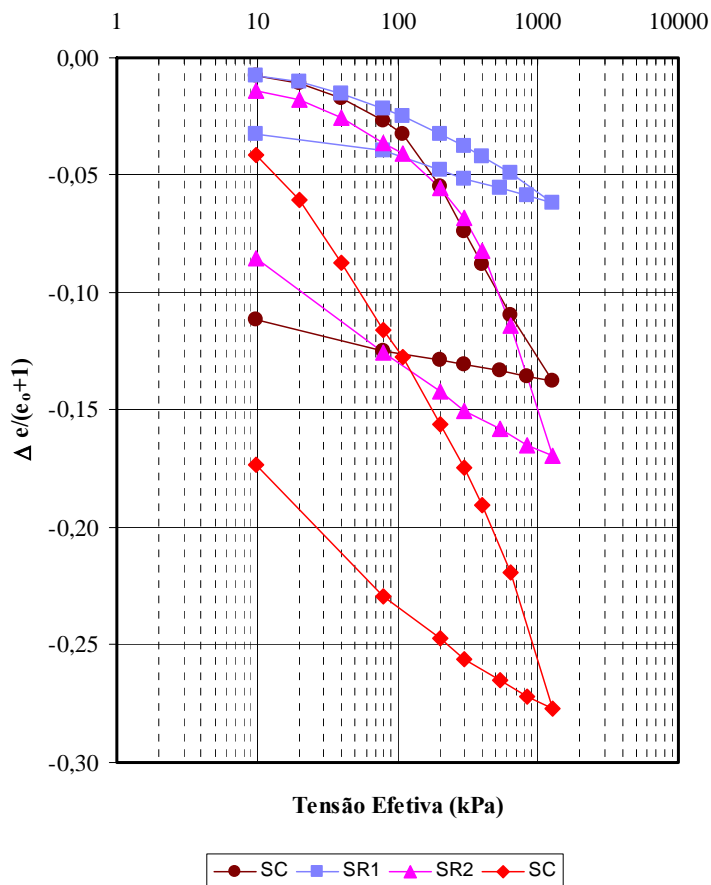


Figura 67 – Curvas  $\Delta e/(e_0+1)$  versus  $\log(\sigma')$ , obtidas através do ensaio edométrico

Apesar do SR1 apresentar índice de vazios relativamente maiores que o solo SC, este solo apresentou-se com índices de compressibilidade bem menor quando comparado com o solo SC e demais solos em estudo. Atribui-se tal característica ao elevado grau de laterização em que este se encontrava.

A figura 68 apresenta os gráficos de logaritmo de coeficiente de permeabilidade versus logaritmo de tensão efetiva obtidos para os solos em estudos, através dos ensaios de adensamento. Observa-se que as curvas dos solos residuais apresentam-se paralelas enquanto que a do solo coluvionar intercepta a curva do solo residual 2. Observa-se que os coeficientes de permeabilidades dos solos residuais, estão de acordo com a granulometria e índice de vazios observados nesses solos, em que  $k(SR3) > k(SR2) > k(SR1)$ .

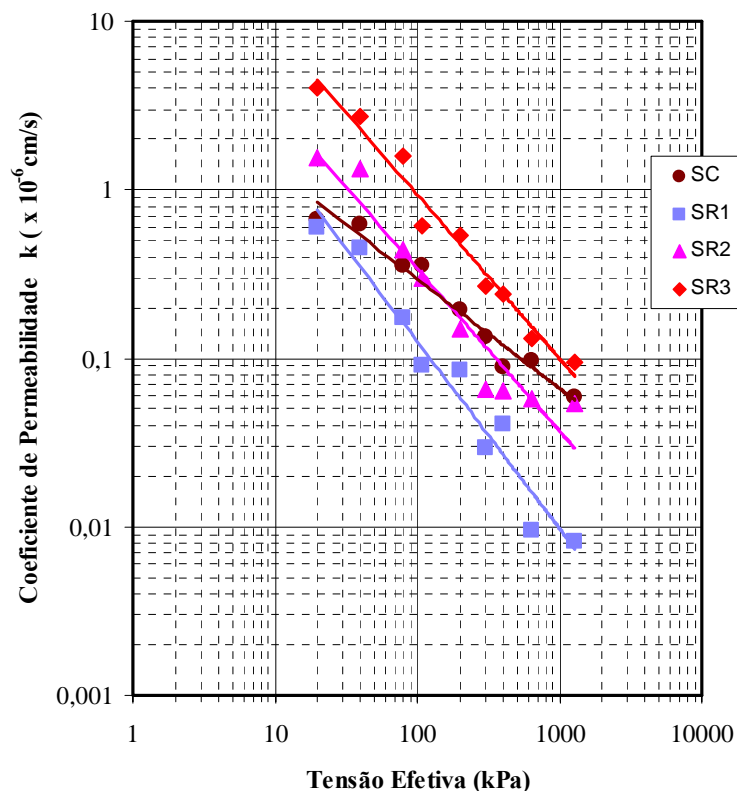


Figura 68 – Gráficos de log  $k$  versus log  $\sigma'$ , obtidas através dos ensaios edométricos.

#### **6.4. Avaliação de Expansibilidade**

Através de inserção de etilenoglicol em torrões dos solos residuais em estudo, notou-se que ocorreu uma expansão para todos os torrões de solo residual 3, enquanto que para os do solo residual 2 ocorreu apenas em alguns torrões. Para os torrões de solo residual 1 não foi verificada nenhuma expansão.

Para o ensaio de expansão axial com confinamento lateral e sem carregamento axial, observou-se uma expansão de cerca de 6,2% para o corpo de prova do SR3 e cerca de 1,5% para os solos SR1 e SR2. Observou-se que a submersão das amostras por um período de 24 horas era suficiente para a expansão completa das amostras. Vale ressaltar que as amostras encontravam-se com graus de saturação iniciais elevados, próximo de 90%.

Baseando-se nos resultados de mineralogia das argilas e na avaliação de expansibilidade, acredita-se que o solo SR2 tenha uma quantidade de esmectita menor que o SR3. Sugerindo que o argilomineral esmectita encontrado no solo SR2 seja encontra em pontos localizados nos blocos na forma de veios e / ou vesículas, enquanto que no SR3 tal argilomineral encontra-se distribuída por toda massa de solo.

#### **6.5. Ensaio de Resistência**

Conforme mencionado no capítulo 4 os corpos de prova submetidos a ensaios de cisalhamento direto drenado foram ensaiados segundo duas rotinas.

Na primeira rotina, os corpos de prova eram instalados na caixa bipartida, a tensão normal era aplicada e posteriormente o interior da caixa era inundado enquanto que na segunda rotina os corpos de prova passaram então a ser submerso em água, e após 24 horas procedia-se à aplicação da pressão de adensamento durante 24 horas. É importante ressaltar que apenas os corpos de prova do solo SR2 foram submetidos às duas rotinas; para os demais solos utilizou-se apenas a rotina 2.

A figura 69 apresenta as envoltórias de Mohr Coulomb, obtidas através da rotina 1 e 2.

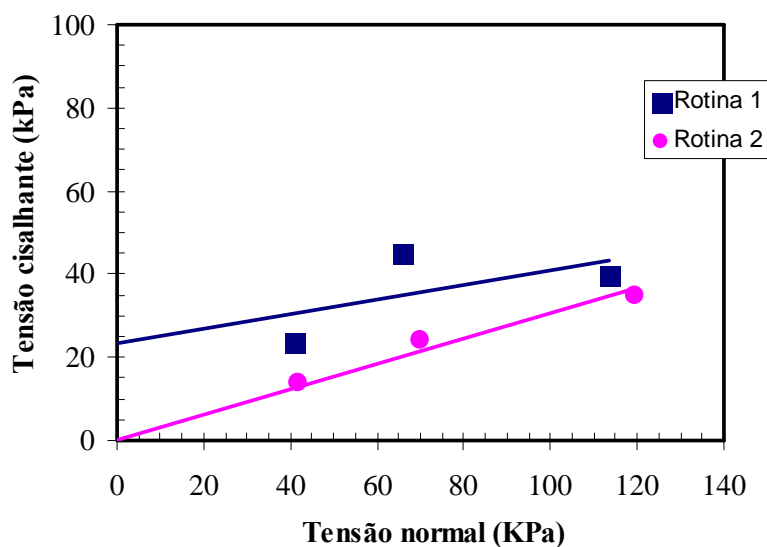


Figura 69 – Envoltórias de resistência de pico através das metodologia 1 e 2 obtidas para o solo SR2.

Acredita-se que a diferença de metodologia tenha influenciado os resultados. Tendo em vista que os corpos de prova quando submersos em água durante 24 h sem carregamento axial (rotina 2) possam ter sofrido uma quebra na sua estrutura, tornando o intercepto coesivo nulo.

A figura 70 mostra as curvas de adensamento normalizadas,  $\Delta e/(e_0+1)$  versus  $\log \sigma'$ , obtidas para os ensaios edométricos para os solos SR3 e SR2. Em tal figura foram também plotados os resultados de adensamento obtidos na metodologia 1 e 2.

Observa-se que os resultados obtidos através da metodologia 1 tendem a acompanhar a curva normalizada de adensamento do solo SR2. Porém os resultados através da metodologia 2 se localizaram abaixo da curva e com uma disposição similar ao observado na curva do solo SR3, o que sugeriria que de fato houve uma quebra de cimentação, aumentando assim a compressibilidade desse solo.



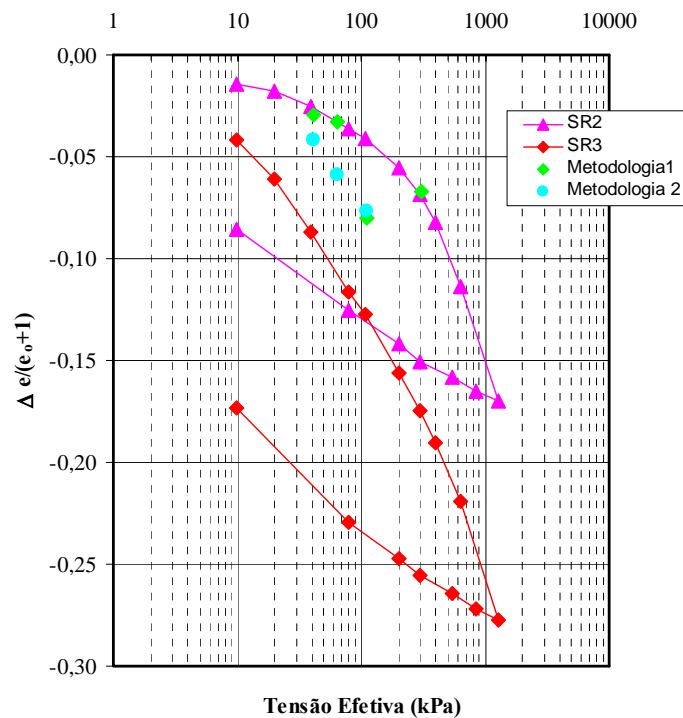


Figura 70 - Curvas  $\Delta e/(e_0+1)$  versus  $\log(\sigma')$ , obtidas através do ensaio edométrico para os solos SR3 e SR2, além de resultados de adensamento obtidos nos ensaios de cisalhamento direto através da metodologia 1 e 2.

Foi observado em ensaios de cisalhamento direto realizados nos solos SR2 (Figura 72) e SR3 (Figura 73) um aumento de resistência abrupto a partir de uma determinada tensão normal efetiva. Para os resultados obtidos no SR2 tal aumento se concentra na faixa de 119,3 a 221,2 kPa, enquanto que para o SR3 na faixa de 69,8 a 132,8 kPa. Acredita-se que esse aumento abrupto de resistência cisalhante esteja relacionado com o fechamento de fraturas existentes nos corpos de prova. Comparando os resultados obtidos para o solo SR2 e SR3, sugere-se que o fechamento das fraturas estaria relacionado com a tensão de pré-adensamento virtual (Tabela 34). É importante ressaltar que essa tendência observada nos solos SR2 e SR3 não foi observada no solo SR1 (figura 71).

Apesar dos ensaios triaxiais drenados terem sido executados em três amostras de solo SR2 e uma amostra de SR3, os resultados obtidos para esse ensaio encontram-se mais coerentes com os obtidos nos ensaios de cisalhamento direto de amostras do solo SR3.

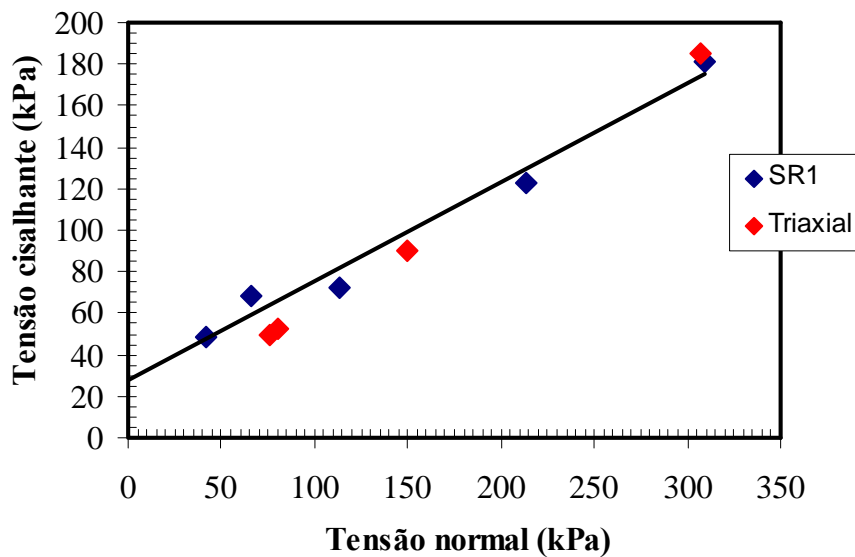


Figura 71 - Gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal com os resultados de ensaio de cisalhamento direto (CD) do SR1, e resultados obtidos nos ensaios triaxiais.

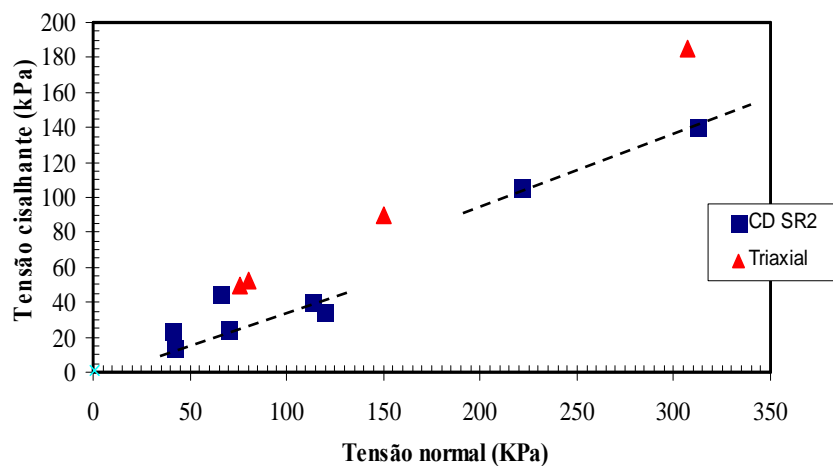


Figura 72 - Gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal com os resultados de ensaio de cisalhamento direto (CD) do SR2 e resultados obtidos nos ensaios triaxiais.

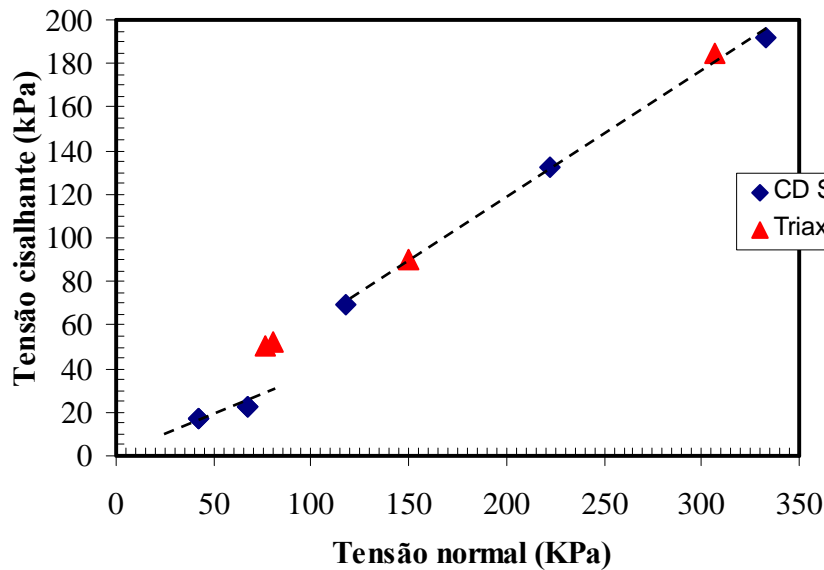


Figura 73 – Gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal com os resultados de ensaio de cisalhamento direto (CD) do SR3, e resultados obtidos nos ensaios triaxiais.

Tabela 34 – Tabela com faixa tensão de fechamento de fraturas e tensão virtual de pré-adensamento para os solos SR2 e SR3.

Solos	Faixa do Fechamento Fraturas (kPa)	$\sigma'_{oc}$ (kPa)
SR2	119,3 a 221,2	290
SR3	69,8 a 132,8	175

Baseando-se nesses resultados, acredita-se que para os solos SR2 e SR3 com tensões normais efetivas abaixo de 119 e 69,8 kPa respectivamente, a resistência ao cisalhamento para os solos SR2 e SR3 estariam relacionadas com as fraturas. A partir da tensão normal efetiva de 119 e 69,8 kPa à resistência ao cisalhamento estaria relacionada com a massa do solo. Detalhes como granulometria e mineralogia teriam influência nesses resultados.

A figura 74 apresenta a envoltória de tensão cisalhante versus tensão normal efetiva para os solo SR3 e SR2 através da metodologia 2 para tensões normais efetivas abaixo de 119 e 69,8 kPa, respectivamente.

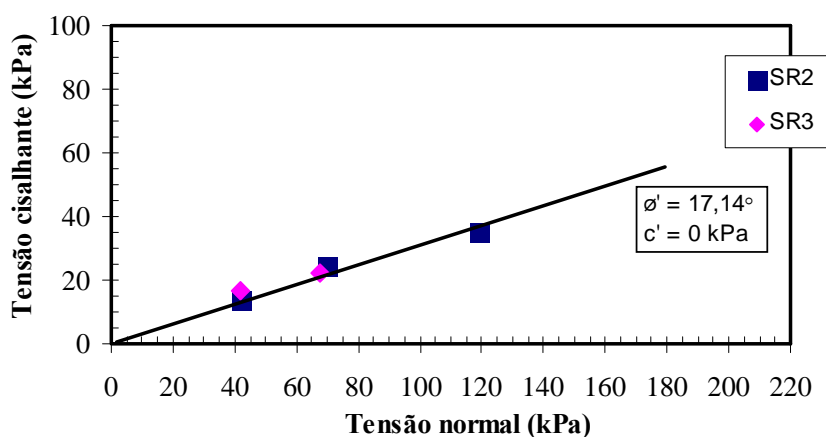


Figura 74 – Envoltória de resistência para os solos SR2 e SR3 influenciada pelas fraturas.

Conforme evidenciado ao longo dessa discussão, acredita-se que para os solos SR2 e SR3 existiriam duas envoltórias para cada solo. A primeira seria influenciada pelas fraturas, possivelmente pela abertura destas; e a outra estaria relacionada com a massa do solo. Tendo em vista que os resultados do solo residual 3 influenciados pelas fraturas coincidiram com os do solo SR2; fez-se apenas uma envoltória de resistência para os dois solos. Acredita-se que tal semelhança deva-se a similaridade das fraturas encontradas no solo SR2 e SR3.

A figura 75 apresenta as envoltórias do solo SC, SR1, SR2 relacionado com a massa do solo, SR3 relacionada com a massa do solo, de SR2 e SR3 relacionado com as fraturas e a obtida através de ensaios triaxiais drenados para o solo SR2 e SR3. Os parâmetros de resistência obtidos para as envoltórias são apresentados na tabela 35.

Analisando as envoltórias de resistência dos solos SR1, SR2 e SR3 relacionados com a massa do solo, observou-se que os graus de saturação iniciais das amostras ensaiadas encontravam-se elevados. Apesar disso, supõe-se que a metodologia 2 utilizada tenha quebrado a estrutura dos solos SR2 e SR3. Tal comportamento não foi observado no SR1 que apresentou intercepto coesivo de 27,8 kPa, que poderia ser justificado pelo alto grau de laterização que este se encontrava, conforme evidenciado nos resultados mineralógicos e químicos.

Conforme observado não houve uma variação considerável no ângulo de atrito entre os solos residuais SR1 e SR2 (diferença  $< 0,8^\circ$ ).

Embora os solos residuais SR1 e SR2 apresentassem índices de vazios consideravelmente distintos; as granulometrias dos mesmos quanto à fração argila (FA) se mostrou bastante similar; com o solo residual 1 (SR1) apresentando uma FA igual a 61,7% e o solo residual 2 (SR2) com uma FA igual a 65,6%. O solo residual 3 (SR3) apresentou ângulo de atrito interno maior que os demais solos residuais (diferença  $> 5,9^\circ$ ). Apesar de tal solo apresentar índices de vazios similares aos do solo residual 2 (SR2); o mesmo apresentou uma granulometria distinta com fração argila (FA) igual a 42,2%, se mostrando um solo tipicamente siltoso. Baseando-se em tais considerações, sugere-se que o ângulo de atrito teria boa correlação com a fração argila, não havendo correlação com o índice de vazios inicial.

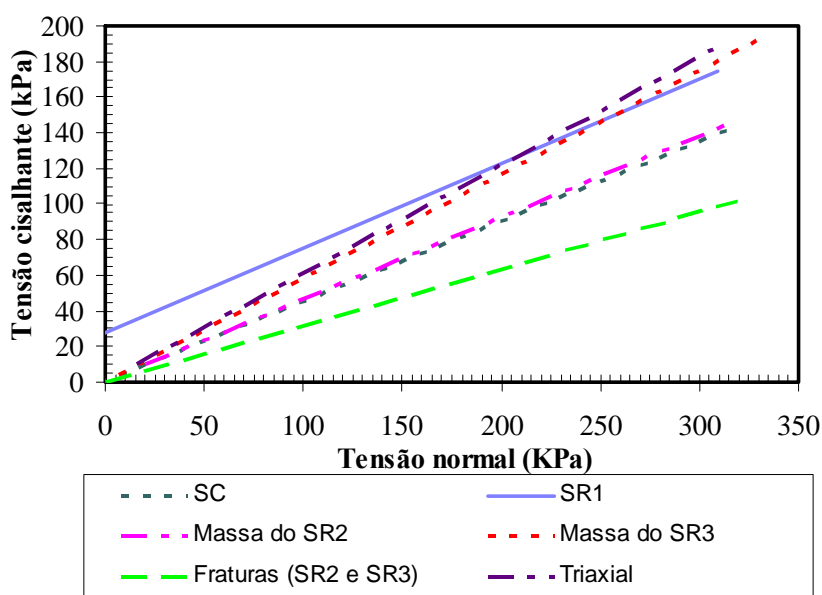


Figura 75 – Envoltórias de resistências para os solos em estudo.

Tabela 35 – Parâmetros de resistência para os solos em estudo.

Solo / Ensaio	Metodologia	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
SC / CD	interpolação	0	24,2
SR1 / CD	Interpolação	27,8	25,5
SR2 / CD	Fraturas	0	17,1
	Massa do solo	0	24,7
SR3 / CD	Fraturas	0	17,1
	Massa do solo	0	30,2
SR3 e SR2 / Triaxial	Interpolação	0	31,2

Baseando-se nos resultados obtidos no decorrer dessa dissertação verificou-se que estudos correlacionando características físicas, químicas e mineralógicas com parâmetros mecânicos associados às observações de campo são de grande valia em perfis de rocha básica.

Em trabalhos de campo referentes à seleção dos locais para coleta de amostras em perfis de solos desenvolvidos em rochas básicas não se deve considerar apenas às características morfológicas dos solos, como cor e características herdadas da rocha mãe. Devendo-se considerar também às características químicas e mineralógicas dos solos. Isto porque nas rochas básicas, em ambientes tropicais, os minerais primários se decompõem rapidamente, não permitindo uma diferenciação nítida entre as camadas que compõem o solo residual jovem. Devendo-se acrescentar ainda a complexidade dos derrames basálticos. Portanto a escolha de locais para coleta de amostras deve ser feita após se ter uma visão geral da área.

Dentro dos resultados referentes à caracterização química e mineralógica devem ser ressaltados os dados referentes ao complexo sortivo e análise mineralógica das frações dos solos, importantes na diferenciação do grau de intemperismo que compõe o perfil do solo.

Os valores de  $K_i$  (relação molecular sílica e alumina) e  $S$  (soma de bases) indicam um decréscimo do grau de intemperismo com a profundidade, que são perfeitamente compatíveis com as composições mineralógicas nas respectivas frações argilas. No caso de perfis de rochas básicas não se devem utilizar os valores de  $\beta$  (índice de lixiviação), uma vez que os valores de potássio e sódio são insignificantes nos solos, em virtude de seus teores serem reduzidos em rochas básicas.

Portanto para esses perfis devem-se utilizar índices que levem em consideração os valores de cálcio e magnésio, além dos valores de S (soma de bases) e Ki (relação molecular sílica e alumínio).

Para os solos desenvolvidos de rochas básicas, houve uma similaridade entre os valores de Óxido de Ferro, Alumínio e Titânio obtidos pelo ataque sulfúrico e análise semiquantitativa de fluorescência de raios X.

A não ocorrência de esmectita no solo residual 1 deve-se ao fato da degradação da esmectita que por intemperismo se transforma em caulinita, quando há lixiviação do Ca e Mg.

A ocorrência de concreções ferruginosas de óxi-hidróxidos de ferro no solo residual 1, se deve a precipitação desse elemento mais intensamente nessa camada, o que está condizente com o grau de laterização desse solo. Deve-se acrescentar que baseando-se nas concentrações de óxido de ferro e alumínio nos solos SR2 e SR3 acredita-se que isso possa ser um indicativo de um possível estágio inicial de laterização desses solos.

No que se refere aos índices físicos constatou-se uma correlação entre os limites de liquidez, bem como com os teores de umidade higroscópica com a composição mineralógica da fração argila dos solos devendo-se realizar mais estudos de maneira a quantificar tal influência.

Os índices de atividade de Skempton não se adequaram para as duas camadas menos intemperizados de solo (SR2 e SR3)

Observou-se uma correlação entre os valores de densidade relativa dos grãos dos solos residuais em estudo com os teores de óxi-hidróxido de ferro.

Quanto aos ensaios de curva característica obtidos para os solos residuais de basalto verificou-se a influência da mineralogia das argilas nos resultados. Baseando-se nos resultados obtidos sugere-se que para solos expansivos a curva característica de umidade gravimétrica versus sucção mátrica não seja apropriada.



Verificou-se na avaliação de expansão que a presença de argilominerais expansivos no solo SR2 é de forma localizada, apresentando-se como material de preenchimento de veios e/ou amígdalas. Ao contrário disso, se notou que no solo SR3 a esmectita encontrava-se espalhada em toda a massa de solo.

Nos ensaios de adensamento edométricos foi verificado que aspectos como o grau de cimentação, a influência da água na quebra de ligantes do solo, além da presença de argilominerais expansivos, influenciam na determinação da tensão de pré-adensamento virtual, bem como na obtenção dos índices de compressibilidade.

Para os ensaios de cisalhamento direto, viu-se a influência da metodologia utilizada para esse tipo de solo

Foi verificado na determinação de parâmetros de resistência dos solos SR2 e SR3, a influência das fraturas nos corpos de provas quando submetidos a ensaios de cisalhamento direto drenado com tensões normais efetivas abaixo da tensão necessária para o fechamento de fraturas.

Para ensaios com tensões normais efetivas que proporcionassem um fechamento de fraturas; acredita-se que aspectos como a textura do solo, como por exemplo os teores de argila influenciariam os resultados. Observando-se uma correlação do teor de fração argila com os ângulos de atrito efetivos dos solos SR1, SR2 com tensões acima de 120 kPa e acima de 75 kPa para o SR3. Para essas envoltórias não houve correlação entre os índices de vazios iniciais com os parâmetros de resistência.

Observou-se uma similaridade da envoltória de resistência obtida no ensaio triaxial drenado com a envoltório do solo SR3 acima de 75 kPa. O que sugeriria que as pressões normais utilizadas nos ensaios triaxiais foram suficientes para um possível fechamento das fraturas dos corpos de prova ensaiados.

Acredita-se que os resultados obtidos nesse estudo, aliado às observações de campo possam ser utilizados para um melhor entendimento de perfis similares próximos ao estudado na Ferrovia Norte-Sul. Um exemplo disto foi à visita a um corte localizado na Rodovia Belém-Brasília nas proximidades da área de estudo, em que este se encontrava em perfeito estado de estabilização.

Este corte possuía declividades similares às do Corte 1, além de também ser composto em sua grande parte por solo residual de basalto. Porém notava-se que este solo encontrava-se laterizado similarmente ao solo residual 1, um dos solos estudados no presente estudo.

Aliando essas considerações de campo, às obtidas através de ensaios de laboratório, sugere-se que a laterização para esse tipo de solo residual contribui para um aumento de resistência, principalmente no intercepto coesivo e no impedimento de uma possível influência das fraturas nos parâmetros de resistência, com o alívio de tensões provocado pela escavação de tal corte. É bem verdade que detalhes como a orientação das fraturas é imprescindível para efeito comparativo entre os taludes.

- **Sugestões para Pesquisas Futuras:**

Como já visto, estudos em solos provenientes de rochas básicas correlacionando características físico-química-mineralógicas com parâmetros mecânicos são raros em nosso país.

O que se notou através do nosso estudo, é que o quantitativo e a disposição dos argilominerais expansivos encontrados na massa do solo, assim como informações quanto ao grau e tipo de cimentação e um detalhamento das discontinuidades dos solos, são de extrema importância para um melhor entendimento dos resultados de laboratório para esse tipo de solo. Por esta razão sugere-se que sejam desenvolvidos mais estudos, dando esse enfoque.

Sugere-se também a realização de ensaios para a avaliação de expansibilidade, ensaios de cisalhamento direto com tensões abaixo e acima de 120 kPa para que se possa ratificar a influência das discontinuidades nos parâmetros de resistência dos solos residuais em estudo.

Além de serem necessários mais estudos objetivando diferenciar e apontar a metodologia mais adequada para os ensaios de cisalhamento direto para esses tipos de solo.

Percebeu-se na Bibliografia Nacional que existem diversos estudos em solos residuais de basalto objetivando determinar parâmetros de resistência residual para solos residuais de basalto. Tais estudos apontam que há um decréscimo considerável nos parâmetros de resistência residual quando comparado com os de pico para solos residuais de basalto. Nesse sentido, sugere-se que sejam realizados ensaios para a determinação dos parâmetros de resistência residual para os solos em estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR's 7181/1984, 6459/1984, 7180/1984, 6508/1984, 6457/1986, 2887/1988.

**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – (1990)** – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil under Consolidated Drained Conditions – Philadelphia, United States of America – ASTM D 3080-9 – 6p.

**BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J. & DIAS, R. D. – (1998)** – Avaliação Geotécnica da Erodibilidade de Solos Residuais da Região Metropolitana de Porto Alegre – VI Simpósio Nacional de Controle de Erosão – ABGE – Presidente Prudente, SP.

**BRITISH STANDARD INSTITUTION – (1990)** – British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, part 7: Shear Strength Tests (Total Stress) – London, England – BS 1377: Part 7.

**BRITO A. T. A. – (1981)** - Estudo Químico e Mineralógico de um Perfil de Alteração de Gnaisse Migmatítico do Campo Experimental da PUC-RJ, Gávea, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio – Rio de Janeiro, RJ – p. 283.

**CESBE ENGENHARIA – (2000)** – Segundo Estudo de Estabilizações dos Taludes das Escavações dos Emboques Norte e Sul do Túnel da Ferrovia Norte-Sul sob a Rodovia Belém-Brasília, em Estreito na divisa dos Estados do Maranhão e Tocantins – RE-2005/00-B – São Paulo, SP.

**CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S. & MONTGOMERY-SMITH, G. – (1992)** – A Low Cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low-Rise Buildings – Proc. of the Institute of Civil Engineering, 92, n.2.

**CRUZ, P. T da – (1969)** – Propriedades de Engenharia de Solos Residuais Compactados – Publicação Escola Politécnica USP – São Paulo, SP – V. II.

**de ARAUJO, R. C. da – (2000)** – Estudo da Erodibilidade de Solos da Formação Barreiras – Dissertação de Mestrado – PUC-Rio – Rio de Janeiro, RJ – 148p.

**de CAMPOS, T. M. P.; CARRILLO, C. W.; TIBANA, S.; SAENZ, S. A. A. & CARDOSO, E. F. – (1992)** – Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório – 1º Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – 1º COBRAE – Rio de Janeiro, RJ – V. III p.835-851.

**de CAMPOS, T.M.P.; CARRILO, C.W. – (1995)** – Direct Shear Testing on na Unsaturated Soil from Rio de Janeiro – Proceeding of the First Internacional Conference on Unsaturated – Paris, France – V.1 p.31-38.

**DIAS, Junior, M.S. – (1983)** – Influência dos Argilominerais na Expansibilidade das Rochas – Dissertação de Mestrado PUC-Rio – Rio de Janeiro, RJ – 167p.

**EDIL E MOTAN – (1984)** – Laboratory Evolution of Soil Suction Components – Geot. Test. J. – V. VII nº4 p.173-181.

**EMBRAPA-CNPS – (1997)** – Manual de Métodos de Análise de Solo – 2da. Edição revisada e atualizada – Rio de Janeiro, RJ – 212p.

**EPC, Eng. Proj. Consultoria Ltda – (1986)** – Lote 5AC, Relatório do Projeto Ferrovia Norte-Sul – Nº Proj. G1673A-R003, Rio de Janeiro, RJ.

**FÁCIO, J. A. – (1991)** – Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos Solos do Distrito Federal – Dissertação de Mestrado UnB – Brasília, DF.

**FALCÃO, M. F. G. – (1984)** – Fatores Geológicos e Características de Intemperismo Condicionantes das Propriedades Mecânicas de Solos Residuais – Dissertação de Mestrado, Puc-Rio – Rio de Janeiro – 131p.

**FERREIRA, R. N. – (1997)** – Comportamento Geotécnico de uma Argila Expansiva Não Saturada – Dissertação de Mestrado UFPE – Recife, PE – 107p.

**FERREIRA, R.N.; BASTOS, E.G. & JUCÁ, J. F. T. – (1998)** – Estudo de Laboratório e Campo de um Solo Expansivo – XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Brasília, DF – V. I p.21-26.

**FREDLUND, D. G. – (1979)** – Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils – Canadian Geotechnique Journal, nº 16 – Canadá.

**FONSECA, A. M. C. C. C. & FERREIRA, C. M. S. – (1981)** – Metodologia para Determinação de um Índice de Erodibilidade de Solos – Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia – COPPE/UFRJ – ABMS – Rio de Janeiro, RJ – p.646-667.

**FUTAI, M. M. – (2002)** – Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não Saturados: Aplicação a um caso de Voçorocamento – Tese de Doutorado UFRJ – Rio de Janeiro, RJ.

**GIBSON, R. E. & HENKEL, D. J. – (1954)** - Influence of Duration of Tests at Constant Rate of Strain on Measured Drained Strength – Geotechnique – V. IV p.6-15.

**GIDIGASU, M. D. – (1976)** – Laterite Soil Engineering – Elsevier Scientific Publishing Company – New York, United States of America.

**HEAD, K. H. – (1982)** – Manual of Soil Laboratory Testing – Pentech Press Limited – London, England – V. III.

**HERNANDEZ, M. P. M – (2004)** – Estudo em Laboratório de Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados a Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico – Dissertação de Mestrado PUC-Rio – Rio de Janeiro, RJ.

**JACKSON – (1969)** – Soil Chemical Analysis – Advanced Course. U.S.A. – Second Edition, 991p.

**JIMENEZ-QUIÑONEZ, P. & DEERE, D. U. – (1967)** – Physical Properties and Compaction Characteristics of Tropically Weathered Soils – Proc 3º Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering – Caracas, Venezuela – V. I p.333-382.

**JUCÁ, J. F. T.; BASTOS, E. G.; FERREIRA, R. N. & JUSTINO DA SILVA, J. M. – (1997)** – Comportamento Geotécnico de uma Argila Não-Saturada – 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – Rio de Janeiro, RJ – V. I p.145-150.

**LACERDA, M.P.C.; ANDRADE, H. & QUÉMÉNEUR, J.J.G. – (2002)** – Pedogeoquímica em Perfis de Alteração na Região de Lavras (MG). I – Elementos Maiores – Óxidos Constituintes – Revista Brasileira de Ciência do Solo– Viçosa, MG – V.26 p.75-85.

**Lima, E.S. ; Ferreira, M.V.X.; Coutinho, R.Q. & De Carvalho, H.A. - (2002)** – Correlações entre Parâmetros Físico-Químicos e Parâmetros Geotécnicos de um Solo Residual de Biotita-Gnaiss na Região do Espinhaço da Gata – Pe – Solos e Rochas – V.25 p. p.93-104.

**MACCARINI, M. – (1980)** – Ensaio Triaxiais e de Cisalhamento Direto no Solo Residual Gnáissico Jovem do Campo Experimental da PUC-Rio, Gávea, RJ – Dissertação de Mestrado PUC-RJ – Rio de Janeiro, RJ – p.254.

**MACCARINI, M.; TEIXEIRA, V. H. & TRICHÊS, G. – (1989)** – Bonding Properties of Residual Soil Derived from Diábase – ICSMFE – V. I p.525-528.

**MACCARINI, M. & MELLO, J. R – (1994)** – Compressibilidade de um Solo Residual de Gnaisse ocorrente na Grande Florianópolis – X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – ABMS – Foz do Iguaçu, PR – V. IV p.1205-1212.

**MARINHO, F. A. M. – (1997)** – Medição de Sucção em Solos - 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – Rio de Janeiro, RJ – V. II p.373-397.

**MARSHALL, T. J. – (1959)** – Relations between Water and Soil – Com. Bureau Soils Technique – Comm nº50 – C. A. B. Harpenden

**MELFI, A.J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R. - (1988)** – Geological and Magmatic Aspects of the Paraná Basin – an introduction. In: PICCIRILLO E.M. & MELFI, A.J. (Ed.). The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin, petrogenetic and geophysical aspects. Cap. 1, p.1-13.

**MITCHELL, J. K. – (1993)** – Fundamentals of Soil Behaviour – 2da Edição John Wiley & Sons – New York, United States of America.

**NEGRO Jr., A. & GONÇALVES, J. A. – (1997)** – Escorregamento de Talude em Solo com Esmectita – 2<sup>nd</sup> Pan-American Symposium Landslides – 2<sup>nd</sup> COBRAE – Rio de Janeiro, RJ – V. II p.949-959.

**POLIVANOV, H. – (1998)** – Caracterização Química, Mineralógica, Física e Geotécnica de Perfis de Alteração Desenvolvidos de Gnaisse – Tese de Doutorado UFRJ – Rio de Janeiro, RJ – p.387.

**PROJETO 02:004.02-022 – (1996)** – Identificação e Classificação de Solos Argilosos Dispersivos por meio do Ensaio do Furo de Agulha (Pinhole Test) – ABNT – Rio de Janeiro, RJ – 9p.



**RAMIDAN, M. A. S. da – (2003)** – Estudo de um Processo de Voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara – GO – Dissertação de Mestrado – PUC-Rio – Rio de Janeiro, RJ – p.217.

**RIGO, M. L. – (2000)** – Resistência ao Cisalhamento Residual de Alguns Solos Saprolíticos de Basalto do Estado do Rio Grande do Sul – Dissertação de Mestrado UFRGS – Porto Alegre, RS – p.134.

**ROCHA, J. C. S. da – (1993)** – Caracterização Geológico-Geotécnica dos Materiais Envolvidos nos Movimentos de Massa Ocorridos em Fevereiro de 1988, na Vista Chinesa – Rio de Janeiro, RJ – p.164.

**SANTOS, R. M. M. – (1997)** – Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões do Município de Goiânia, GO – Dissertação de Mestrado UnB – Brasília, DF.

**SANTOS, R. M. M. & CAMAPEEM, JC. – (1998)** – Ensaio de Erodibilidade em Voçorocas do Município de Goiânia – XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Brasília, DF – V. I p.581-588.

**SERTÃ, H. B. C. – (1986)** - Aspectos Geológicos e Geotécnicos do Solo Residual do Campo Experimental II da PUC-Rio, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro.

**SOUZA NETO, J. B. & LACERDA, W. A. – (2001)** – Variabilidade nos Parâmetros Geotécnicos de alguns Solos Residuais Brasileiros – 3º Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes e Encostas – Rio de Janeiro, RJ – p.305-315.

**SOWERS, G. F. – (1967)** – Discussion, Proc. 3<sup>rd</sup> Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering – Caracas, Venezuela – V. III p.135-144.

**TANAKA, A. – (1976)** – Algumas Considerações sobre a Resistência ao Cisalhamento do Solo Residual de Basalto de São Simão – Dissertação de Mestrado PUC-Rio – Rio de Janeiro, RJ – 145p.

**VARGAS, M. – (1953)** – Some Engineering Properties of Residual Clay Soils occurring in Southern Brazil – Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering – Zurich, Switzerland – V. I p.84-90.

**VALEC ENGENHARIA – (2002)** – Relatório de Estabilização da Encosta a Montante do Corte 1 – lado direito – Lote 5AC-1, Incluindo Resultado de Sondagens – Rio de Janeiro, RJ.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)