

**MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA  
DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS ORIUNDOS DOS  
GRANITOS, GNAISSES E MIGMATITOS DE PORTO ALEGRE**

**CEZAR AUGUSTO BURKERT BASTOS**

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre  
Março de 1991

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Regina Davison Dias  
Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Ademar Gilberto Groehs  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Eng.Civil

BANCA EXAMINADORA

- Profa. Regina Davison Dias (Orientador)  
D.Sc. pela COPPE/UFRJ
- Prof. Jarbas Milititsky  
Ph.D. pela University of Surrey
- Prof. Carlos Leite Maciel Filho  
D.Sc. pela USP

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se às seguintes pessoas, fundamentais na realização deste trabalho de dissertação:

à professora Regina Davison Dias pela dedicada orientação e apoio;

aos auxiliares de pesquisa Cláudia, João Hector, Albert, Elisabete, Sandra, Susana, Roseli, Leandro e Cláudio, aos engenheiros Gilnei, Washington e Edgar e aos funcionários Jair e João Diniz pela colaboração nas diferentes etapas do trabalho de campo e laboratório.

aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo conhecimento transmitido;

ao Zeca e ao professor Luis Fernandes, ambos do Instituto de Geociências da UFRGS, pelo auxílio na parte de geologia.

ao professor Egon Klampt, da Faculdade de Agronomia da UFRGS, pelo auxílio na parte de pedologia.

ao professor Carlos Maciel Filho, da UFSM, pelos difratogramas de raio X.

aos técnicos Lenice Chanan e Ricardo Faertes, da Secretaria Municipal do Meio-Ambiente de Porto Alegre, pela colaboração nos trabalhos de mapeamento.

aos colegas de curso pelo convívio;

a todos pela amizade;

agradece-se, também, ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul e FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos pelo apoio financeiro.

Dedicada

à Jacqueline, minha esposa e à Iara, minha mãe

Em memória

de Carlos Augusto Saraiva Bastos, meu pai

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xi
LISTA DE SIMBOLOS .....	xiv
RESUMO .....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	3
2.1 - INTEMPERISMO E A FORMAÇÃO DE PERFIS DE SOLOS SOBRE ROCHAS DE COMPOSIÇÃO GRANITICA .....	3
2.1.1 - Intemperismo .....	3
2.1.2 - Formação do Perfil de Intemperismo .....	8
2.1.3 - Identificação e classificação dos materiais no Perfil de Intemperismo .....	11
2.2 - CARACTERISTICAS FISICAS DOS SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DE ROCHAS GRANITICAS E GNAISSICAS .	16
2.2.1 - Granulometria .....	16
2.2.2 - Plasticidade .....	18
2.2.3 - Macro e Microestrutura .....	20
2.3 - PROPRIEDADES GEOTECNICAS DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DE GRANITOS E GNAISSES .....	24
2.3.1 - Compressibilidade .....	24
2.3.2 - Colapsividade .....	28
2.3.3 - Resistência ao Cisalhamento .....	30
3 - CARACTERIZAÇÃO DA AREA DE ESTUDO .....	40
3.1 - DEFINIÇÃO DA AREA .....	40
3.2 - CLIMA E VEGETAÇÃO .....	40
3.3 - GEOMORFOLOGIA .....	40
3.3.1 - Relevo Forte Ondulado .....	41
3.3.2 - Relevo Ondulado .....	41
3.3.3 - Relevo Plano .....	41
3.4.4 - Drenagem .....	42
3.4 - GEOLOGIA .....	42
3.4.1 - Embasamento Cristalino .....	42
3.4.1.1 - Migmatitos .....	44
3.4.1.2 - Corpos graníticos .....	45
3.4.1.3 - Diques de riolito e diabásio .	46

3.4.2 - Sedimentos Quaternários .....	46
3.4.2.1 - Pleitoceno .....	46
3.4.2.2 - Holoceno .....	47
3.4.2.3 - Alterito Serra de Tapes .....	47
3.5 - PEDOLOGIA .....	47
3.5.1 - Podzólicos Vermelho-Amarelo .....	48
3.5.2 - Litólicos .....	48
3.5.3 - Cambissolos .....	49
3.5.4 - Planossolos .....	49
3.5.5 - Gleis Húmicos e Pouco Húmicos .....	50
3.5.6 - Solos Aluviais .....	50
4 - METODO DE INVESTIGAÇÃO .....	51
4.1 - ESTUDO DE ESCRITÓRIO .....	51
4.1.1 - Coleta de Dados .....	51
4.1.2 - Interpretação das Informações .....	52
4.1.3 - Esboço das Unidades Geotécnicas .....	54
4.2 - INVESTIGAÇÃO DE CAMPO .....	55
4.3 - AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES GEOTECNICAS DOS MATERIAIS .....	56
5 - UNIDADES GEOTECNICAS PARA PORTO ALEGRE .....	61
5.1 - APRESENTAÇÃO .....	61
5.2 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO PONTA GROSSA - PVg e Rg (g.PG) .....	63
5.2.1 - Investigação .....	63
5.2.2 - Características Físico-Morfológicas dos Perfis .....	64
5.2.3 - Mineralogia .....	64
5.2.4 - Granulometria .....	65
5.2.5 - Plasticidade .....	65
5.2.6 - Índices Físicos .....	68
5.2.7 - Compressibilidade .....	68
5.2.8 - Resistência ao Cisalhamento .....	70
5.2.9 - Colapsividade .....	70
5.3 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO CANTAGALO - PVg e Rg (g.Cg) .....	70
5.3.1 - Investigação .....	70
5.3.2 - Características Físico-Morfológicas dos Perfis .....	73

5.4 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO	
SANTANA - PVg e Rg (g.S) .....	73
5.4.1 - Investigação .....	73
5.4.2 - Características Fisico-Morfológicas dos Perfis .....	73
5.4.3 - Mineralogia .....	74
5.4.4 - Granulometria .....	74
5.4.5 - Plasticidade .....	74
5.4.6 - Índices Físicos .....	76
5.4.7 - Compressibilidade .....	76
5.4.8 - Resistência ao Cisalhamento .....	76
5.5 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO	
INDEPENDENCIA - PVg e Rg (g.I) .....	76
5.5.1 - Investigação .....	76
5.5.2 - Características Fisico-Morfológicas dos Perfis .....	78
5.5.3 - Mineralogia .....	80
5.5.4 - Granulometria .....	82
5.5.5 - Plasticidade .....	82
5.5.6 - Índices Físicos .....	82
5.5.7 - Compressibilidade .....	86
5.5.8 - Resistência ao Cisalhamento .....	86
5.5.9 - Colapsividade .....	89
5.6 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO MIGMATITOS -	
PVm e Rm .....	89
5.6.1 - Investigação .....	89
5.6.2 - Características Fisico-Morfológicas dos Perfis .....	89
5.6.3 - Mineralogia .....	91
5.6.4 - Granulometria .....	91
5.6.5 - Plasticidade .....	91
5.6.6 - Índices Físicos .....	94
5.6.7 - Compressibilidade .....	94
5.6.8 - Resistência ao Cisalhamento .....	96
5.6.9 - Colapsividade .....	96
5.7 - UNIDADE GEOTECNICA SOBRE O ALTERITO SERRA DE	
TAPES - PVpf (AST) .....	96
5.7.1 - Investigação .....	96

5.7.2 - Características Fisico-Morfológicas dos Perfis .....	99
5.7.3 - Mineralogia .....	100
5.7.4 - Granulometria .....	100
5.7.5 - Plasticidade .....	100
5.7.6 - Índices Físicos .....	103
5.7.7 - Compressibilidade .....	103
5.7.8 - Resistência ao Cisalhamento .....	104
5.7.9 - Colapsividade .....	104
6 - ANÁLISE GLOBAL DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS SOLOS DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS INVESTIGADAS .....	107
6.1 - GRANULOMETRIA .....	107
6.2 - PLASTICIDADE .....	111
6.3 - CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS NO ESTADO INDEFORMADO .....	116
6.3.1 - Cimentação e Estruturas Relíquias .....	116
6.3.2 - Índices Físicos .....	118
6.4 - COMPRESSIBILIDADE .....	122
6.5 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	130
6.6 - COLAPSIVIDADE .....	139
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	143
7.1 - CONCLUSÕES .....	143
7.2 - SUGESTÕES .....	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	150
ANEXO .....	156

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1.1.1 - Série de Goldich da estabilidade dos minerais (representação parcial) (CARROL, 1970) .....	10
FIGURA 2.1.2.1 - Representação de um perfil de intemperismo para rochas graníticas .....	10
FIGURA 2.1.3.1 - Variação dos materiais ao longo de um furo de sondagem em um perfil granítico de Hong Kong (BRAND, 1982) .....	15
FIGURA 5.2.4.1 - Curvas granulométricas - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	67
FIGURA 5.2.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	71
FIGURA 5.2.8.1 - Envoltórias de resistência - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	72
FIGURA 5.4.4.1 - Curvas granulométricas - unidade Rg (g.S)	77
FIGURA 5.5.4.1 - Curvas granulométricas - unidades PVg e Rg (g.I) .....	84
FIGURA 5.5.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada - unidades PVg e Rg (g.I) .....	87
FIGURA 5.5.8.1 - Envoltórias de resistência - unidades PVg e Rg (g.I) .....	88
FIGURA 5.6.4.1 - Curvas granulométricas - unidades PVm e Rm .....	93
FIGURA 5.6.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada - unidades PVm e Rm .....	97
FIGURA 5.6.8.1 - Envoltórias de resistência - unidades PVm e Rm .....	98
FIGURA 5.7.4.1 - Curvas granulométricas - unidade PVpf (AST) .....	102
FIGURA 5.7.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada - unidade PVpf (AST) .....	105
FIGURA 5.7.8.1 - Envoltórias de resistência - unidade PVpf (AST) .....	106

FIGURA 6.1.1 - Granulometria dos horizontes B e C .....	108
FIGURA 6.1.2 - Granulometria ao longo de perfis de intemperismo .....	109
FIGURA 6.2.1 - Limites de consistência e teor de umidade de campo dos solos estudados .....	112
FIGURA 6.2.2 - Localização dos solos estudados no Gráfico de Plasticidade de Casagrande .....	115
FIGURA 6.2.3 - Localização dos solos estudados no gráfico de plasticidade e atividade coloidal associados (VARGAS, 1988) .....	115
FIGURA 6.3.2.1 - Variação dos índices físicos no perfil de intemperismo CD .....	121
FIGURA 6.4.1 - Comportamento sob compressão confinada dos pontos JI-3.0m e UP-1.0m (unidade PVpf) .....	126
FIGURA 6.4.2 - Exemplo de curva tempo x recalque (CE-1.0m inundado) mostrando as três etapas na evolução dos recalques sob compressão confinada .....	129
FIGURA 6.4.3 - Relação $R_i/R_t$ para os diferentes níveis de tensões - valores médios .....	131
FIGURA 6.4.4 - Variação dos valores médios de $C_v$ com o nível de tensões .....	132
FIGURA 6.4.5 - Variação dos valores médios de $K_{ap}$ com o nível de tensões .....	133
FIGURA 6.5.1 - Típica envoltória de resistência evidenciando a curvatura .....	137
FIGURA 6.5.2 - Curvas da deformação horizontal x tensão tangencial para cisalhamento direto (ponto CE-4.0m natural) ilustrando "picos" de resistência .....	137
FIGURA 6.5.3 - Relação entre a pressão limite e a pressão de pré-adensamento .....	140

## LISTA DE TABELAS

QUADRO 2.1.3.1 - Classificação dos materiais por horizontes (DAVISON DIAS, 1985) .....	13
QUADRO 4.1.1.1 - Principais fontes consultadas no estudo do meio físico de Porto Alegre .....	53
TABELA 5.2.1.1 - Identificação dos pontos amostrados - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	66
TABELA 5.2.4.1 - Granulometria - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	66
TABELA 5.2.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidades PVg e Rg (g.PG) ..	69
TABELA 5.2.5.2 - Classificação das amostras - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	69
TABELA 5.2.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	69
TABELA 5.2.9.1 - Coeficientes de Colapso (i) - unidades PVg e Rg (g.PG) .....	75
TABELA 5.4.1.1 - Identificação dos pontos amostrados - unidade Rg (g.S) .....	75
TABELA 5.4.4.1 - Granulometria - unidades PVg e Rg (g.S) ..	75
TABELA 5.4.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidades PVg e Rg (g.S) ..	77
TABELA 5.4.5.2 - Classificação dos materiais - unidades PVg e Rg (g.S) .....	77
TABELA 5.4.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidades PVg e Rg (g.S) .....	77
TABELA 5.4.8.1 - Parâmetros de resistência - unidades PVg e Rg (g.S) (DAVISON DIAS, 1987) .....	79
TABELA 5.5.1.1 - Identificação dos pontos amostrados - unidades PVg e Rg (g.I) .....	79
TABELA 5.5.4.1 - Granulometria - unidades PVg e Rg (g.I) ..	83
TABELA 5.5.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidades PVg e Rg (g.I) ..	85
TABELA 5.5.5.2 - Classificação das amostras - unidades PVg e Rg (g.I) .....	85
TABELA 5.5.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidades PVg e Rg (g.I) .....	90
TABELA 5.5.9.1 - Coeficientes de colapso (i) - unidades PVg e Rg (g.I) .....	90

TABELA 5.6.1.1 - Identificação das amostras - unidades P <sub>Vm</sub> e R <sub>m</sub> .....	92
TABELA 5.6.4.1 - Granulometria - unidades P <sub>Vm</sub> e R <sub>m</sub> .....	92
TABELA 5.6.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidades P <sub>Vm</sub> e R <sub>m</sub> .....	95
TABELA 5.6.5.2 - Classificação das amostras - unidades P <sub>Vm</sub> e R <sub>m</sub> .....	95
TABELA 5.6.6.1 - Índices Físicos e peso específico dos grãos - unidades P <sub>Vm</sub> e R <sub>m</sub> .....	95
TABELA 5.6.9.1 - Coeficientes de colapso (i) - unidades P <sub>Vm</sub> e R <sub>m</sub> .....	101
TABELA 5.7.1.1 - Identificação das amostras - unidade P <sub>Vpf</sub> (AST) .....	101
TABELA 5.7.4.1 - Granulometria - unidade P <sub>Vpf</sub> (AST) .....	101
TABELA 5.7.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidade P <sub>Vpf</sub> (AST) .....	102
TABELA 5.7.5.2 - Classificação das amostras - unidade P <sub>Vpf</sub> (AST) .....	102
TABELA 5.7.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidade P <sub>Vpf</sub> (AST) .....	105
TABELA 5.7.9.1 - Coeficientes de colapso (i) - unidade P <sub>Vpf</sub> (AST) .....	106
TABELA 6.2.1 - Atividade coloidal dos solos do horizonte B	115
TABELA 6.3.2.1 - Análise estatística básica para os valores dos índices físicos dos solos em função dos horizontes das unidades geotécnicas (variações e médias) .....	119
TABELA 6.4.1 - Índices de recompressão (C <sub>r</sub> ), de compressão (C <sub>c</sub> ) e de descarga (C <sub>d</sub> ) e pressões de pré-adensamento em função dos horizontes das unidades geotécnicas (variações e médias) .	124
TABELA 6.4.2 - Índices de compressibilidade (C) em função dos horizontes das unidades geotécnicas (variações e médias) .....	125
TABELA 6.4.3 - Relação entre os recalques "instantâneos" e totais (R <sub>i</sub> /R <sub>t</sub> ) em % para diferentes estágios de carga .....	131

TABELA 6.4.4 - Valores do coeficiente de adensamento (Cv) em $\frac{\text{cm}^2}{\text{seg}}$ para os diferentes estágios de carga .....	132
TABELA 6.4.5 - Valores do coeficiente de permeabilidade para o adensamento primário (Kap) em cm/seg para os diferentes estágios de carga .....	133
TABELA 6.5.1 - Síntese dos resultados dos parâmetros de resistência dos solos dos horizontes das diferentes unidades .....	135
TABELA 6.6.1 - Variações dos valores do coeficiente de colapso máximo (imáx) e das tensões para o colapso máximo em função dos horizontes das unidades geotécnicas .....	140

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ac - Atividade Coloidal

BRA/73 - Referência a BRASIL (1973)

c - Coesão

C - Índice de compressibilidade (definido em 4.3.1)

Cc - Índice de compressão

Cd - Índice de descarga ou descarregamento

Cr - Índice de recompressão

Cv - Coeficiente de adensamento

e - Índice de vazios inicial ou natural

i - Coeficiente de colapso

IP - Índice de plasticidade

K - Coeficiente de permeabilidade

Kap - Coeficiente de permeabilidade para o adensamento primário sob compressão confinada

P'c - Pressão de pré-adensamento

P'l - Pressão limite (definida no item 6.5)

RAD/86 - Referência a RADAMBRASIL (1986)

Ri/Rt - Relação entre o recalque "instantâneo" (7 seg.) e o recalque total

Wcampo - Teor de umidade de campo

Wl - Limite de liquidez

Wp - Limite de plasticidade

$\emptyset$  - Ângulo de atrito

REFERENTE AS UNIDADES GEOTECNICAS

PVg - Solos em perfis podzólicos vermelho-amarelo, formados das rochas que compõem os corpos graníticos;

PVm - Solos em perfis podzólicos vermelho-amarelo, formados dos migmatitos;

PVpf(AST) - Solos em perfis podzólicos vermelho-amarelo, formados dos paleossolos ferralitizados (Alterito Serra de Tapes);

Rg - Solos em perfis litólicos, oriundos dos corpos graníticos:

Rg(g.I) - Granito Independência

Rg(g.Cg) - Granito Cantagalo

Rg(g.PG) - Granito Ponta Grossa

Rg(g.S) - Granito Santana

Rm - Solos em perfis litólicos, oriundos dos migmatitos;

HID - Solos hidromórficos (planossolos, gleis e solos aluviais).

REFERENTE AS IDENTIFICAÇÕES DOS PERFIS AMOSTRADOS

- AP - Apamecor (perfil 07)
- AR - Antônio Rebouças (perfil 21)
- AS - Aldeia SOS (perfil 02)
- BG - Av. Bagé (perfil 27)
- BM - Beco do Monza (perfil 03)
- BZ - Baltazar O. Garcia (perfil 11)
- CA - Casemiro de Abreu (perfil 34)
- CC - Cerâmica Cordeiro (perfil 35)
- CD - Cidade de Deus (perfil 09)
- CE - CEEE (perfil 12)
- CL - Correa Lima (perfil 36)
- CT - Carlos Trein Filho (perfil 20)
- F - Av. Forte (perfil 39)
- JI - Jardim Itú (perfil 38)
- JM - J.S. Martins (perfil 30)
- SF - Parque Santa Fé (perfil 37)
- TS - Tobias da Silva (perfil 28)
- UP - Upamaroti (perfil 40)

## RESUMO

O trabalho consta do estudo do meio físico geotécnico do município de Porto Alegre visando a identificação e caracterização de unidades geotécnicas, formadas por associações de solos com características físico-morfológicas e origem semelhantes.

As unidades geotécnicas são definidas por um estudo de escritório baseado em levantamentos geológicos, pedológicos, topográficos e geográficos e também com o auxílio de fotografias aéreas, acompanhado de uma investigação de campo com a amostragem de perfis das diferentes unidades estimadas.

Uma carta com a ocorrência das unidades geotécnicas e com a representação das estruturas geológicas de maior importância geotécnica é construída.

Destaque é dado às unidades geotécnicas de solos subtropicais oriundos dos granitos, gnaisses e migmatitos. É executada uma avaliação das características físicas (mineralogia, granulometria, plasticidade e índices físicos) e propriedades geotécnicas (compressibilidade, colapsividade e resistência ao cisalhamento) dos solos dos principais horizontes de perfis típicos destas unidades. São utilizados ensaios de caracterização, análises mineralógicas de rochas por lâminas delgadas, análises mineralógicas de argilas por meio de difratograma de raio X, ensaios de compressão confinada e ensaios de cisalhamento direto.

Os resultados são apresentados em função dos principais horizontes de solos das unidades geotécnicas, são eles horizontes saprolíticos formados por solo residual que ainda apresentam minerais primários e vestígios estruturais da rocha de origem e horizontes superficiais muitas das vezes laterizados. A análise é feita à luz dos processos de formação e dos decorrentes fatores que determinam o comportamento geotécnico destes solos de intemperismo subtropical.

## ABSTRACT

A study of the geotechnical environment of Porto Alegre county, by means of identification and characterization of geotechnical units, is here presented. These units consist of group of soils with similar origin, physical and morphological characteristics.

The geotechnical units were defined based in geological, pedological, topographic and geographic surveys as well as in aerophotos. Field investigation, with sampling of profiles of different estimated units, was concomitantly performed.

A map with the geotechnical units and main geological structures was elaborated.

Geotechnical units of soils originated from granite, gneiss and migmatit were particularly studied. Physical characteristics (mineralogy, grain size distribution, plasticity and physical indexes) and geotechnical properties (compressibility, collapsibility and shear strength) of soils of main horizons from these units were evaluated. Characterization tests, rocks mineralogical analysis by means of thin sections and clay mineralogical analysis by means of X-rays diffraction, confined compression and direct shear tests were performed.

Tests results were related to main horizons of soils from the geotechnical units. These horizons are saprolitic (hor.C), composed of residual soil, and surface horizon (hor.B), frequently laterized. The results were analyzed regarding factors which influence the geotechnical behavior of these subtropical soils.

## 1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento do meio físico com o qual interagimos é o caminho pelo qual o homem avançará rumo ao progresso sem que se cometa agressões ao meio e à própria técnica.

Muitas vezes insucessos geotécnicos, resultando em soluções com custos exagerados ou em acidentes com grandes prejuízos materiais e até mesmo custando vidas, ocorrem devido a falta de conhecimento do material natural solo com que se trabalha, ignorando sua origem, gênese e propriedades.

Neste sentido, são importantes estudos geotécnicos em grandes áreas, visando o conhecimento dos solos encontrados e de suas principais características e propriedades de engenharia. Estes estudos têm grande aplicação no planejamento urbano, principalmente no que se refere ao uso e ocupação do solo, e em anteprojetos de engenharia.

Um adequado conhecimento do meio físico para fins geotécnicos pode ser obtido pela Carta Geotécnica, instrumento cartográfico composto de várias cartas temáticas que retratam as características e potencialidades geotécnicas de interesse em uma região. Para o município de Porto Alegre, estudos iniciais têm sido realizados para a confecção de sua Carta Geotécnica.

O trabalho de dissertação procura através da estimativa de unidades geotécnicas e de um estudo das propriedades físicas e mecânicas dos solos tropicais oriundos das rochas cristalinas da região, constituir um fundamental subsídio a cartografia geotécnica do município. Dentro do contexto de região metropolitana, ele vem a se somar com outros trabalhos recentes que visam conhecer geotecnicamente os solos da Grande Porto Alegre, são estes ORLANDINI (1991) e PINHEIRO (1991), sobre solos de rochas sedimentares da Depressão Central Gaúcha, e AZEVEDO (1990) e PREZZI (1990) baseados em ensaios de campo tipo SPT e CPT respectivamente.

Uma carta com a identificação e zoneamento das principais unidades geotécnicas de Porto Alegre é apresentada. As unidades representam associações de solos de gênese e características físicas e morfológicas homólogas.

As propriedades geotécnicas daquelas unidades formadas por solos tropicais originados do intemperismo das rochas cristalinas da área (fundamentalmente granitos, gnaisses e migmatitos) foram avaliadas através de um extenso programa de ensaios laboratoriais. A opção pelo estudo destes solos, foi motivada pela necessidade atual em se aumentar o conhecimento sobre solos tropicais e subtropicais e estudar seu comportamento e propriedades geotécnicas, já que, conforme destacado por pesquisadores de todo o mundo, não são estes materiais totalmente regidos pelas teorias clássicas da Mecânica dos Solos, estabelecidas nos países desenvolvidos de clima temperado e baseadas principalmente em solos sedimentares. Os aspectos geomecânicos investigados foram compressibilidade e resistência ao cisalhamento, que, em geral, são aqueles mais envolvidos em obras de engenharia geotécnica.

Tanto na estimativa das unidades geotécnicas, quanto na investigação das propriedades é levada em conta a gênese dos solos e os resultados e conclusões obtidos interpretados em função do perfil de intemperismo. Para a interpretação da ocorrência e formação dos solos estudados, contou-se com o apoio de cartas geológicas, pedológicas e topográficas, além de fotografias aéreas.

Portanto, este trabalho de dissertação pode ser dividido em duas ênfases principais: a primeira onde as principais unidades geotécnicas de Porto Alegre foram mapeadas e caracterizadas, constituindo um subsídio a estudos geotécnicos específicos na região; a segunda consiste na investigação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais das unidades de solos subtropicais das rochas cristalinas.

Estes dois momentos do trabalho são antecidos por uma abrangente descrição do meio físico da área de estudo e por uma revisão bibliográfica onde a formação e propriedades geotécnicas de solos de granito e outras rochas afins são discutidas.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados aspectos referentes ao intemperismo atuante em rochas de composição granítica e aos conseqüentes processos de formação dos solos. A seguir são traçadas considerações sobre as peculiares características físicas (granulometria, plasticidade e estrutura) e propriedades geotécnicas de resistência ao cisalhamento, compressibilidade e colapsividade dos solos tropicais e subtropicais formados.

### 2.1 - INTEMPERISMO E A FORMAÇÃO DE PERFIS DE SOLOS SOBRE ROCHAS DE COMPOSIÇÃO GRANÍTICA

#### 2.1.1 - Intemperismo

Para melhor entender o comportamento geotécnico dos solos torna-se necessário conhecer a origem e os processos envolvidos na formação destes. No caso dos solos residuais, formados pelo intemperismo das rochas sem que haja significativo transporte dos materiais inconsolidados, os aspectos relacionados a gênese destes materiais são muito importantes e determinantes nas suas propriedades de engenharia.

De uma maneira geral, as rochas de composição granítica são formadas principalmente por: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), feldspato potássico ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O}$ ), plagioclásio ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ), mica muscovita ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O}$ ) e mica biotita ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{K}_2\text{O}$ ). Ainda compõe estas rochas em menor proporção a hornblenda e alguns outros minerais acessórios. O intemperismo é a expressão destes minerais ajustando-se às novas condições da superfície do planeta.

Conceitualmente, o intemperismo é o conjunto de processos físicos, químicos e biológicos capaz de transformar o material maciço e tenaz rocha no material friável solo. É dividido em intemperismo físico e intemperismo químico.

#### a. Intemperismo Físico

É o conjunto dos processos que provocam o fraturamento de rochas sólidas com pouca ou nenhuma mudança química. É predominante em regiões climáticas de poucas chuvas e/ou baixas temperaturas, onde a ação química é inibida. Os principais processos responsáveis pelo intemperismo físico são: variações térmicas, alívio de pressões, crescimento de cristais e hidratação de minerais.

DEARMAN et al.(1978) comenta sobre um granito na Austrália onde processos físicos desagregam a rocha, mantendo praticamente inalterados minerais facilmente intemperizáveis quimicamente (plagioclásios e biotita).

#### b. Intemperismo Químico

É o conjunto dos processos de decomposição das rochas por reações químicas de superfície entre a rocha, a atmosfera e a água. Predominante nas regiões de climas quentes e úmidos onde estas reações são aceleradas. Solos tropicais e subtropicais são resultantes da ação preferencial do intemperismo químico.

Os principais processos envolvidos no intemperismo químico são: oxidação, redução, hidratação, hidrólise, ação de ácidos e atividade químico-biológica.

A oxidação é um dos processos químicos mais comuns e um dos primeiros a ocorrer na zona de intemperismo. Caracteriza-se pela passagem do ferro bivalente dos compostos das rochas para ferro trivalente. É evidenciado pela coloração avermelhada ou amarelada no manto de intemperismo.

A redução caracteriza-se pela extração de íons oxigênio dos minerais através da ação de ácidos provenientes de ambientes orgânicos.

A hidratação e a hidrólise agem conjuntamente. Pela hidratação a água é adsorvida, ficando intimamente ligada à superfície mineral, mas mantendo a estrutura do mesmo. A hidrólise age a seguir e é responsável pela lenta decomposição química do mineral, com a quebra de sua estrutura cristalina. O exemplo típico da ação da hidrólise sobre uma rocha de composição granítica é a transformação do ortoclásio (feldspato potássico) no argilo-mineral illita e na seqüência do processo

no argilo-mineral caolinita.

A ação dos ácidos estimula a decomposição dos minerais por ação direta ou aumentando o teor de cátions hidrogênio, acelerando a hidrólise. VARGAS (1951) comenta a ação do ácido carbônico sobre feldspato potássico em excesso de água, resultando em caolinita, sílica livre e carbonato solúvel. São ácidos ativos: ácido carbônico, ácido sulfúrico, ácidos húmicos, ácido oxálico, entre outros.

A ação biológica de raízes e microorganismos aumenta a acidez da água no solo e os tecidos animais e vegetais mortos ao decomporem-se no solo enriquecem a água em gás carbônico. Estes fatos aceleram os processos de alteração química.

O intemperismo químico é significativamente mais importante em climas tropicais e subtropicais, atingindo profundidades bem maiores. Entretanto, o intemperismo físico sempre atua em conjunto, favorecendo a infiltração das águas pela fragmentação e desagregação das rochas. O inverso também ocorre, por exemplo, as alterações por oxidação produzem fissuras e fraquezas que causam a desintegração ao longo do contorno dos grãos.

A resistência ao intemperismo varia de mineral para mineral. A Série de Goldich, representada parcialmente na figura 2.1.1.1, mostra a ordem crescente da estabilidade ao intemperismo dos minerais das rochas de composição granítica.

A estabilidade de cada mineral está relacionada a remobilidade dos elementos químicos que o compõe. Em geral, segue a seguinte ordem crescente em estabilidade (CARROL, 1970):

Na => Ca => K => Mg => Si => Al => Fe

Portanto, a partir da mineralogia e composição química de uma rocha pode-se estimar sua alterabilidade. Baseado neste princípio, REICHE (1950) estabelece que, em média, um granito é quase três vezes mais resistente ao intemperismo que um basalto.

A quantificação do intemperismo químico pode ser realizada por diferentes métodos desenvolvidos pela Geologia. Entretanto, a maioria destes métodos envolvem técnicas de pouca praticidade para a Engenharia.

São empregados métodos baseados em análises químicas,

pela avaliação da quantidade de cátions em relação a rocha sã ou pela quantificação da perda ou ganho de elementos químicos como a sílica, o ferro e o alumínio. Outros métodos são baseados em análises mineralógicas, onde é feita a avaliação quantitativa de um mineral resistente ao intemperismo, geralmente encontrado na fração areia (chamado mineral índice). Existem ainda parâmetros baseados na formação de argilo-minerais, quantificados por métodos mineralógicos ou químicos (CARROL, 1970).

Apesar de ainda distante da prática atual em geotecnia, a investigação da alterabilidade e do grau de intemperismo dos diferentes materiais torna-se cada vez mais importante na identificação e classificação dos solos formados das rochas cristalinas. IRFAN (1988) comenta várias tentativas para quantificar o grau de intemperismo químico para fins de engenharia. São índices obtidos por métodos químicos, petrográficos, de difração de raio X e de microscopia eletrônica, que buscam indiretamente relacionarem-se com os produtos de alteração. Sucessos neste sentido são registrados para as rochas graníticas (HAMROL, 1961).

Alguns destes índices, empregados para solos e rochas cristalinas alteradas, são apresentados por: LUMB (1962), desenvolvido para materiais oriundos do intemperismo de rochas graníticas de Hong Kong; GIDIGASU (1974), para rochas cristalinas em geral; IRFAN & DEARMAN (1978), a partir dos granitos alterados de Hong Kong; DESAI (1985), para os horizontes superficiais; RADWAN (1988), para a identificação de um solo granítico do Egito; SUEOKA (1988) e MASSEY et al(1989).

Os principais elementos resultantes do intemperismo podem ser divididos em residuais e precipitados da solução aquosa.

- ELEMENTOS

RESIDUAIS: Com pouca ou nenhuma movimentação relativa no manto de intemperismo, são:

- Minerais resistentes ao intemperismo (como o quartzo, magnetita, ilmenita, hematita e até mesmo a mica muscovita) e
- Produtos do intemperismo (argilo-minerais, óxidos de ferro e alumínio e sílica em meio ácido).

- ELEMENTOS  
PRECIPITADOS: De grande movimentação em solução aquosa, são os óxidos, os sais e a sílica coloidal.

Quando as rochas sofrem alteração pelo intemperismo químico, os elementos os quais são compostas aparecem como produtos residuais (resíduos) ou são levados pela água de drenagem. Esta lixiviação é significativa em climas úmidos, onde as chuvas condicionam a remoção dos cátions solúveis.

A água atua como solvente da sílica na estrutura dos minerais aluminossilicatados, tal que, sem ela haveria apenas desintegração física e limitada oxidação. Deve ser levemente ácida para que se processe o intemperismo; a acidez é afetada pelas trocas iônicas durante o processo e pela presença de matéria orgânica.

A necessidade de um fornecimento contínuo de íons em solução pelas águas que percolam em direção às rochas faz com que o limite inferior do intemperismo químico seja dado pelo nível da água subterrânea (AZAMBUJA, 1970).

CARROL (1970) divide o intemperismo químico em dois estágios: o primeiro responsável pela alteração da rocha, chamado de INTEMPERISMO GEOQUÍMICO, no qual manifestam-se processos de alteração inorgânicos das rochas sólidas; o segundo é responsável pela formação dos solos, denominado de INTEMPERISMO PEDOQUÍMICO, no qual estão envolvidos os processos orgânicos e inorgânicos que agem sobre o material rochoso alterado e/ou inconsolidado. Torna-se difícil analisar a ação independente dos dois estágios, pois não existe limite definido entre o final de um e o início de outro.

Tanto o intemperismo geoquímico como o pedoquímico são governados pelas cinco variáveis do intemperismo, definidas em 1941 por Hans Jenny (variáveis de Jenny), são elas: clima, material de origem, atividade biológica (biosfera), topografia e tempo. São fatores que determinam o solo resultante e suas propriedades, tal que uma propriedade P do solo residual pode ser equacionada da seguinte forma:

$$P = f(\text{clima, material de origem, biosfera, topografia e tempo})$$

### 2.1.2 - Formação do Perfil de Intemperismo

O perfil de intemperismo é a distribuição ao longo da profundidade dos produtos da ação dos processos geológicos e pedológicos do intemperismo.

Com o objetivo de abordar o desenvolvimento de um perfil de intemperismo de uma rocha granítica, é utilizado o exemplo apresentado por AZAMBUJA (1970). O caso da alteração de um granito composto por feldspato potássico, plagioclásio, quartzo, mica biotita e hornblenda é ilustrado na seqüência.

Submetida aos processos de intemperismo físico, a rocha aumenta seu diaclasamento. Ocorre uma possível desagregação granular nas paredes das fendas, que facilita a penetração da água de infiltração, responsável pelos processos químicos do intemperismo. O ataque químico manifesta-se tanto na superfície da rocha, como nas paredes das fendas, evidenciado pela perda de brilho da superfície atacada. O granito passa a apresentar um diaclasamento mais intenso, chegando a formar blocos delimitados por fendas com paredes alteradas e contendo no interior o granito são. Esta camada de blocos individualizados forma a cobertura do maciço inalterado.

Com o aumento da ação dos processos de intemperismo, os blocos começam a ficar arredondados, pois a intensidade dos processos intempericos é maior nos vértices e arestas. Os blocos diminuem em tamanho até constituírem núcleos de rocha dispersos em uma matriz predominantemente arenosa, composta de grãos de quartzo e feldspatos potássicos pouco alterados, e com pequeno teor de argila proveniente da decomposição dos minerais menos resistentes ao intemperismo químico, no caso o plagioclásio e a hornblenda.

Intensificado ainda mais o intemperismo, desaparecem os núcleos de rocha (comumente denominados matacões), resultando em uma massa de solo areno-argiloso que ainda mantém feições estruturais da rocha. E o solo saprolítico ou, usando a classificação por horizontes, horizonte C, onde a fração areia predominante é composta por grãos de quartzo e feldspatos potássicos ainda pouco decompostos. Neste ponto, o perfil já compreende duas camadas cobrindo a rocha são. Uma inferior composta por blocos de rocha alterada e matacões imersos em um

solo arenoso e uma superior de um solo areno-argiloso.

A partir daí, o intemperismo é exclusivamente químico e chega a um estágio em que todo o feldspato decompõe-se em argila, óxidos e cátions, assim como já o fizeram a hornblenda e a biotita. Permanece quimicamente inalterados os grãos de quartzo. Resulta um solo com grãos da fração areia dispersos em uma matriz argilosa. Este solo não guarda qualquer vestígio estrutural da rocha de origem. Por este motivo que, através de inspeção ao perfil de intemperismo, não é possível garantir com total segurança se o material, produto final do intemperismo do granito no perfil, foi formado *in situ* ou sofreu algum transporte. Neste caso, o emprego do termo "solo residual" para este material é duvidoso (discussões do Comitê on Tropical Soils of the I.S.S.M.F.E., 1985). Seria literalmente mais correto substituir a designação "solo residual maduro", muito usual para esta camada, por exemplo, pela classificação por horizontes herdada da Pedologia, identificando-a como horizonte B.

Esta última camada, na sua parte superior, pode receber a adição de matéria orgânica proveniente de processos biológicos. Forma-se uma camada ainda mais superficial, denominada de horizonte A. Esta, geralmente apresenta pouca espessura em relação às outras camadas.

Um exemplo de um perfil típico, formado em boas condições de drenagem sob clima tropical e subtropical, é representado na figura 2.1.2.1. Convém destacar que nem sempre um perfil completo é observado, em função da gênese do perfil de intemperismo um ou mais horizontes podem deixar de ser formados.

A distinção principal entre os solos do horizonte C e do horizonte B reside no fato de que o primeiro guarda resquícios da estrutura, da textura e dos minerais intemperizáveis da rocha que lhe deu origem, e o segundo já não apresenta estes vestígios, apagados pelo intemperismo. Para a formação dos saprólitos e dos solos saprolíticos, os processos de intemperismo predominantes são os geológicos (físicos e geoquímicos) e para os chamados solos superficiais (horizontes A e B), os processos desenvolvidos são os pedológicos (pedoquímicos).

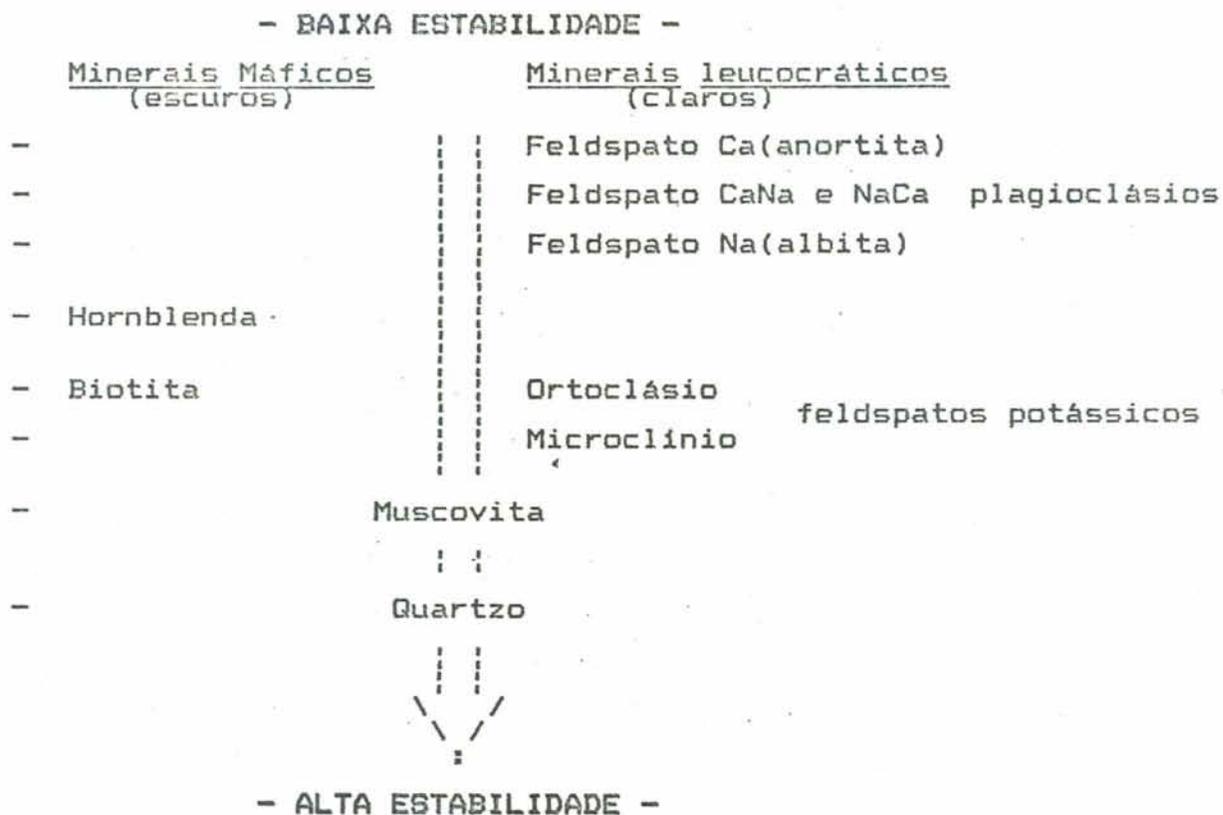


FIGURA 2.1.1.1 - Série de Goldich da estabilidade dos minerais (representação parcial) (CARROL, 1970)

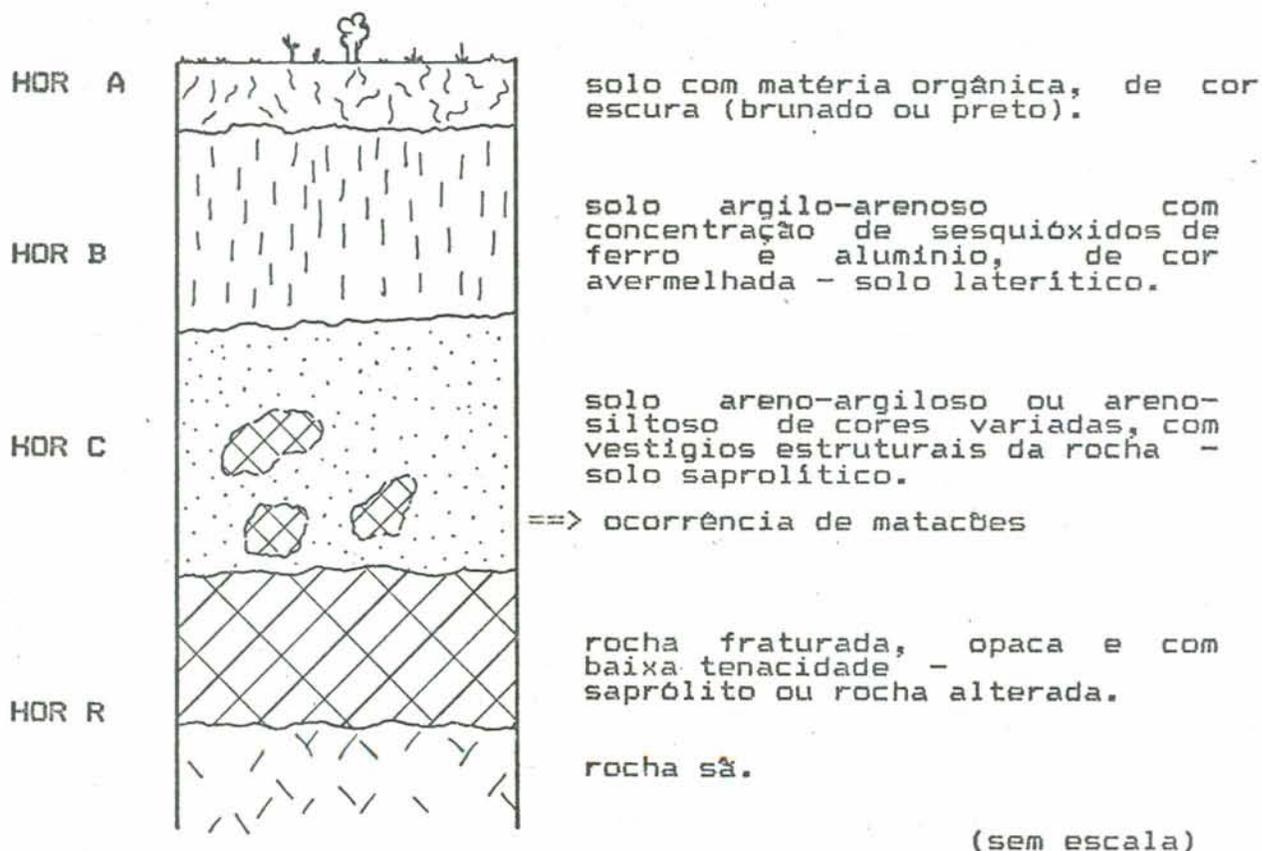


FIGURA 2.1.2.1 - Representação de um perfil de intemperismo para rochas graníticas

É destacado nos solos formados de granitos, gnaisses e migmatitos do sul do Brasil, o processo pedológico de podzolização. Deste resulta, entre outros, o perfil pedologicamente classificado como PODZOLICO VERMELHO-AMARELO. O processo é caracterizado pela iluviação de óxidos, sais, colóides e principalmente argilas pelo horizonte B, que o torna nitidamente mais argiloso que o horizonte A.

Outro perfil pedológico formado destas rochas, de ocorrência significativa na região do Escudo Cristalino Sul-Riograndense, é o perfil LITOLICO. Neste, condições desfavoráveis de formação do horizonte subsuperficial (B), resultam em perfis de intemperismo com seqüência de horizontes A,C e R ou até mesmo A e R.

Descrições da ação particular do intemperismo sobre algumas rochas graníticas são apresentadas por LUMB (1962) e RUDDOCK (1967). O primeiro detalha a formação dos solos saprolíticos dos granitos de Hong Kong e o segundo descreve os processos a que é sujeito uma granito sob forte intemperismo na região tropical da Africa.

VARGAS (1951) já descreve os processos de formação dos solos de gnaiss da região sudeste do Brasil.

DEARMAN et al.(1978) comenta a série de fatores ambientais e mineralógicos que vão determinar variadas formas de atuação do intemperismo sobre granitos.

### 2.1.3 - Identificação e Classificação dos Materiais no Perfil de Intemperismo

Na literatura são encontrados vários sistemas de classificação formulados para identificar os diferentes materiais ao longo do perfil de intemperismo tropical, a maioria deles aplicáveis aos produtos de alteração de granitos e gnaisses.

Para os objetivos de engenharia, um sistema de classificação em estágios de intemperismo deve considerar:

- a) Uma seqüência de estágios visualmente reconhecíveis de decomposição e desintegração, e
- b) A progressiva mudança nas propriedades mecânicas e físicas, o que influencia a performance de engenharia dos diferentes materiais.

A sistematização do perfil nestas condições é de grande valia, por exemplo, na análise de problemas de estabilidade de taludes (DEERE & PATON, 1971).

Dentre os esquemas existentes, apropriados ao intemperismo de granitos e gnaisses, pode-se referir a:

- VARGAS (1951), que já descreve um "perfil de maturidade", utilizando-se de preceitos da Pedologia para dividir os perfis de solos tropicais do sul do Brasil em quatro camadas: a primeira, pequena e superficial, onde há formação de húmus e material coloidal proveniente da decomposição dos silicatos; a segunda é um horizonte eluvial de onde por lixiviação, solução ou transformação química, são removidos certos componentes do solo; a terceira é um horizonte iluvial, onde precipitam ou depositam elementos novos e a quarta camada é o solo de alteração intacto.
- RUXTON & BERRY (1957), que determina para o horizonte saprolítico quatro zonas, baseado nas mudanças mineralógicas e grau de desintegração física dos granitos de Hong Kong.
- SOWERS (1963), que mostra um esquema simplificado válido para rochas ígneas e metamórficas em geral.
- LITTLE (1969), que propõe seis estágios no processo de intemperismo, usando como critério de reconhecimento dos materiais a destruição da estrutura rochosa, razão entre solo e rocha, ocorrência de limonita, decomposição de feldspatos e resistência mecânica.
- GIDIGASU (1974), que apresenta uma classificação baseada no conteúdo de minerais de alteração.
- DEARMAN et al. (1978), que estabelece um sistema baseado em seis estágios de intemperismo químico desde um granito são até o solo granítico.

Além destes, convém destacar a classificação por horizontes derivada da Pedologia. Este sistema é universalmente aceito pelas ciências do solo e já constitui uma nova tendência na classificação para Engenharia (quadro 2.1.3.1).

QUADRO 2.1.3.1 - Classificação dos materiais por horizontes  
(DAVISON DIAS, 1985)

HORIZONTE D	Horizonte Orgânico	Pode ser subdividido em O1 e O2. O horizonte O1 contém folhas soltas e resíduos orgânicos. O horizonte O2 é formado por restos orgânicos parcialmente ou totalmente alterados.
HORIZONTE A	H o r i z o n t e s  S u p e r f i c i a i s	O horizonte A apresenta um acúmulo de matéria orgânica próxima ou na superfície. Pode apresentar uma concentração de quartzo e outros minerais resistentes ao intemperismo devido a remoção de argila, ferro ou alumínio, caracterizando uma zona de eluviação. Pode ser subdividido em A1, A2 e A3. A medida que o índice aumenta há uma diminuição de matéria orgânica e a cor passa de mais escura para mais clara, tornando-se mais próximo das características do horizonte B.
HORIZONTE B		O horizonte B caracteriza-se por apresentar uma concentração iluvial de argilas, sesquióxidos de ferro ou alumínio (B textural) ou não apresentar características de iluviação (B latossólico ou B incipiente).
HORIZONTE C	M i n e r a i s	De acordo com a pedologia o horizonte C é formado por material inconsolidado com pouca influência de organismos. Nem sempre este horizonte é o material de origem do horizonte superior. Em engenharia, quando o horizonte C guarda a estrutura da rocha de origem este é chamado de solo saprolítico.
HORIZONTE R		O horizonte R representa a inalterada que pode ou não ser a rocha matriz do solo superior.

Verificam-se algumas tentativas de relacionar propriedades de engenharia a sistemas de classificação dos materiais no perfil de intemperismo. DEARMAN et al.(1978) apresenta relações entre várias propriedades de engenharia e os diferentes graus de intemperismo de rochas graníticas e gnaissicas.

Entretanto, existem muitas limitações na aplicação prática destes sistemas.

DEARMAN et al.(1978) comenta que a utilização de sistemas deste tipo na avaliação de propriedades de engenharia de materiais oriundos de granitos e gnaisses depara-se com dois problemas de imediato:

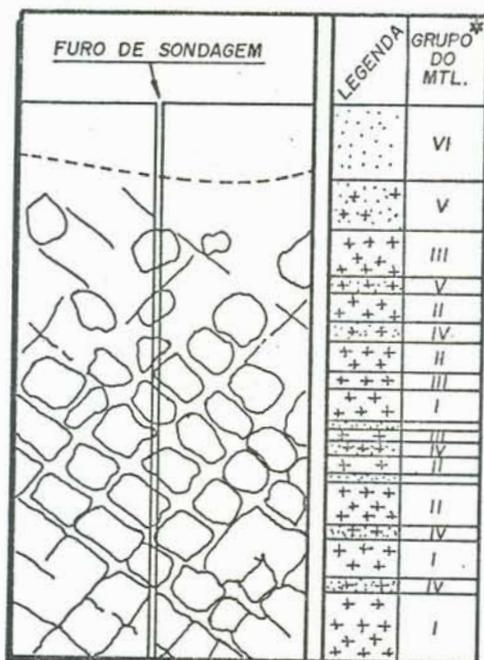
- 1) As propriedades de engenharia não são somente dependentes do grau de intemperismo, outras características estruturais têm forte influência e
- 2) Em todos os sistemas ocorre que, dentro de uma mesma classificação no perfil, as propriedades variam em grande escala, devido a ação gradacional do intemperismo.

Uma importante limitação, discutida por WESLEY (1988), é que muitos destes sistemas não fornecem uma suficiente distinção das camadas superficiais, onde ocorrem os solos que comumente são de maior interesse ao engenheiro. O contrário verifica-se com o sistema de classificação por horizontes, pois foi idealizado para classificar camadas superficiais e portanto não abrange os materiais do estágio inicial do intemperismo.

Outra questão importante é que os sistemas, pelas suas apresentações simplificadas, induzem a se imaginar um perfeito verticalismo e ascendência do intemperismo. BRAND (1982) ilustra a variação dos materiais encontrados em um furo de sondagem vertical executado no perfil de intemperismo de um granito em Hong Kong (figura 2.1.3.1).

DEERE & PATON (1971), entre outros, verifica que uma das maiores dificuldades na classificação dos materiais está no limite que envolve solos saprolíticos e saprólitos, isto é, solo de alteração e rocha alterada. A identificação depende muito do critério adotado.

Além da caracterização dos materiais dentro do



\* Grupos para classificação dos materiais

GRUPO	GRAU DE DECOMPOSIÇÃO DA ROCHA	ASPECTOS DIAGNOSTICOS EM AMOSTRAS E TESTEMUNHOS
VI	SOLO	Textura da rocha não reconhecida; camada superficial contém húmus e raízes vegetais.
V	COMPLETAMENTE DECOMPOSTA	Rocha toda decomposta, mas com textura ainda reconhecível.
IV	ALTAMENTE DECOMPOSTA	Grandes fragmentos que podem ser facilmente quebrados e desagregados com as mãos.
III	MODERADAMENTE DECOMPOSTA	Grandes fragmentos (p.ex. testemunhos de sonda rotativa) que não podem ser quebrados com as mãos.
II	LEVEMENTE DECOMPOSTA	Resistência próxima a da rocha sã; existe leve descoloração.
I	ROCHA Sã	

FIGURA 2.1.3.1 - Variação dos materiais ao longo de um furo de sondagem em um perfil granítico de Hong Kong (BRAND, 1982)

perfil, a classificação dos diferentes perfis é muito importante. Neste sentido, o auxílio da Pedologia com seus sistemas de classificação de perfis, representados nas cartas de solos, é muito promissor. Os perfis são classificados em unidades taxonômicas, levando em conta todos os fatores de formação dos solos.

## 2.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DE ROCHAS GRANÍTICAS E GNAISSICAS

### 2.2.1 - Granulometria

Característica física tradicionalmente reconhecida como fundamental na identificação e classificação dos solos. Entretanto, muitos autores têm destacado que, no caso de solos tropicais e subtropicais, o emprego da granulometria na estimativa de propriedades não é válida. Existem vários estudos que procuram justificar esta peculiaridade em discordância com os solos de clima temperado.

Razões associadas a sensibilidade destes materiais a técnicas de preparo das amostras dos ensaios granulométricos e a presença de agentes cimentantes são muito citadas.

BRAND & PHILLIPSON (1985) e MASSEY et al.(1989) comentam a necessidade de cuidados especiais no destorroamento das amostras de solos saprolíticos granulares de granitos e gnaisses, pela presença de grãos de feldspatos friáveis. Existem opiniões no sentido de se efetuar ostensivo destorroamento destes materiais para se evitar dispersões nos resultados (CASTRO, 1974 e SANDRONI, 1985).

Outro problema reside na determinação da real fração argila destes solos. IRFAN (1988) comenta que a quantidade de argila estimada por microscopia é bem maior que a verificada em ensaios granulométricos. Este fato manifesta-se tanto para solos saprolíticos como para os lateríticos; nos primeiros, a argila está fortemente presa aos minerais primários e nos últimos, cimentações pelos sesquióxidos de ferro e alumínio criam fortes ligações macro e microestruturais, dificultando a dispersão química da argila (GIDIGASU, 1972; TOWNSEND, 1985; RAO et al., 1988 e VARGAS, 1988).

Questões referentes aos procedimentos de ensaios granulométricos são muito discutidas na literatura. Entre elas podemos citar: o mérito do peneiramento seco versus peneiramento úmido, a inclusão de grãos de até 2 mm nas amostras para o ensaio de sedimentação, a redução no tempo de dispersão de solos saprolíticos pouco intemperizados e a inadequabilidade do ensaio de sedimentação para os solos micáceos.

Os aspectos comentados convergem à dificuldade em se determinar a real distribuição granulométrica dos solos saprolíticos e lateríticos. Correlações relacionadas a granulometria, desenvolvidas para solos sedimentares, geralmente não são válidas para solos formados por intemperismo de clima tropical (LOHNES & DEMIREL, 1973 e GIDIGASU, 1974).

No entanto, a variação da granulometria ao longo do perfil ajuda a se avaliar a evolução do intemperismo atuante.

LUMB (1962) verifica que, com o aumento do intemperismo, a distribuição granulométrica dos solos de granitos de Hong Kong tende a tornar-se bi-modal. A fração arenosa quartzosa mantém-se relativamente inalterada, enquanto que os feldspatos tornam-se progressivamente mais finos, caracterizando a outra fração.

RADWAN (1988), na caracterização de um solo granítico do Egito, observa o aumento da porcentagem de finos com a distância da rocha de origem, refletindo o aumento no grau de intemperismo.

DAVISON DIAS (1987b), no estudo de perfis de solos oriundos de granito de Porto Alegre classificados como podzólico vermelho-amarelo, verifica as seguintes frações granulométricas médias:

FRACÇÕES GRANUL. ;	HOR B ;	HOR C ;
AREIAS (%)	30	50
SILTE (%)	22	38
ARGILA (%)	48	12

O significativo aumento do teor de argila no horizonte B é justificado pelos processos de iluviação e de intemperismo in situ dos silicatos.

CRUZ, A.L.G. (1988), caracterizando solos dos

horizontes B e C dos granitos e migmatitos de Porto Alegre para fins de emprego para solo-cimento, verifica a distribuição granulométrica destes materiais em sete jazidas estudadas. Em termos médios tem-se:

FRACÇÕES GRANUL.	HOR B	HOR C
PEDREGULHO (%)	3	5
AREIA GROSSA (%)	12	12
AREIA MEDIA (%)	14	23
AREIA FINA (%)	19	23
SILTE (%)	22	26
ARGILA (%)	30	11

### 2.2.2 - Plasticidade

Assim como o tamanho das partículas, as características de plasticidade avaliadas pelos Limites de Consistência de Atterberg são classicamente utilizadas na classificação dos solos.

Novamente, o comportamento peculiar dos solos tropicais e subtropicais faz com que muitas das tradicionais correlações entre propriedades geotécnicas e parâmetros de plasticidade não sejam satisfatórias.

As principais razões que limitam o emprego dos limites de Atterberg para solos tropicais e subtropicais parecem estar ligadas aos procedimentos de ensaios, frequentemente criticados na literatura (GIDIGASU, 1972; SANDRONI, 1985 e WESLEY, 1988). Entre as principais questões discutíveis, envolvendo os ensaios de limites de Atterberg, tem-se: a pseudo-plasticidade no ensaio do limite de liquidez (escorregamento do material ao invés de deformar-se no aparato de Casagrande), muito significativa em solos micáceos (RUDOCK, 1967 e CARVALHO, 1985); os métodos de preparação das amostras, relacionados ao grau de secagem e destorroamento (NUDELMANN, 1980; NOVAIS-FERREIRA & VIANA DA FONSECA, 1988 e VARGAS, 1988) e à "cura" das amostras (CASTRO, 1974); e a forma de alteração do teor de umidade nos ensaios.

Uma outra questão, destacada por BRAND & PHILLIPSON (1985), é a pouca valia dos dados de limites de consistência de

solos saprolíticos grossos, para os quais a porcentagem da fração mais fina ensaiada é pequena em relação ao todo.

Apesar de todos esses aspectos negativos a respeito dos limites de Atterberg, o grande acervo de dados e a experiência adquirida referente a estes parâmetros, mesmo em solos tropicais, fazem com que existam opiniões no sentido de que tais ensaios não sejam rejeitados. Frost, citado por WESLEY (1988), chama a atenção para se obter procedimentos corretos de ensaio, ao invés da rejeição dos mesmos. Alerta-se que a posição relativa à linha A no Gráfico de Plasticidade de Casagrande não é praticamente influenciada pelos procedimentos de tratamento das amostras.

VARGAS (1988) também considera a necessidade de se continuar contando com propriedades-índices, como os limites de Atterberg, que apresentam valores independentes do estado natural do solo, afetado pelas condições ambientais.

Como uma informação complementar aos limites de consistência, de grande importância a solos tropicais e subtropicais, tem-se sugerido a análise mineralógica tanto da fração fina como da grosseira (BRAND & PHILLIPSON, 1985). Entretanto, a análise das argilas requer procedimentos elaborados e custosos (difração de raio X e análise termo-diferencial), pouco viáveis à realidade brasileira em ensaios de rotina fora do âmbito da pesquisa.

Portanto, torna-se útil o emprego da Atividade Coloidal de Skempton para a avaliação indireta e aproximada do tipo de argilo-mineral da fração fina de solos argilosos, geralmente do horizonte B. Para estes materiais, VARGAS (1988) sugere a Classificação de Casagrande em conjunto com o Gráfico de Atividade de Skempton, com a finalidade de incluir a influência dos argilo-minerais e a natureza mineral da fração silte na classificação de solos tropicais e subtropicais finos. Outro trabalho nesta área é apresentado por YUDHBIR & SAHU (1988). Contudo, é interessante o comentário em MEDINA (1989) para o fato de que a porcentagem inferior a 2 micras considerada no cálculo da atividade deveria ser relacionada ao material do ensaio passante na peneira n. 40 e não à toda amostra (como estabelecido por Skempton a partir de argilas sedimentares).

VARGAS (1953), analisando a plasticidade dos solos de diferentes litologias do sudeste do Brasil, observa que a maioria dos solos de granitos e gnaisses situam-se abaixo da linha A. Já os solos saprolíticos de granitos estudados em Hong Kong situam-se em torno da linha A, notadamente acima dos valores de Vargas. A atividade de Skempton destes solos graníticos os enquadra no grupo de atividade normal, característico de solos caoliniticos.

DAVISON DIAS (1987) verifica que solos do horizonte B de perfis de granitos da região de Porto Alegre encontram-se próximos a linha A. Segundo critérios pedológicos de avaliação, estes solos são classificados como ligeiramente plásticos a plásticos e ligeiramente pegajosos a pegajosos. Apresentam consistência úmida friável a firme, indicando um teor de umidade natural próximo ao limite de plasticidade.

Descrevendo perfis típicos do sul do Brasil, DAVISON DIAS (1988) caracteriza o perfil pedológico podzólico vermelho-amarelo oriundo de granito e encontra os seguintes valores médios para os limites de Atterberg e atividade coloidal de Skempton:

PARAMETROS DE PLASTICIDADE	HOR B	HOR C
LIMITE DE LIQUIDEZ - W <sub>l</sub> (%)	54	44
LIMITE DE PLASTICIDADE - W <sub>p</sub> (%)	36	37
INDICE DE PLASTICIDADE - IP (%)	18	7
ATIVIDADE COLOIDAL - A <sub>c</sub>	0.37	0.58

CRUZ, A.L.G. (1988), para os solos de granitos e migmatitos de Porto Alegre, verifica características de plasticidade. Os valores médios dos parâmetros encontrados são:

W <sub>l</sub> /W <sub>p</sub> /IP	HOR B	HOR C
W <sub>l</sub> (%)	53	43
W <sub>p</sub> (%)	32	30
IP (%)	21	13

### 2.2.3 - Macro e Microestrutura

A estrutura de um solo é o conjunto das características morfológicas e físicas do seu arranjo de

partículas no estado indeformado, tanto na escala macro como micrométrica. O comportamento dos solos tropicais e subtropicais é grandemente controlado pela estrutura, originada dos processos geológicos e pedológicos do intemperismo. Ao contrário dos solos sedimentares de clima temperado, cujo comportamento é regido pela "história de tensões" (conceito fundamental na Mecânica dos Solos clássica), os solos lateríticos e saprolíticos apresentam propriedades regidas pela "história de alteração in situ" e decorrentes manifestações estruturais (CRUZ, P.T., 1987).

Estas manifestações estruturais podem ser divididas em:

- Macroestruturas

Discerníveis a olho nú e inerentes ao processo de intemperismo atuante. Podem ser de origem geológica ou pedológica. São exemplos: superfícies de fraqueza, falhas, disposição dos grãos, vazios, aglomeração dos grãos, descontinuidades e as cores;

- Microestruturas

Discerníveis somente com o auxílio de microscópio. Estão relacionadas as características físico-químicas dos minerais e produtos de alteração.

Vargas, segundo SANDRONI (1985), coloca que descrições estruturais (envolvendo macro e microestruturas) ao lado de uma caracterização genética (com a quantificação dos processos de intemperismo) seriam valiosos na composição com sistemas convencionais de classificação dos solos. Isto é justificado pelo fato de que muitas vezes solos de mesma classificação geotécnica apresentam comportamentos bem diferentes, de acordo com suas particularidades estruturais (NOGAMI, 1976).

Entretanto, a interpretação das propriedades em função da estrutura do solo é muito dificultada pela heterogeneidade dos processos de intemperismo atuantes em um perfil, tanto ao longo da profundidade como horizontalmente. Um exemplo deste fato, pode ser dado por um solo formado de um granito, rocha relativamente isotropa e homogênea, que pode

apresentar feições estruturais muito heterogêneas e anisótropas devido a condições desuniformes de intemperismo na massa de solo. Tal aspecto é chamado a atenção por IRFAN (1988), ao estudar a variabilidade dos arranjos estruturais de solos saprolíticos de granito de Hong Kong.

Por outro lado, o intemperismo pode transformar estruturalmente os materiais de modo a eliminar o efeito de características estruturais da rocha de origem. Um exemplo neste sentido é verificado para alguns solos saprolíticos de gnaiss do Rio de Janeiro, onde estudos desenvolvidos pela PUC-RJ mostram que o elevado grau de intemperismo destes solos elimina o efeito da anisotropia estrutural (evidente no gnaiss de origem) sobre a resistência e compressibilidade (CAMPOS, 1989).

Apesar da heterogeneidade e variedade nas características estruturais, a influência destas sobre solos tropicais, segundo VAUGHAN et al.(1988), marca basicamente as seguintes mudanças no comportamento:

- Solos predominantemente argilosos deixam de ter densidade e características de pré-adensamento dependentes da "história de tensões" e
- Solos predominantemente arenosos deixam de ter propriedades somente dependentes da densidade inicial.
- Em ambos, outras variáveis, como a cimentação, têm papel importante.

Uma das manifestações microestruturais mais importantes e de grande efeito no comportamento, tanto de solos lateríticos como de saprolíticos, é a cimentação. Ela pode resultar em feições macroestruturais, com a formação de agregados compostos de partículas cimentadas.

MITCHEL & SITAR (1982) salienta a importância das cimentações verificadas em horizontes mais intemperizados, devido ao acúmulo de sesquióxidos e a presença de minerais hidratados. Estas cimentações, segundo os autores, fazem com que muitos solos tropicais apresentem maiores resistências e mais baixa compressibilidade, além de afetarem diretamente a distribuição granulométrica, a plasticidade, o arranjo dos

vazios, a drenagem dos perfis e as propriedades de compactação.

Segundo VAUGHAN et al.(1988), o efeito da cimentação confere a um solo residual tropical um comportamento análogo ao de um solo sedimentar pré-adensado.

Estudos executados para avaliar o efeito das cimentações no comportamento dos solos residuais são apresentados por MACCARINI (1989). É investigado o comportamento sob compressão de um solo artificial, do qual as variáveis estruturais (vazios, grau de cimentação e outras) são controladas, e comparado a solos naturais.

A cimentação também é considerada responsável pelo aparecimento de interceptos de coesão em envoltórias de resistência drenadas, independente da porosidade do material e em situações de poropressão negativa desprezível (VAUGHAN et al., 1988).

O papel dos sesquióxidos nas cimentações, principalmente em solos lateríticos e plínticos (concrecionados), é comentado por TOWNSEND et al.(1971), RAO et al.(1988) e GIDIGASU (1974).

Enquanto os solos dos horizontes lateríticos apresentam sua estrutura ligada aos processos pedogenéticos, como por exemplo a cimentação por sesquióxidos, os solos saprolíticos mostram a microestrutura ligada à mineralogia e aos processos de intemperismo atuantes na rocha de origem e a macroestrutura relacionada principalmente às descontinuidades reliquias (fraturas, zonas de fraqueza, intrusões e outras).

A existência de estruturas reliquias de ordem geológica em saprolitos e solos saprolíticos faz com que muitos raciocínios da Mecânica das Rochas sejam aplicados a estes materiais (CRUZ, P.T., 1989).

Os aspectos mineralógicos envolvidos na microestrutura de solos saprolíticos e seus efeitos nas propriedades de engenharia, como resistência ao cisalhamento e comportamento tensão-deformação, têm sido pesquisados para os solos graníticos de Hong Kong (IRFAN,1988 e MASSEY et al,1989).

A cor, encarada como característica estrutural macroscópica, pode servir de indicativo do grau de intemperismo e hidratação dos sesquióxidos. Nos horizontes superficiais, em geral, as cores avermelhadas e amareladas são relacionadas aos

materiais lateríticos, os mosqueados são indícios de solos mal drenados, as cores cinzentas são associadas aos processos de redução dos óxidos de ferro e cores mais escuras evidenciam a presença de matéria orgânica. Nos horizontes saprolíticos, as cores, manchas e mosqueados são derivados da rocha de origem e de seu intemperismo, estes solos dificilmente apresentam cores únicas homogêneas (NOGAMI, 1970).

Um fato importante, é a necessidade da quantificação das diferentes formas estruturais dos solos.

VAUGHAN et al.(1988) chama a atenção que a quantificação da microestrutura mineralógica torna-se muito difícil pela influência do intemperismo sobre aglomerações de grãos com resistências e alterações muito variáveis.

Quanto a quantificação da macroestrutura, DAVISON DIAS & GASPARIN (1986), estudando solos lateríticos, procura indexá-la através do ensaio de Estabilidade de Agregados de Yoder, de uso difundido na Pedologia. DAVISON DIAS (1989) sugere a análise tátil-visual, usando procedimentos padrões da Pedologia, para a descrição da macroestrutura de origem pedológica.

## 2.3 - PROPRIEDADES GEOTECNICAS DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DE GRANITOS E GNAISSES

### 2.3.1 - Compressibilidade

Propriedade muito importante na geotecnia, principalmente na engenharia de fundações, a compressibilidade dos solos tropicais e subtropicais de rochas cristalinas, como granitos, gnaisses e migmatitos, está relacionada a vários fatores, abordados ao longo das considerações que seguem.

Nos diferentes estudos pesquisados sobre a compressibilidade destes solos, as características mais evidentes são:

- Os solos saprolíticos são, em geral, menos compressíveis que solos sedimentares de mesma classificação clássica (LUMB, 1962 e DEARMAN et al., 1978);
- Os solos dos horizontes superficiais apresentam

valores de compressibilidade muito relacionados à estrutura de origem pedogenética (DAVISON DIAS, 1987 e 1989);

- Geralmente são solos bem permeáveis, apresentando rápida dissipação de poropressão e recalques a curto prazo (LUMB, 1962; SOWERS, 1963; RUDOCK, 1967; DEARMAN et al., 1978; DAVISON DIAS, 1987 e 1989; entre outros) e
- A existência de um pré-adensamento virtual (VARGAS, 1951; SOWERS, 1963; RUDOCK, 1967; MILITITSKY, 1985; DAVISON DIAS, 1987 e 1989; NOVAIS-FERREIRA & VIANA DA FONSECA, 1988; BLIGHT, 1989; entre outros).

VARGAS (1951) introduz o conceito de pré-adensamento virtual. Afirma que, estabelecido a partir de solos sedimentares, o conceito de pressão de pré-adensamento perde o significado para solos residuais de rochas cristalinas. O fenômeno de adensamento não integra os processos de formação destes solos. Logo, para estes solos residuais, o valor de pressão verificado em ensaios oedométricos, abaixo do qual observa-se proporcionalidade entre os decréscimos no índice de vazios e os acréscimos das pressões aplicadas na razão logarítmica, foi definido por Vargas como "pressão de pré-adensamento virtual".

VARGAS (1970) apresenta as principais causas para a pressão de pré-adensamento virtual em solos residuais de intemperismo tropical:

- Secamento das camadas superiores, causando um efeito de pré-adensamento devido a tensões capilares;
- Cimentação dos grãos por argilas e sesquióxidos de ferro e
- Tensões residuais da rocha de origem.

DAVISON DIAS (1987 e 1989) chama a atenção para a macroestrutura de origem pedológica como um fator do pré-adensamento virtual, associada à sucção e à cimentação por sesquióxidos de ferro e alumínio (pré-adensamento químico).

Para os solos saprolíticos de rochas cristalinas, SOWERS (1963) relaciona o pré-adensamento virtual às ligações

minerais herdadas da rocha e às tensões surgidas do processo de intemperismo e das conseqüentes variações volumétricas.

Um fato importante é que, em geral, a pressão de pré-adensamento virtual não é muito claramente definida nas curvas dos logaritmos das pressões aplicadas versus índices de vazios (DAVISON DIAS, 1987 e BLIGHT, 1989). Além do mais, este parâmetro não relaciona-se satisfatoriamente com o índice de vazios inicial e a profundidade.

A outra característica bastante peculiar aos solos tropicais e subtropicais de granitos e gnaisses é a rapidez nos recalques.

Na maioria das vezes, o fenômeno de adensamento é pouco significativo, isto é, grande parte dos recalques não são diferidos no tempo, conforme preconiza a Teoria Clássica do Adensamento de Terzaghi. Os ensaios oedométricos realizados são mais corretamente denominados de ensaios de compressão confinada (DAVISON DIAS, 1987b).

Em função disso, DAVISON DIAS (1987 e 1989) comenta que são encontradas dificuldades na determinação do Coeficiente de Adensamento ( $C_v$ ) em solos tropicais e subtropicais bem drenados. É curto o espaço de tempo em que é processada a compressão primária, mesmo em solos ensaiados em condições de inundação.

SOWERS (1963) verifica que dois terços da redução do índice de vazios, em solos saprolíticos permeáveis e com grau de saturação de 50 a 70 %, ocorre instantaneamente. Além da permeabilidade e parcial saturação, observa-se que a distorção elástica também constitui uma das causas da grande velocidade dos recalques nestes solos, embora de menor importância. Essa característica permite que, em certos casos, o tempo para cada incremento de carga nos ensaios de compressão confinada seja reduzido (RUDOCK, 1967).

É importante chamar a atenção para o fato de que, muitas vezes, os solos saprolíticos têm suas características de drenagem associadas a descontinuidades residuais, dificilmente representadas em pequenas amostras. Logo, as reais velocidades dos recalques comumente apresentam-se muito diferentes das previstas pelos ensaios oedométricos em pequenas amostras.

As características de compressibilidade, quantificadas pelos índices de recompressão e compressão, são muito variáveis para esses solos tropicais e subtropicais de granitos e gnaisses. São relacionadas a diferentes fatores, entre os quais destacam-se: heterogeneidade do intemperismo, macroestrutura de origem pedológica, sucção, índice de vazios inicial e conteúdo de minerais micáceos.

CRUZ, P.T. (1989) comenta que a heterogeneidade provocada pelos diferentes graus do intemperismo em solos saprolíticos e saprólitos resulta em compressibilidades variáveis e, conseqüentemente, na distribuição desuniforme das pressões verticais atuantes nas diferentes fases dos materiais.

RAO et al.(1988) e BLIGHT (1989) discutem a grande influência da cimentação por sesquióxidos na compressibilidade de solos tropicais. Este efeito da cimentação e também da sucção são susceptíveis ao grau de saturação (MITCHEL & SITAR, 1982; TOWNSEND, 1985 e NOVAIS-FERREIRA & VIANA DA FONSECA, 1988).

Uma tentativa de emprego de ensaios oedométricos na identificação das tensões de "quebra" das cimentações (VAUGHAN et al., 1988 e MACCARINI, 1989) é apresentada por MASSEY et al.(1989).

O índice de vazios inicial apresenta algumas boas correlações com a compressibilidade, embora de valor local e relacionadas a materiais de mesma origem e composição (MILITITSKY, 1985). Uma relação desenvolvida para solos de rochas cristalinas do sudeste dos Estados Unidos (entre elas granitos e gnaisses) por SOWERS (1963), entre o índice de compressão (Cc) e o índice de vazios inicial (e), é:

$$C_c = 0.75 (e - 0.55) \quad (2.3.1.1)$$

Os pontos acima da reta de correlação são associados a solos com maior conteúdo de mica e abaixo da reta a altos teores de caolinita e quartzo na composição.

Outra característica influenciada pela ocorrência de mica na fração fina é o comportamento de recuperação sob descarregamento, como verificado para os solos saprolíticos das rochas graníticas estudadas por RUDOCK (1967).

A macroestrutura de origem pedológica afeta muito a compressibilidade dos horizontes superficiais. DAVISON DIAS (1987 e 1989) comenta que alguns solos lateríticos apresentam grandes deformações com pequenos acréscimos de carga, devido a instável estruturação.

As clássicas relações entre o limite de liquidez e o índice de compressão, geralmente apresentam grande dispersão para solos tropicais e subtropicais (MILITITSKY, 1985). Entretanto, algumas formulações são encontradas, como por exemplo:

$$C_c = 0.005 (LL + 22) \pm 0.1 \quad (2.3.1.2)$$

obtida por VARGAS (1974) para alguns solos lateríticos mais porosos.

Quanto a avaliação da compressibilidade, MILITITSKY (1985) comenta que através de ensaios de laboratório, em geral, são previstos recalques significativamente maiores que os reais. Contudo, NUDELMANN (1980), estudando a compressibilidade de um solo de migmatito de Porto Alegre, verifica que os valores estimados que mais aproximaram-se aos dados experimentais foram aqueles obtidos por ensaios laboratoriais (entre eles, ensaios oedométricos).

Ainda outro aspecto que deve ser levado em conta quando é analisado o perfil de intemperismo na sua totalidade, é o fato de que os materiais desde a rocha sã até os saprólitos são também deformáveis, é claro que em escala bem menor. A deformabilidade destes materiais, regida pela Mecânica das Rochas, é dada em termos do Módulo de Young, visto que as deformações têm algum caráter elástico. São poucos os dados existentes, mas por exemplo, para granitos são esperados valores de módulos de Young variando de  $2 \times 10^3$  a  $7 \times 10^3$  MN/m<sup>2</sup> decrescendo em função do grau de intemperismo (DEARMAN et al., 1978). O fraturamento tem grande influência e impede a generalização dos dados.

### 2.3.2 - Colapsividade

O colapso estrutural de um solo tropical e subtropical, ao qual são atribuídos os recalques adicionais verificados devido a inundação, segundo BARDEN et al. (1973), é

condicionado a(o):

- Parcial saturação do solo;
- Nivel de tensões a que é submetido e
- Rompimento das cimentações

A avaliação do colapso pode ser feita pelo Coeficiente de Colapso Estrutural ( $i$ ), segundo VARGAS (1974), expresso pelo quociente entre a variação no índice de vazios com a inundação e o índice de vazios inicial somado da unidade. Segundo Vargas, os solos são considerados colapsíveis quando o coeficiente de colapso for superior a 0.02.

MILITITSKY (1985) apresenta uma classificação da severidade do problema da colapsividade, atribuída a Jennings e Knight, em função de um coeficiente de colapso ( $C_p$ ) idêntico ao de Vargas. Os critérios são:

$C_p$	SEVERIDADE DO PROBLEMA
0 - 0.01	nenhuma
0.01 - 0.05	problema moderado
0.05 - 0.10	problemático
0.10 - 0.20	muito problemático
> 0.20	excepcionalmente problemático

DAVISON DIAS (1987b), avaliando a colapsividade de solos de horizontes lateríticos e saprolíticos de granito, verifica valores altos, superiores a 7% para os lateríticos e de 3 a 4% para os saprolíticos, em níveis de tensões de 16 a 200  $\text{kN/m}^2$ . A baixa colapsividade dos solos lateríticos é atribuída a forte estruturação e também a drenagem destes solos, que mesmo sob fortes chuvas impede a inundação efetiva dos macroporos e portanto, o colapso no seu estado natural. É mantida uma estrutura instável, sujeita ao colapso em situações de inundação fora do normal ("artificial") (VARGAS, 1974).

Entretanto, nem todos solos lateríticos apresentam-se colapsíveis. A sensibilidade estrutural é fator determinante, ligada a intensidade de lixiviação. Em certo grau, esta lixiviação pode formar uma estrutura chamada de aberta ou metaestável, bastante sensível (BRINK & KANTEY, 1961; MITCHEL & SITAR, 1982 e DAVISON DIAS, 1989).

Também os solos saprolíticos tendem a apresentar

colapsividade ligada a características estruturais. NOVAIS-FERREIRA & VIANA DA FONSECA (1988) comentam que critérios indicativos do grau de colapsividade baseados somente na granulometria, índice de vazios e grau de saturação são inconsistentes.

VARGAS (1974) chama a atenção para o fato de que a partir de um certo nível de tensões não se observa colapso significativo. Considera que, acima de determinados valores das pressões aplicadas, são destruídas as ligações estruturais, tendo a inundação pouco efeito na dissolução das cimentações e/ou meniscos capilares.

### 2.3.3 - Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento dos materiais integrantes de um perfil de intemperismo de rochas, como as graníticas e as gnaissicas, é influenciada por diferentes fatores, que são variados em função do grau intemperismo. Os mecanismos atuantes que condicionam a falha do material são também função do intemperismo (DEARMAN et al., 1978).

Na rocha sã, a resistência é governada pelas suas propriedades estruturais intrínsecas, estudadas pela Mecânica das Rochas.

Nos primeiros estágios do intemperismo, a resistência ao cisalhamento passa a ser controlada, principalmente, pela resistência das discontinuidades. Modelos são desenvolvidos no sentido de quantificar a resistência ao cisalhamento oferecida nas juntas, zonas de fraqueza estrutural e outras discontinuidades (p. ex. DEERE & PATON, 1971). Aspectos relacionados a influência de slickensides, argilas e outros materiais preenchendo estas discontinuidades devem ser levados em conta. A localização destas zonas de fraqueza, nos seus diferentes graus de alteração, não é uma tarefa fácil, depende da intensidade do programa de investigação e de conhecimentos básicos de geologia estrutural.

Com o avanço do intemperismo, a resistência ao cisalhamento dos solos saprolíticos passa a condicionar o comportamento mecânico do perfil. Entretanto, as discontinuidades reliquias presentes na massa de solo ainda exercem grande influência (IRFAN & WOODS, 1988; SOWERS, 1963;

BLIGHT, 1989; SANDRONI, 1985 e DEARMAN et al., 1978).

Já os solos pertencentes aos horizontes superficiais possuem propriedades de resistência muito ligadas aos processos pedológicos de formação (processos de laterização, gleização, plintização e outros). De maneira geral, a resistência é dada por uma estrutura de grãos resistentes (geralmente de quartzo) em uma matriz fina de argila e outros produtos de decomposição (DEARMAN et al., 1978).

MILITITSKY (1985) resume os principais fatores dos quais depende a resistência ao cisalhamento de solos lateríticos e saprolíticos, são eles:

- Estrutura;
- Grau de intemperização;
- Composição química e mineralógica e
- Grau de saturação.

Nota-se que estes fatores são diferentes daqueles mais importantes para solos sedimentares de clima temperado (porcentagem de finos, pré-adensamento, densidade relativa, entre outros).

Em função disso, alguns aspectos peculiares devem ser considerados e investigados para projetos envolvendo estes solos tropicais e subtropicais. SANDRONI (1985) relaciona alguns desses:

- Ocorrência de estruturas reliquias com resistência menor que a massa de solo saprolítico;
- Resistência anisotrópica;
- Condição de parcial saturação, comum nestes solos, envolvendo questões de sucção e perda desta com a saturação;
- Curvatura da envoltória de resistência;
- Influência do intemperismo (principalmente na estrutura destes solos);
- Efeitos de amostragem e
- Influência do tipo de ensaio de resistência ao cisalhamento (em função das velocidades e trajetórias de carregamento).

As estruturas reliquias, além de difíceis de

localizar, constituem situações mais complexas para a amostragem e para a execução de ensaios. Em muitos casos, a resistência do material de enchimento das descontinuidades tem grande influência na ruptura ao longo destas estruturas reliquias (SANDRONI, 1985).

Outra característica que, como as estruturas reliquias, ocasiona heterogeneidades na resistência da massa de solo é o intemperismo diferencial, comentado por SOWERS (1963). Observações neste sentido são também apresentadas por CAMPOS (1989) para os solos de gnaisses do Rio de Janeiro, e IRFAN (1988) e MASSEY et al. (1989) para os solos de granitos de Hong Kong.

A resistência anisotrópica é relacionada às descontinuidades estruturais e feições anisotrópicas da própria rocha-mãe (p. ex. diaclasamento e orientação preferencial de minerais). É o caso de gnaisses, rocha macroscopicamente anisotrópica. Entretanto deve-se considerar que a forte atuação do intemperismo pode tornar desprezível os efeitos anisotrópicos dos solos formados (SANDRONI, 1985).

A condição de parcial saturação da maioria dos solos saprolíticos e lateríticos de rochas granito/gnaissicas tem grande influência na resistência ao cisalhamento destes solos. Considerações a este respeito são apresentadas por LUMB (1962), BRAND (1982), HO & FREDLUND (1982), SANDRONI (1985), GIDIGASU (1988) e DAVISON DIAS (1987, 1988 e 1989). Um equacionamento da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados é dado por FREDLUND et al. (1978).

A sucção é proveniente das forças capilares, da água absorvida e da água associada a estrutura do solo. Ela está intimamente relacionada ao teor de umidade e ao grau de saturação, condicionando a resistência às condições ambientais. A determinação do teor de umidade crítico no qual se tem a resistência mínima torna-se importante, mas é dependente de ensaios de sucção, os quais ainda não constituem métodos rotineiros na prática de engenharia. DAVISON DIAS (1988) registra a estimativa da sucção através do ensaio de Placa de Sucção (Panela de Sucção). Técnicas mais sofisticadas para o estudo da sucção, empregadas para solos tropicais em Hong Kong, são comentadas por BRAND (1982).

Os principais fatores que afetam a relação teor de umidade versus sucção são: mineralogia, composição granulométrica, estrutura e temperatura. A granulometria e a mineralogia influenciam na natureza dos cátions e da superfície das partículas. A estrutura tem influência principalmente quando a sucção é de origem capilar. Estudos relacionados ao efeito da composição e estrutura dos solos graníticos sobre as características de sucção, apresentados por YONG et al.(1982), concluem que a maior susceptibilidade do comportamento mecânico ao teor de umidade é verificada naqueles materiais com baixas quantidades de partículas mais finas de argila e material amorfo.

Além destes fatores, DAVISON DIAS (1989) alerta para o fato de que é extremamente difícil precisar o valor do teor de umidade e a correspondente sucção que vai ser crítica na situação de campo.

HO & FREDLUND (1982) destacam que a sucção tem um importante papel na estabilidade de taludes de solos graníticos em Hong Kong, aumentando a "coesão" dos materiais. Segundo os autores, a redução da sucção com o grau de saturação é uma das principais causas pela qual a instabilidade de taludes daquele país está associada a fortes chuvas.

SANDRONI (1985) comenta que a redução no intercepto de coesão, devido a perda da sucção por inundação, é clara em ensaios a altas tensões confinantes. Em níveis baixos de tensões, outros efeitos, como a destruição de cimentações, podem mascarar a influência da sucção.

As macro e microestruturas decorrentes do processo de intemperismo têm grande influência nos mecanismos que regem a resistência. Esta influência não é somente explicada pelo índice de vazios natural, densidade e tamanho de grãos, envolve relações estruturais mais complexas.

IRFAN (1988) e MASSEY et al.(1989) comentam, nos seus estudos sobre solos saprolíticos de granitos de Hong Kong, que parte da resistência ao cisalhamento verificada a baixas deformações e sob baixas tensões é uma função das cimentações residuais e secundárias (surgidas com os processos de intemperismo), das propriedades das partículas minerais

primárias e de alteração que compõe o solo (resistência e porosidade) e dos seus arranjos (ou "empacotamentos"). Estas características são relacionadas à estrutura da rocha de origem e à história de intemperismo do perfil. Também o limite superior destas baixas tensões e deformações mencionadas é função do intemperismo atuante (forma e intensidade), variando grandemente em pequenas áreas.

A estrutura dos solos, por sua heterogeneidade e complexidade, motiva modelos mais simplificados na tentativa de se entender o comportamento mecânico dos solos ao longo do perfil de intemperismo.

SOWERS (1963), estudando a relação entre o índice de vazios inicial e parâmetros de resistência ao cisalhamento para solos saprolíticos, verifica que as dispersões, relacionadas principalmente à coesão, são associadas à estrutura do solo. Os estudos do autor revelam que a coesão verdadeira, devido grande parte à cimentação, apresenta maiores valores junto a solos com índices de vazios intermediários, tal que a microestrutura tenha influência significativa na massa de solo e ao mesmo tempo o esqueleto estrutural possa absorver expansões dos minerais sob intemperismo.

Baseado nas relações entre o grau de laterização e a coesão, LOHNES & DEMIREL (1973) apresenta a variação da coesão com o intemperismo, dividida em três fases:

- 1a) A rocha intemperiza-se, aumenta o índice de vazios e decresce a coesão;
- 2a) O processo de argilização é imperante, o índice de vazios tende a decrescer e a coesão a aumentar e
- 3a) A laterização, através da cimentação por sesquióxidos, provoca um significativo aumento na coesão.

DAVISON DIAS (1987b e 1989) verifica que solos lateríticos e saprolíticos bem estruturados (com estrutura estável) podem apresentar "picos" de resistência (nas curvas tensão cisalhante versus deformação) em ensaios de cisalhamento direto, até mesmo sob condição de inundação. CAMPOS (1989) também destaca "picos" devido a estruturação de solos

saprolíticos, originada por cimentações químicas e herdadas da rocha.

Verificando este mesmo peculiar "comportamento pré-adensado" sob cisalhamento direto, LOHNES & DEMIREL (1973) chama de "pressão de colapso" a tensão normal na qual o solo deixa de assumir este comportamento. Para os solos lateríticos estudados pelos autores, verifica-se que a pressão de colapso cresce com a laterização, sugerindo que estas características de pré-adensamento são conseqüências da estruturação relacionada à cimentação por sesquióxidos.

Envoltórias de resistência com certa curvatura são características em solos tropicais.

SOWERS (1963) comenta que as envoltórias de resistência em termos de tensões totais e efetivas, para amostras saturadas e não saturadas de solos saprolíticos de rochas cristalinas, apresentam uma concavidade em baixas tensões confinantes (segundo o autor, inferiores a  $200 \text{ kN/m}^2$ ).

SANDRONI (1985) considera que o comportamento errático das envoltórias a baixas tensões (segundo este autor, inferiores a  $100 \text{ kN/m}^2$ ) é justificado pela variabilidade das cimentações nas amostras, influência da sucção, perturbação das amostras, entre outros. Para tensões mais elevadas, comenta que a linearidade da envoltória é satisfatória.

A curvatura das envoltórias a baixos níveis de tensões é nitidamente pronunciada nos solos de granito de Hong Kong ensaiados por CHEUNG et al. (1988) e MASSEY et al. (1989). É atribuída ao comportamento dilatante e à cimentação destes solos.

O efeito da amostragem sobre a resistência ao cisalhamento está ligada a problemas de perturbação das amostras e heterogeneidades nos materiais lateríticos e saprolíticos amostrados.

Devem ser adotados cuidados na coleta, transporte e armazenamento das amostras, com a finalidade de se evitar perturbações na estrutura e alterações no teor de umidade. Caso contrário, podem vir a resultar em errôneas avaliações da resistência e de outras propriedades. Implicações quanto ao alívio de tensões são inevitáveis.

A heterogeneidade na massa de solos tropicais e

subtropicais exige que sejam tomadas precauções quanto a representabilidade da amostragem. DAVISON DIAS (1988) comenta que em horizontes lateríticos, aparentemente homogêneos, é possível a presença de concreções por sesquióxidos, além de variações estruturais e no teor de umidade dentro de um mesmo bloco de amostra indeformada. Heterogeneidade até mesmo mais pronunciada é verificada em solos saprolíticos de rochas graníticas, conforme chamam a atenção IRFAN (1988) e MASSEY et al. (1989).

Dentre os ensaios de laboratório empregados na avaliação da resistência ao cisalhamento de solos tropicais e subtropicais de granitos, gnaisses e migmatitos, ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais consolidados não-drenados com medida de poropressão são os mais utilizados.

Ensaio de cisalhamento direto são preferidos no caso de solos com fração areia grossa ou pegregulho (comum em solos saprolíticos graníticos), pois a moldagem de corpos de prova para ensaios triaxiais fica muito dificultada (MILITITSKY, 1985).

DAVISON DIAS (1988) comenta que os ensaios de cisalhamento direto, por serem mais repetitivos, possibilitam um maior número de amostragens e ensaios, o que favorece o estudo de solos lateríticos e saprolíticos heterogêneos.

CHEUNG et al. (1988) apresenta um estudo de avaliação da resistência ao cisalhamento dos solos de granitos de Hong Kong através do ensaio de cisalhamento direto. Salienta que, apesar das limitações práticas e teóricas do ensaio, ele oferece algumas vantagens sobre os ensaios triaxiais. Os autores enfatizam que os triaxiais, em geral, são mais dispendiosos em tempo e custo, além disso conduzem a certas dúvidas quanto à perturbação da amostra decorrente da saturação por contrapressão em baixas tensões de confinamento e quanto à determinação acurada da área da seção transversal da amostra em altas deformações axiais. Sobre o ensaio de cisalhamento direto é colocado que, embora apresente fortes restrições teóricas (rotação das tensões principais, falha progressiva e, em geral, a impossibilidade de medir-se poropressões), simula bem as condições de baixas tensões normais e de inundação, além de

apresentar condições de deformação que, muitas vezes, são mais representativas da maioria das rupturas de taludes. Quanto a rotação das tensões principais, verifica que esta restrição tem pouco significado onde a anisotropia do solo não é acentuada.

Baseado nestes fatos, estes pesquisadores justificam o emprego de ensaios de cisalhamento direto como procedimento rotineiro na avaliação da resistência ao cisalhamento dos solos tropicais de granitos em Hong Kong, saprolíticos ou dos horizontes superficiais.

Contudo, algumas precauções quanto à utilização do cisalhamento direto em solos de granitos e gnaisses são citadas na literatura. A maioria delas, dizem respeito às feições estruturais de alguns destes solos que podem condicionar a zonas de fraqueza nas amostras, não solicitadas pelo plano de cisalhamento pré-estabelecido neste tipo de ensaio (BRAND & PHILLIPSON, 1985).

Uma outra questão importante, é a grande dificuldade em se obter amostras saturadas para a determinação de parâmetros efetivos por medida de poropressão em solos lateríticos e saprolíticos parcialmente saturados (MILITITSKY, 1985; SANDRONI, 1985; CHEUNG et al, 1988 e DAVISON DIAS, 1988).

As amostras são praticamente impossíveis de saturar por inundação, exigindo a aplicação de contrapressões em triaxiais. O efeito da perturbação na estrutura das amostras pela aplicação de altas contrapressões é bastante discutido. O artifício representa condições muito mais severas que aquelas encontradas no campo.

Uma interessante compilação de um grande número de dados de resistência ao cisalhamento de rochas alteradas e solos dos horizontes B e C de granitos e gnaisses, é apresentada por DEARMAN et al.(1978). A partir destes dados, os autores chegaram as seguintes conclusões:

- Solos saprolíticos de granitos são, na maioria das vezes, solos arenosos bem drenados com ângulos de atrito em termos efetivos entre 30 e 40 graus. Os relativamente altos ângulos de atrito estão relacionados à estrutura do solo, que consiste de grãos angulares resistentes, encaixados e contendo dentro do esqueleto formado partículas de argila e

silte (produzidas pela decomposição dos feldspatos) (LUMB,1962). Concluem que os valores de coesão (de ate  $75 \text{ kN/m}^2$ ) são geralmente ligados à sucção, desaparecendo com a total saturação.

- Solos saprolíticos de gnaisses tendem a valores menores de ângulos de atrito, de 25 a 30 graus, provavelmente devido a alta proporção de minerais lamelares orientados (com menor ângulo de atrito interno) que induzem a planos de fraqueza.
- Solos dos horizontes superficiais de granitos e gnaisses possuem propriedades de resistência muito variáveis, comandadas por vários fatores.

LUMB (1962) verifica valores de coesão de até  $100 \text{ kN/m}^2$  para amostras não saturadas de solos saprolíticos graníticos de Hong Kong. Comenta a grande influência das características físicas, como grau de saturação, índice de vazios e granulometria nas propriedades de resistência.

RADWAN (1988) apresenta as propriedades de resistência ao cisalhamento do solo formado de um granito da localidade de Aswan, no Egito, avaliadas por meio de ensaios de cisalhamento direto. Os resultados mostram um decréscimo do ângulo de atrito com o índice de vazios. A coesão apresenta valores significativos para o horizonte superficial, pela maior quantidade de argila, e junto a rocha intemperizada, pela cimentação herdada da rocha. A inundação provoca uma redução no ângulo de atrito e uma perda quase total da coesão.

NOVAIS-FERREIRA & VIANA DA FONSECA (1988) investiga as propriedades de resistência de um solo saprolítico arenosiltoso de granito, empregando ensaios triaxiais e cisalhamento direto. Características de pré-adensamento virtual (verificadas em ensaios oedométricos) foram confirmadas pela curvatura da envoltória de resistência. Este fato, tanto como os valores de coesão efetiva encontrados, são atribuídos à cimentação das partículas pelo processo de intemperismo e são susceptíveis ao amolgamento.

Para os solos de granitos e migmatitos da região de Porto Alegre, encontram-se estudos de NUDELMANN (1980) e DAVISON DIAS (1987b).

DAVISON DIAS (1987b) aborda o comportamento de perfis podzólicos vermelho-amarelo com substrato granito, por meio de ensaios de cisalhamento direto. "Picos" de resistência são observados nos ensaios, tanto na umidade natural como inundados, e são atribuídos ao pré-adensamento virtual e ao grau de estruturação.

Os parâmetros médios obtidos para os solos destes perfis são:

HORIZ condição	COESÃO c (kN/m <sup>2</sup> )	ANGULO DE ATRITO Ø (graus)
HOR B		
natural	45.5	35
inundado	32.0	28
HOR C		
natural	43.5	34
inundado	29.2	30

NUDELMANN (1980) investigando um solo de migmatito de Porto Alegre (situado no Campus Vale da UFRGS), encontra os seguintes parâmetros de resistência, obtidos por ensaios de cisalhamento direto lentos:

Condição	c (kN/m <sup>2</sup> )	Ø (graus)
natural	40 - 92	29 - 32
inundado	30 - 32	30

### 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 - DEFINIÇÃO DA ÁREA

A área deste estudo geotécnico compreende o município de Porto Alegre, situado na porção leste do estado do Rio Grande do Sul, à margem esquerda do chamado Rio Guaíba (melhor caracterizado como Lago Guaíba, como consta em OLIVEIRA, 1981).

A área territorial do município é 497 km<sup>2</sup>. Apresenta limites com alguns dos municípios integrantes da região metropolitana: Guaíba, Triunfo, Canoas, Cachoeirinha, Alvorada e Viamão.

As maiores concentrações urbanas da cidade localizam-se na zona centro-norte e ao longo do eixo central leste-oeste. A zona sul e o extremo norte apresentam menores densidades populacionais.

#### 3.2 - CLIMA E VEGETAÇÃO

O clima da região metropolitana de Porto Alegre é típico subtropical. A temperatura média anual é superior a 18 graus centígrados e a precipitação média anual de 1400 mm. Os meses mais chuvosos são setembro (150 mm) e junho (140 mm), o mais seco é novembro (66 mm).

A vegetação predominante, observada no interior do município menos urbanizado do município, é o campo. Segundo RADAMBRASIL (1986), toda a região metropolitana situa-se em uma zona de transição entre duas coberturas vegetais típicas do estado: a Savana e a Floresta Estacional, caracterizando uma área de tensão ecológica.

#### 3.3 - GEOMORFOLOGIA

Assim referiu-se AB' SABER (1965) :

"Dentre as aglomerações urbanas que, à altura dos meados deste século, alcançaram um desenvolvimento espacial notável e adquiriram um aspecto tentacular e metropolitano, raras são aquelas que possuem um sítio urbano tão complexo e diversificado como Porto Alegre".

Realmente, em Porto Alegre o Escudo Cristalino Sul-Riograndense se faz presente abrangendo cerca de 65 % da área do município, constituindo o relevo forte de morros, coxilhas e formas residuais. Em contraste, a Planície Costeira também se apresenta nas terras baixas da margem direita do Lago Guaíba, formando parte de sua porção interna.

Segundo estudos apresentados em METROPLAN (1978) para a geomorfologia da região metropolitana, caracterizando compartimentos geomorfológicos, no município manifestam-se três destes compartimentos: relevo forte ondulado, ondulado e plano.

### 3.3.1 - Relevo Forte Ondulado

Compreende os terrenos mais elevados (cota > 80 m) e mais inclinados. Abrange os diversos morros de Porto Alegre (Morro Santa Teresa, Morro da Polícia, Morro Teresópolis, Morro da Tapera, Morro das Abertas, Morro do Osso, Morro do Leão, Morro São Pedro, Morro Boa Vista, Morro do Cego e outros), formados dos granitos, gnaisses e migmatitos. Nestes morros predominam as vertentes convexo-retilíneo-côncavas.

### 3.3.2 - Relevo Ondulado

Terrenos com cota entre 20 e 60 metros, que constituem as coxilhas e as formas residuais de relevo localizadas em grande parte nas margens do Lago Guaíba, originando uma série de pontas (Ponta da Serraria, Ponta da Pedra Redonda, Ponta dos Cachimbos, Ponta Grossa e Ponta do Leblon são as principais). Também abrange as zonas de passagem do relevo forte ondulado para as terras baixas, através de rampas com declividades médias suaves.

### 3.3.3 - Relevo Plano

Contornando as áreas de relevo ondulado, são os terrenos que apresentam como característica morfológica a presença de planícies aluviais, de terraços fluviais e lacustres, dos banhados e do conjunto de ilhas do delta do Rio Jacuí.

### 3.3.4 - Drenagem

A drenagem nas áreas de litologia cristalina é de padrão dentrítico regular, com possibilidade de bons aquíferos em zonas intensamente tectonizadas.

Nas áreas de sedimentos, a densidade de drenagem varia de baixa a regular, com melhores características em níveis conglomeráticos e arenosos. As águas subterrâneas são expressivas nos níveis de contato com o embasamento.

## 3.4 - GEOLOGIA

Destacam-se no município duas unidades geológicas bastante distintas: o Embasamento Cristalino do Escudo Sul-Riograndense e os Sedimentos Quaternários do Grupo Patos.

### 3.4.1 - Embasamento Cristalino

GONI et al. (1962) denominou Formação Cambai a um conjunto de migmatitos, gnaisses e corpos graníticos de boa parte do Escudo Cristalino. A designação de Grupo Cambai foi proposta por JOST & VILLWOCK (1966) devido a grande complexidade litoestrutural destas rochas.

Estudos posteriores, relatados em RADAMBRASIL (1986), restringem o já chamado Complexo Cambai à parte oeste do Escudo Sul-Riograndense, não mais abrangendo a área de estudo. É descrito para região a ocorrência do Complexo Canguçu e encravada neste a Suite Intrusiva Arroio dos Ladrões.

A denominação Complexo Canguçu foi proposta para a intrincada associação de gnaisses, migmatitos e granitóides do Pré-Cambriano que constituem os Blocos Encruzilhada do Sul e Dom Feliciano. A litologia do complexo, segundo RADAMBRASIL (1986), está representada por diatexitos (migmatitos onde o processo de metamorfização provoca uma fusão completa ou quase completa da rocha, tal que porções fundidas e não fundidas não podem ser distingüidas petrograficamente) e metatexitos (migmatitos formados por fusão parcial, onde as porções fundidas e não fundidas podem ser distingüidas).

A Suite Intrusiva Arroio dos Ladrões é representada por vários corpos graníticos isolados com denominações locais,

entre os quais, segundo IBGE (1986), os Granitos Santana, Independência, Ponta Grossa e Cantagalo de Porto Alegre, mapeados por SCHNEIDER et al. (1974). Constitui um conjunto de rochas graníticas do período Cambroordoviciano que ocorrem no leste do Escudo Sul-Riograndense, de diferentes aspectos texturais e petrográficos e de coloração variada entre cinza-claro e rosa-claro.

No entanto, estudos ainda mais recentes, onde destaca-se FRAGOSO CESAR (1986), associam o substrato cristalino de Porto Alegre a uma unidade geotectônica de grande expressão, o Batólito Pelotas. O autor define a ocorrência principal de duas suites de granitóides na região:

- Suite Pinheiro Machado, que compõe-se de biotitas granitóides acinzentados e localmente róseos, porfiríticos e subordinadamente equi a inequigranulares, de granulometria grosseira a fina, petrograficamente predominam monzogranitos e granodioritos. Associados ocorrem septos metamórficos (gnaisses e xistos).
- Suite Dom Feliciano, formada por corpos alongados de granitos equigranulares, avermelhados a róseos, de granulometria média a grosseira e subordinadamente fina, petrograficamente são sienogranitos e alcali-feldspato granitos.

SCHNEIDER et al. (1974) apresenta o levantamento mais específico da área de estudo, a Folha Geológica de Porto Alegre, que detalha as rochas cristalinas da cidade. Entretanto, verifica-se que definições mais atuais, envolvendo o Complexo Canguçu e a Suite Intrusiva Arroio dos Ladrões e também o Batólito Pelotas, são posteriores ao mapeamento da Folha, que ainda associa estas rochas ao Grupo Cambai.

Os corpos graníticos mapeados pela Folha, como comentado, são associados à Suite Arroio dos Ladrões por RADAMBRASIL (1986). Já os migmatitos mapeados são associados ao Complexo Canguçu, contudo ainda são estas rochas alvo de discussões conceituais pelos geólogos. O conceito empregado no mapeamento da Folha para o termo migmatito, relatado em estudos preliminares, diz: "misturas indecifráveis de gnaisses e

granitos, e todos os gnaisses que adquiriram por injeção magmática ou metassomatose, um fácies essencialmente feldspático".

Trabalhos geológicos de campo inicialmente realizados na região metropolitana a luz de novos conceitos, já permitiram distinguir corpos graníticos relacionados às Suítes Dom Feliciano (Granito Santana e Granito Ponta Grossa) e Pinheiro Machado (Granito Independência), pertencentes ao Batólito Pelotas.

Em resumo, é da opinião de todos os geólogos consultados que a relativa complexidade da área exige uma atualização do mapeamento geológico existente, sob conceitos mais atuais e com detalhe tanto a nível litológico como estrutural.

Apesar das limitações, a Folha de Porto Alegre (1974) constitui um elemento único e vital neste estudo geotécnico, pois coloca numa escala adequada (1:50000) a geologia do município. As unidades geológicas individualizadas pelo levantamento são descritas nos próximos itens.

#### 3.4.1.1 - Migmatitos

São divididos em homogêneos e heterogêneos.

##### Migmatitos homogêneos

São os mais extensivos na área. A litologia mais comum são os embrechitos.

Embrechitos são rochas porfiroblásticas, com grandes fenoblastos de microclínio róseo e cinza e onde a xistosidade é conservada bem nítida. A matriz varia de granito subalcalino até dioritos quartzíticos. Os minerais essenciais são microclínio, plagioclásios e quartzo.

Mineralmente semelhantes aos embrechitos, variando na granulação, estrutura e textura, são também encontrados anatexitos. São migmatitos cuja orientação é difusa ou de contornos pouco nítidos.

As principais ocorrências são na Vila Indio Jarí, em Belém Velho e em Belém Novo.

##### Migmatitos heterogêneos

Aqueles onde as porções graníticas e metamórficas

formam fases distintas. Ocorrem associados aos embrechitos.

São epibolitos (rochas onde a porção granitóide forma leitões ou lentes paralelos à xistosidade da porção metamórfica), diadisitos (rochas onde a porção granitóide forma filonetes que recortam a xistosidade da porção metamórfica) e agmatitos (rochas onde a porção xistosa forma blocos circundados por material granitóide). A porção metamórfica é um biotita-xisto, tendo como minerais predominantes a biotita, epidoto, plagioclásios e quartzo. A porção granitóide é composta de quartzo, microclínio e oligoclásio, e constitui emaranhados na forma de vênulas, diques e lentes de granulação variadíssima.

Os principais locais de ocorrência destes migmatitos são: Vila Ipiranga, Três Figueiras, Vila Jardim, Vila Bom Jesus, Glória e Aparício Borges.

#### 3.4.1.2 - Corpos Graníticos

São divididos em cinco tipos principais, com denominações locais: Granito Santana, Granito Independência, Granito Ponta Grossa, Granito Cantagalo e Granito Granófiro.

##### Granito Santana

Corpo granítico de forma alongada, tectonicamente controlado por falhas, formando uma estrutura do tipo muralha.

É um granito alásquítico, alcalino a subalcalino, de cores claras, constituído essencialmente de feldspatos potássicos róseos e esbranquiçados e fortemente quartzítico.

##### Granito Independência

Unidade litológica dividida em duas áreas principais de ocorrência: uma maior ocupando o centro urbano de Porto Alegre e outra na parte baixa do bairro Alto Petrópolis.

Varia de um granito monzonítico a granodiorito, de cor rósea clara a cinza azulada. Apresenta foliação gnaissódica, localmente isótropo. É constituído essencialmente por quartzo, feldspatos potássicos, plagioclásios, muscovita e biotita. É cortado por inúmeros veios e lentes de granulação fina (aplitos) e grosseira (pegmatitos), sendo estes últimos essencialmente muscovíticos.

##### Granito Ponta Grossa

Com ocorrência em faixa sinuosa, é um granito subalcalino a monzonítico, isótropo, de granulação média a

grosseira e de tonalidade rosea-avermelhada. Os minerais essenciais são: microclinio, quartzo, oligoclásio e biotita.

Associados ocorrem veios aplíticos e pegmatóides.

#### Granito Cantagalo

Petrograficamente semelhante ao Granito Ponta Grossa, no entanto, possuindo granulação mais grosseira e feldspatos alcalinos apresentando-se em fenocristais.

#### Granito Granófiro

Rocha granítica porfiróide com matriz granófira. Ocorrência restrita às proximidades do bairro Jardim Leopoldina.

#### 3.4.1.3 - Diques de Riolito e Diabásio

O complexo granito-migmatítico é cortado por um grande número de diques de rochas ácidas. Destacam-se riolitos de coloração rosada, pórfiros, com fenocristais de quartzo e feldspato alcalino avermelhado e com matriz de micro a criptocristalina. Também são encontrados diques de microgranitos, de textura essencialmente granófira.

Relacionados a Formação Serra Geral, aparecem diques de diabásio de cores cinza-escuro e esverdeado, compostos principalmente de plagioclásios e piroxênio.

#### 3.4.2 - Sedimentos Quaternários

Pertencentes ao Grupo Patos que, conforme RADAMBRASIL (1986), abrange as formações do Pleistoceno e também aquelas mais recentes do Holoceno.

##### 3.4.2.1 - Pleistoceno

Os episódios transgressivo-regressivos que ocorreram durante o Pleistoceno deixaram vestígios marcantes em toda a região metropolitana, sob a forma de depósitos de natureza litorânea, lagunar, eólica, fluvial e coluvionar.

Na Folha Geológica de Porto Alegre são associados ao Pleistoceno três formações distintas: Formação Itapoã, Formação Guaíba e Formação Graxaim.

##### Formação Itapoã

Depósitos de areias quartzozas de granulação fina a média com matriz argilosa, pouco consolidadas e bem selecionadas. Considerados paleodunas.

#### Formação Guaíba

Depósitos fluviais representativos da resposta continental às flutuações do nível do mar. São constituídos de areias (grossas, médias e finas) e conglomerados, intercalados com lâminas areno-argilosas. Restritos a vales aluviais encaixados nos terrenos mais antigos.

#### Formação Graxaim

São sedimentos argilo-areno-conglomeráticos e argilas esverdeadas. São depósitos de fluxo de detritos, localmente com estrutura fluvial e recobertos por mantos coluvionares.

#### 3.4.2.2 - Holoceno

São sedimentos areno-argilosos aluvionares que ocorrem ao longo das várzeas da rede de drenagem e feixes de restinga, localizados nas margens sul e sudeste do Lago Guaíba.

#### 3.4.2.3 - Alterito Serra de Tapes

Também chamado Intemperismo Serra de Tapes, são paleossolos ferralitizados, eluvionares e coluvionares, interrelacionados e interdigitados lateralmente com a Formação Graxaim. Localizam-se na periferia dos terrenos do Embasamento Cristalino, em cunhas nas vertentes dos morros e coxilhas. Desenvolvem-se das litologias cristalinas. São contemporâneos a Formação Graxaim.

### 3.5 - PEDOLOGIA

Ciência que estuda os solos, a Pedologia, desenvolvida pela Agronomia, vem sendo recentemente empregada na geotecnia. Atualmente assume o conceito de parte das Ciências do Solo que trata mais especificamente da caracterização, gênese e classificação (KLAMT, 1989).

Por meio de uma caracterização sistemática de perfis de solos superficiais, a Pedologia trabalha com dados significativos sobre composição, gênese, características físicas, morfológicas e ambientais dos solos. Estes dados são muito importantes a um entendimento do processo evolutivo e conseqüentes características mecânicas dos solos formados do intemperismo, predominantemente químico, das rochas da região. A Pedologia classifica os solos segundo unidades de mapeamento compostas de perfis com características semelhantes.

Segundo RADAMBRASIL (1986) e BRASIL (1973), os solos encontrados em Porto Alegre são classificados pedologicamente como: Podzólicos Vermelho-Amarelo, Litólicos, Cambissolos, Planossolos, Gleis e Solos Aluviais.

### 3.5.1 - Podzólicos Vermelho-Amarelo

São solos minerais não hidromórficos, isto é, formados em condições de boa drenagem, que apresentam uma seqüência de horizontes A, B e C.

Caracteriza-se por um horizonte B textural, no qual existe uma considerável iluviação de argila, evidenciada pela relação textural A/B e pelo recobrimento das superfícies das unidades estruturais por filmes de material coloidal. Pode apresentar plintitas (misturas argilosas altamente intemperizadas) ricas em sesquióxidos e mosqueadas vermelho-escuro. É geralmente argiloso, com macroestrutura de origem pedológica de moderada a fortemente desenvolvida.

Na sua maioria são solos pouco profundos e bem drenados, apresentando argila de atividade baixa.

Ocorrem em áreas de relevo suave ondulado até o forte ondulado, abrangendo colinas, outeiros e morros. Originam-se do intemperismo dos granitos, gnaisses e migmatitos.

Segundo BRASIL (1973), estes solos são relacionados à unidade denominada Camaquã.

### 3.5.2 - Litólicos

Compreendem solos minerais pouco desenvolvidos e rasos. Possuem um horizonte A diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C, geralmente com muito material de rocha em decomposição.

O horizonte A comumente apresenta porções elevadas de frações grosseiras e, por vezes, penetra no horizonte C na forma de línguas ou bolsas.

Apresentam-se bem drenados e com características morfológicas, físicas e químicas muito variáveis em função do material de origem.

Os solos litólicos de granitos, gnaisses e migmatitos da região ocorrem nas áreas de relevo ondulado até montanhoso e, geralmente, aparecem associados com cambissolos e podzólicos

vermelho-amarelo.

Segundo BRASIL (1973), estes solos são relacionados à unidade Pinheiro Machado.

### 3.5.3 - Cambissolos

São solos minerais, não hidromórficos, de coloração bruno-avermelhada e de seqüência de horizontes A, B e C.

O horizonte B insipiente apresenta fraca a moderada macroestrutura e comumente teores elevados de silte. O baixo gradiente textural entre horizontes é característico.

Os cambissolos formados das rochas da região são pouco expressivos e caracterizam-se por solos rasos, com textura cascalhenta, podendo apresentar mosqueados. Ocorrem associados aos solos litólicos e podzólicos vermelho-amarelo.

Em termos de evolução pedogenética dos solos da região, pode-se dizer que esta classe constitui uma fase intermediária na evolução de um perfil litólico a um podzólico vermelho-amarelo.

### 3.5.4 - Planossolos

São solos hidromórficos, típicos das áreas baixas onde ocorre excesso de água, permanente ou temporário, que resulta no desenvolvimento de perfis com cores cinzentas, indicativas de gleização (fenômeno de redução dos óxidos de ferro). Mosqueados também ocorrem, principalmente em horizontes inferiores, onde a presença de água é marcante.

Em geral, são solos mal ou imperfeitamente drenados, com seqüência de horizontes A, B e C. O horizonte B apresenta elevada concentração de argila por ação iluvial, comumente de atividade alta. A macroestrutura é fortemente desenvolvida, com presença de cerosidade.

São derivados dos sedimentos aluvionares do Quaternário. Localizam-se nas várzeas ao longo das drenagens e apresentam como principais inclusões solos gleis (nas partes mais abaciadas do relevo) e areias quartzozas (ao longo dos cursos de água).

Segundo BRASIL (1973), são associados à unidade Vacacaí.

### 3.5.5 - Gleis Húmicos e Pouco Húmicos

Solos hidromórficos que caracterizam-se pela presença de um horizonte glei, formado em condições de excesso de umidade e resultando em acentuados processos de redução.

Apresentam seqüência de horizontes A e C (gleizado) e, de um modo geral, argilas de atividade alta nos horizontes subsuperficiais de textura argilosa ou média. Possuem cores cinzentas ou cinzento-oliváceas.

São solos moderadamente profundos, mal drenados e com baixa permeabilidade. Ocorrem em áreas planas, porções deprimidas sujeitas a inundações e nas margens dos cursos de água. Desenvolvem-se desde os sedimentos do Quaternário.

### 3.5.6 - Solos Aluviais

São solos hidromórficos pouco desenvolvidos, compostos por um horizonte A que sobrepõe camadas estratificadas. Por sofrerem freqüentes acréscimos durante inundações, não apresentam desenvolvimento de perfis pedogenéticos.

Variam amplamente em composição química, mineralogia e granulometria. Em geral, predominam condições de má drenagem.

Localizam-se em algumas áreas planas, constituindo as planícies de inundação do Lago Guaíba. Encontram-se materiais com texturas diversas, desde areias quartzozas até argilas, bem como sedimentos orgânicos e turfas. Consistem dos sedimentos lacustres do Holoceno.

Segundo BRASIL (1973), são associados à unidade Guaíba.

#### **4 - MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO**

O trabalho de investigação de unidades geotécnicas para os solos de Porto Alegre, assim como os métodos empregados na avaliação das características e propriedades de engenharia dos solos de intemperismo subtropical, no geral, seguem as diretrizes apresentadas em DAVISON DIAS (1984, 1987 e 1989).

Aplicados anteriormente em estudos envolvendo solos originados de basaltos e arenitos da região do Planalto Riograndense, os métodos de investigação empregados sofreram certas adequações visto as diferentes características da região e dos materiais estudados, principalmente no que diz respeito à origem.

O método de trabalho desenvolvido pode, em linhas gerais, ser dividido em três etapas principais:

- Estudo de escritório;
- Investigação de campo e
- Avaliação das características e propriedades geotécnicas dos materiais.

##### **4.1 - ESTUDO DE ESCRITORIO**

E dividido em: coleta de dados, interpretação das informações e esboço das unidades geotécnicas.

##### **4.1.1 - Coleta de Dados**

Consiste em agrupar as diferentes informações que dizem respeito às condicionantes da formação e ocorrência dos solos da região.

Estas informações são encontradas em levantamentos geológicos, levantamentos pedológicos, cartas topográficas e fotografias aéreas.

Os dados em geral encontram-se dispersos e algumas vezes desatualizados e incompletos. No caso de Porto Alegre,

devido à urbanização, levantamentos pedológicos são deficientes e muito pouco abrangentes, já a topogrametria e o monitoramento aerofotogramétrico são bastante mais completos.

As principais fontes consultadas na obtenção das informações do meio físico necessárias, são apresentadas no quadro 4.1.1.1.

#### 4.1.2 - Interpretação das Informações

Fase na qual os dados obtidos foram analisados, com principal ênfase àquelas informações mais importantes sob o ponto de vista geotécnico.

Os levantamentos geológicos, compreendendo mapas e relatórios, permitem identificar os diferentes substratos que originaram os perfis de solos encontrados no município. Descrevem além da ocorrência, a mineralogia, a textura e as características estruturais (falhas, diaclasamento, foliação e outras) das litologias. Permitem fazer previsões sobre algumas características físicas, mineralógicas e estruturais dos saprólitos e solos saprolíticos decorrentes do intemperismo.

Deve-se ter em mente a constante evolução dos conceitos na Geologia. Em Porto Alegre, algumas das litologias definidas pelo levantamento da Folha de Porto Alegre (1974), são contestadas, ou melhor, redefinidas por opiniões iluminadas por conceitos mais recentes. Entretanto, a respeito da geologia de Porto Alegre, nada de novo foi publicado desde este levantamento de 1974. Ciente destas limitações, os dados utilizados foram encarados dentro do bom senso que essa aplicação exige.

Os levantamentos pedológicos, também compostos por mapas e relatórios, identificam os processos pedológicos atuantes no perfil e classificam os solos, pelos horizontes superficiais A e B, em diferentes unidades pedológicas. Os mapas fornecem a ocorrência e as principais características, e os relatórios caracterizam mais detalhadamente e descrevem perfis típicos das diferentes unidades pedológicas.

Destes levantamentos, são de maior interesse dados físicos (como plasticidade, textura, estrutura e drenagem) e morfológicos (como espessura dos horizontes superficiais, forma de transição entre os horizontes e relevo de ocorrência). A

QUADRO 4.1.1.1 - Principais fontes consultadas no estudo do meio físico de Porto Alegre

---

FOLHA GEOLOGICA DE PORTO ALEGRE -	INSTIT. DE GEOCIÊNCIAS/UFRGS
esc: 1:50000	(1974)
LEVANT. DE RECURSOS NATURAIS -	IBGE
vol.33-Folhas Porto Alegre/Lagoa	
Mirim/Uruguaiana(Proj.RADAMBRASIL)	
esc: 1000000	(1986)
LEVANT. PEDOLÓGICOS PARCIAIS DA -	TRABALHOS DE ALUNOS DO
ZONA SUL DE PORTO ALEGRE (não	POS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
publicados)	(ÁREA DE SOLOS) / UFRGS
esc: 1:100000	(1976 e 1977)
CARTA TOPOGRÁFICA-GEOLOGICA DE -	SECRETARIA MUNIC. DO MEIO-
PORTO ALEGRE (não publicada)	AMBIENTE DE PORTO ALEGRE
esc: 1:25000	(1985)
FOTOGRAFIAS AERÉAS DA REGIÃO DE -	METROPLAN e SECRETARIA
PORTO ALEGRE - vôo 1982	MUNIC. DO MEIO-AMBIENTE DE
esc: 1:20000	PORTO ALEGRE
CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO -	A. W. SCHNEIDER
SUBSOLO DE PORTO ALEGRE	
(1959)	
ESTUDO DE DESTINAÇÃO DO USO DO -	METROPLAN
SOLO RURAL NA REGIÃO	
METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE	
(Ano 1976)	

---

utilização de levantamentos pedológicos para fins geotécnicos é comentada por GANDOLFI et al.(1986), KLAMT (1989), ANTUNES (1989), entre outros.

A topografia constitui um dos principais fatores na formação dos solos, principalmente numa região de contrastes geomorfológicos como Porto Alegre. Com isso, ela foi determinante dos limites de ocorrência dos diferentes perfis de solo, limites estes já inferidos pelos levantamentos pedológicos, porém em escala e abrangência desfavoráveis. Foi importante a investigação da distribuição dos diferentes perfis em função das declividades dos terrenos.

A análise de fotografias aéreas permite investigar padrões de relevo e drenagem, auxiliando os levantamentos topográficos, o acompanhamento da ocupação urbana e a identificação de jazidas e afloramentos de solos e rochas.

Também cabe citar o emprego de simples mapas geográficos e de ruas, úteis na localização e identificação dos pontos de investigação, estabelecendo acessos e referências.

Para a análise conjunta das informações cartográficas, foi necessário transpôr as cartas a uma única escala de trabalho. A escala escolhida foi 1:25000, por representar convenientemente os aspectos analisados.

#### 4.1.3 - Esboço das Unidades Geotécnicas

Consiste no emprego dos dados reunidos e interpretados em um trabalho cartográfico que visa delimitar zonas de ocorrência de solos com perfis de origem e características físicas e morfológicas semelhantes, que constituem as chamadas unidades geotécnicas.

Para o esboço das unidades foi utilizada a técnica de superposição de cartas (por meio de mesa de luz), através da qual cartas geológicas, pedológicas e topográficas foram trabalhadas com o objetivo de originar uma nova carta.

Para uma determinada unidade, a geologia permite inferir as características do horizonte saprolítico e a pedologia aquelas dos horizontes superficiais dos seus perfis típicos. A topografia auxilia na definição dos limites entre as unidades. A observação paralela de fotografias aéreas (por meio

de estereoscopia) esclarece formas de relevo, ocorrência de zonas inundáveis e sob profunda interferência pela ocupação urbana e pontos para a investigação de campo.

Convém destacar que a correta interpretação das características pedológicas e geológicas envolvidas favorece uma satisfatória idealização dos perfis típicos. Contudo, uma complementar investigação de campo é indispensável.

Também a análise de algumas coleções de sondagens de simples reconhecimento auxiliou no estudo de ocorrência das unidades geotécnicas, assim como na concepção de perfis típicos. O emprego sistematizado de sondagens na investigação do subsolo de Porto Alegre é apresentado por SCHNEIDER (1959) e AZEVEDO (1990).

A nomenclatura das unidades geotécnicas foi inspirada nas indicações geológicas e pedológicas. Procurou-se dar através de uma sigla a idéia do perfil típico dos solos encontrados em determinada unidade. As unidades foram identificadas com a sigla do perfil pedológico predominante (segundo a classificação brasileira de solos, estabelecida pelo Serviço Nacional de Levantamento e Classificação de Solos e adotada por RADAMBRASIL, 1986), acompanhada por um índice que indica o substrato. A utilização deste tipo de nomenclatura para a classificação dos solos em geral, com vistas a mapeamento geotécnico tem sido desenvolvida (DAVISON DIAS, 1989).

#### 4.2 - INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

Foram investigados in situ perfis típicos das unidades geotécnicas estimadas em escritório.

Dos perfis investigados, realizaram-se descrições criteriosas de suas características físicas e morfológicas mediante técnicas de análise tátil-visual. Foram seguidas as indicações de LEMOS & SANTOS (1982), que estabelece técnicas de levantamento de campo para solos, comumente empregadas por pedólogos mas também úteis para fins geotécnicos.

De um total de mais de quarenta perfis investigados das unidades de solos subtropicais com substratos granito, gnaisse e migmatito, foram descritos: seqüência, espessura e

forma de transição dos horizontes, além da textura, minerais principais, resquícios estruturais da rocha, macroestrutura e condições de drenagem dos materiais que constituem os perfis.

Estas investigações foram executadas em taludes naturais ou escavações em obras. Estas últimas localizadas principalmente nas zonas centrais da cidade, onde os afloramentos de solos eram obviamente escassos. Também, quando possível, afloramentos rochosos e matacões foram investigados para a identificação do material de origem.

Outras descrições, como a presença do nível freático, tipos de fundações empregadas e a evidência de problemas ou riscos geotécnicos (conseqüências e possíveis causas) são dados importantes que, dentro do possível, acompanharam a investigação.

No campo verificaram-se alguns limites cartográficos estabelecidos para as unidades; foram feitas as necessárias correções. De uma maneira geral, os limites estabelecidos em escritório conferiram em campo, dando indicações da eficácia do método empregado.

Com este trabalho de campo as unidades geotécnicas foram definidas, quanto à distribuição no município e quanto às características físicas e morfológicas dos seus perfis típicos.

#### 4.3 - AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS

Com a definição das unidades geotécnicas, partiu-se para a caracterização e estudo das propriedades de engenharia, com destaque a resistência ao cisalhamento e compressibilidade, daqueles solos lateríticos e saprolíticos que compõe os perfis das unidades com substrato cristalino.

A opção pela investigação destas unidades de solos de intemperismo subtropical, foi motivada pela ocorrência significativa destes solos na região e pela necessidade em se aumentar o conhecimento do comportamento geotécnico destes materiais. Como já foi constatado por vários pesquisadores, estes solos apresentam comportamento diferenciado em relação aos solos sedimentares de clima temperado, sobre os quais foram desenvolvidas as teorias clássicas da Mecânica dos Solos.

Os solos foram amostrados de alguns dos pontos investigados no trabalho de campo. Coletaram-se amostras indeformadas e deformadas dos principais horizontes de cada perfil estudado.

Os ensaios de laboratório empregados foram:

- Granulometria c/ e s/ defloculante (NBR 7181/84)
- ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO
  - Limites de Atterberg
  - Limite de plasticidade (NBR 7180/84)
  - Limite de liquidez (NBR 6459/84)
  - Peso específico real dos grãos (NBR 6508/84)
- ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA
- ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

As amostras deformadas para os ensaios de caracterização foram coletadas em quantidade variável entre 15 e 20 kg por ponto amostrado. Algumas destas amostras foram obtidas a grande profundidade em solos saprolíticos quando coletadas durante escavações de estacas de grande diâmetro.

Executados os ensaios de caracterização, os materiais foram identificados pelos sistemas tradicionais de classificação de solos (SUCS e HRB) e também obtida a classificação textural através do diagrama triangular ou trilinear.

Pequenas porções de alguns dos materiais destinados aos ensaios de caracterização foram reservadas e enviadas ao Instituto de Geociências/UFRGS e ao Departamento de Geociências/UFSC para a análise mineralógica da fração passante na peneira n. 200 por meio de difratograma de raio X.

As amostras indeformadas para os ensaios de cisalhamento direto e compressão confinada foram obtidas pela moldagem em campo dos anéis amostradores próprios para estes ensaios. Estas amostragens foram feitas em taludes naturais e escavações, eliminando-se a capa superficial sujeita a ressecamento, lixiviação e contaminação. A técnica visou substituir a retirada de blocos de amostras indeformadas, em muitos casos dificultada pela rigidez ou pelo caráter fortemente arenoso de alguns dos solos estudados. Cuidados para

se evitar perturbações e modificações no teor de umidade das amostras foram tomados, adotando-se técnicas de parafinamento e conservação em câmara úmida. Em laboratório, tais amostras foram sujeitas a determinações de peso específico e teor de umidade.

Conforme indicado, os ensaios de caracterização foram realizados de acordo com a norma brasileira. Complementarmente, ensaios de granulometria sem o emprego de defloculante foram realizados.

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados em equipamentos Wykeham Farrance com amostras de 6 cm de diâmetro e em média 2.05 cm de altura, na situação de teor de umidade natural e sob inundação.

A velocidade de cisalhamento adotada para todos os ensaios foi 0.024 pol/min (ou 0.010 mm/s).

As tensões empregadas variaram de 16 a 400  $\text{kN/m}^2$ . Realizou-se em média cinco ensaios para cada condição (umidade natural e inundada) por ponto amostrado, em geral, nas tensões verticais de 16, 50, 100, 200 e 400  $\text{kN/m}^2$ .

A opção por ensaios de cisalhamento direto para a avaliação da resistência ao cisalhamento teve por motivos principais:

- A natureza repetitiva do ensaio, que propicia a realização de um maior número de ensaios em mais amostras, aumentando a representabilidade da investigação;
- A permeabilidade destes solos. Os ensaios no teor de umidade natural, representam bem as condições de drenagem no campo;
- A condição de inundação, que bem representa as situações mais desfavoráveis encontradas por estes solos parcialmente saturados e
- A não aplicação de contrapressões na tentativa de saturação completa destes solos. Esta técnica, usada em grande parte dos ensaios triaxiais de rotina, tem efeito comprometedor na estrutura das amostras.

Em resumo, apesar das limitações bem conhecidas do ensaio, mostrou o cisalhamento direto ser adequado para esta pesquisa.

Devido a eficiente condição de inundação propiciada pelo equipamento de cisalhamento direto, procurou-se avaliar, antes do cisalhamento das amostras inundadas, a colapsividade dos solos. As deformações adicionais decorrentes da inundação das amostras carregadas com diferentes pressões verticais foram medidas.

A compressibilidade foi avaliada por ensaios oedométricos, também executados com amostras no teor de umidade natural e inundadas.

Utilizou-se amostras de 5 cm de diâmetro e em média 1.9 cm de altura, submetidas a tensões verticais de 12.5 a 3200 kN/m<sup>2</sup>. Os estágios de carga tiveram duração reduzida para até 4 horas em virtude da rapidez verificada nos recalques, principalmente nos solos saprolíticos mais arenosos e permeáveis. Para a fase de descarregamento, estágios com 2 horas de duração foram adequados em todos os casos.

Além dos tradicionais parâmetros de compressibilidade (índices de recompressão e compressão), optou-se pela adoção de um parâmetro único para a fase de carregamento do ensaio de compressão confinada. Este denominado de índice de compressibilidade (C), é calculado para cada estágio de carga e dado por:

$$C = \frac{\Delta e}{\log (p_f/p_i)} \quad (4.3.1)$$

onde:  $\Delta e$  = variação no índice de vazios

$p_i$  e  $p_f$  = valores das pressões inicial e final do estágio

Para a fase de descarregamento foi adotado o usual índice de descompressão ( $C_d$ ), tomado o valor médio para todos os estágios desta fase.

Quando da investigação de afloramentos rochosos encontrados nas unidades geotécnicas, em alguns casos foi oportuna a coleta de amostras das rochas. Estas amostras foram enviadas ao Instituto de Geociências da UFRGS, a cargo do professor geólogo Luís Fernandes, onde foram submetidas à análise mineralógica por meio de lâminas delgadas.

Todo este extenso programa experimental resultou na coleta de cerca de 390 amostras e em termos de ensaios totalizou:

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Granulometria: 90 ensaios em 45 amostras

Limites de Atterberg: 45 ensaios em 45 amostras

Peso específico dos grãos: 45 ensaios em 45 amostras;

ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA: 55 ensaios em 23  
pontos amostrados;

ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: 46 ensaios em um  
total de 227 amostras para  
26 pontos amostrados;

ANALISE MINERALÓGICA EM ROCHAS: 3 amostras em lâmina  
delgada;

ANALISE MINERALÓGICA DAS ARGILAS: 8 amostras.

## 5 - UNIDADES GEOTÉCNICAS PARA PORTO ALEGRE

### 5.1 - APRESENTAÇÃO

Com a aplicação do método de investigação exposto anteriormente, identificou-se as unidades geotécnicas para o município de Porto Alegre.

Foram trabalhadas em detalhe aquelas unidades de solos subtropicais originados das rochas cristalinas da região. A unidade formada pelos solos sedimentares das formações geológicas do Quaternário e sedimentos recentes foi apenas individualizada.

De maneira geral, devido às características de maior resistência ao intemperismo apresentadas pelas rochas predominantemente ácidas (ricas em sílica) que compõe o Escudo Cristalino, nota-se um menor desenvolvimento pedogenético nos perfis de solos subtropicais da região, em comparação com os perfis formados das rochas básicas imperantes na Serra Geral.

Em virtude deste fato, destaca-se em Porto Alegre a importância dos solos saprolíticos em relação aos horizontes superficiais, nos perfis formados do intemperismo dos granitos, gnaisses e migmatitos. Logo, dentro do método de investigação de unidades geotécnicas adotado, a geologia tomou um destaque especial, constituindo o primeiro indicador na identificação das mesmas.

A complexidade litológica, característica de todo o Escudo Cristalino, resulta numa variedade muito grande de solos saprolíticos. Este fator dificulta em muito o trabalho de identificação das unidades e alerta para uma maior atenção às características geológicas da região.

Pesquisas anteriores, apresentadas por DAVISON DIAS (1990), para os solos do Planalto Riograndense originados de basalto, riolito e arenitos, e ocorrendo sob a forma de perfis pedogeneticamente mais evoluídos (principalmente latossolos),

mostram a pedologia como principal indicador das unidades geotécnicas para estes materiais.

A representação cartográfica das unidades geotécnicas é apresentada no anexo.

Para o município de Porto Alegre foram identificadas sete unidades geotécnicas de solos de intemperismo subtropical, em função das principais litologias e perfis pedológicos ocorrentes na área. São elas:

- Rg** - Solos em perfis litólicos, oriundos das litologias graníticas:
- Rg(g.PG)** - formados das rochas que compõe o Granito Ponta Grossa;
  - Rg(g.S)** - formados das rochas que compõe o Granito Santana;
  - Rg(g.I)** - formados das rochas que compõe o Granito Independência;
  - Rg(g.Cg)** - formados das rochas que compõe o Granito Cantagalo.
- Rm** - Solos em perfis litólicos, oriundos dos migmatitos.
- PVg** - Solos em perfis podzólicos vermelho-amarelo, formados das rochas que compõe o Granito Ponta Grossa, Granito Santana, Granito Independência e Granito Cantagalo. O perfil litólico associado indica a origem predominante.
- PVm** - Solos em perfis podzólicos vermelho-amarelo, formados dos complexos migmatitos.
- PVpf(AST)** - Solos em perfis podzólicos vermelho-amarelo, formados dos paleossolos ferralitizados de origem coluvionar e eluvionar, chamados de Alterito Serra de Tapes.

As unidades geotécnicas de solos litólicos (Rg e Rm), além dos perfis pedológicos de mesmo nome, apresentam como inclusão aqueles perfis pedologicamente classificados como cambissolos e podzólicos vermelho-amarelo onde o horizonte B é muito pouco espesso e portanto, de pouca importância em termos geotécnicos.

As unidades de solos podzólicos vermelho-amarelo

agrupam quase exclusivamente os perfis pedológicos de mesmo nome.

A unidade geotécnica formada pelos solos hidromórficos originados das formações sedimentares do período Quaternário (Graxaim, Itapuã e Guaíba) e dos aluviões recentes, é simbolizada por HID. Nesta unidade, as classes pedológicas encontradas são planossolos, gleis e aluviões.

A carta representa a ocorrência das unidades, em forma isolada ou em associações. As principais características estruturais de caráter geológico, como falhas, diques e corpos quartzíticos, foram também representadas, em função da importância geotécnica destas manifestações. Complementam a carta, as principais vias e meios hídricos e a indicação dos pontos de investigação da pesquisa.

Constitui um levantamento a nível exploratório, no sentido de que basea-se fundamentalmente no trabalho de escritório junto às outras cartas. Entretanto, a investigação de campo não deixou de ter grande valor no estudo cartográfico, indicando a boa aproximação nas unidades estabelecidas e até mesmo servindo à aferição dos limites das mesmas.

As características e propriedades dos solos que compõe as unidades geotécnicas, determinadas desde o estudo de escritório, investigação de campo e ensaios de laboratório, são apresentadas nos itens que seguem.

## 5.2 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO PONTA GROSSA - PVg e Rg(g.PG)

### 5.2.1 - Investigação

Destas unidades investigaram-se dez perfis, dentre os quais, três foram amostrados para ensaios em laboratório. Estes perfis, localizados na zona centro-sul do município, são identificados como:

CD - CIDADE DE DEUS

AS - ALDEIA SOS

CL - CORREA LIMA

A identificação completa dos pontos amostrados é dada pela tabela 5.2.1.1.

Uma análise mais detalhada em termos do perfil de intemperismo foi feita para o perfil CD, de onde amostras de várias profundidades foram coletadas.

### 5.2.2 - Características Fisico-Morfológicas dos Perfis

Os perfis são, em geral, pedologicamente pouco desenvolvidos, com predominância dos horizontes saprolíticos.

Os perfis podzólicos vermelho-amarelo (PVg) apresentam um horizonte B de pequena espessura (embora não desprezível), com vestígios de algum transporte de curta distância. Este horizonte apresenta cor avermelhada e textura argilosa, mas acusando a presença significativa de materiais grosseiros.

O horizonte A apresenta pouca estabilidade pelo seu caráter arenoso, sendo facilmente removido pelas águas de superfície e muitas vezes deixando os horizontes inferiores expostos nas encostas dos morros.

O horizonte C saprolítico apresenta textura grosseira e cores amareladas. A presença de matacões é comum e o afloramento destes é observado nos cumes e encostas dos morros da cidade. O predominante caráter homogêneo e isotrópico das rochas graníticas de origem tende a determinar um solo saprolítico relativamente mais homogêneo. Este material foi muito explorado como material para aterros e pavimentação (como "saibro"), sendo que atualmente a grande maioria das jazidas do município encontram-se desativadas pela fiscalização municipal.

O perfil como um todo apresenta características de boa drenagem.

### 5.2.3 - Mineralogia

Quando da investigação em campo do perfil CD, coletaram-se amostras da rocha que lhe deu origem. A análise em lâmina delgada revelou a seguinte mineralogia básica e classificação para a rocha:

QUARTZO	- 40 %	
FELDSPATO ALCALINO	- 46 %	Classif.:
PLAGIOCLASIO	- 11 %	GRANITO (Sienogranito)
BIOTITA	- 3 %	

A pequena proporção em minerais de maior

instabilidade ao intemperismo (plagioclásios e biotitas) justifica a relativa boa resistência à alteração do granito. A granulação da rocha é comumente grosseira.

O solo saprolítico apresenta fração grosseira composta de grãos de quartzo e feldspatos alcalinos em decomposição (grãos no estado friável).

A fração argila, analisada por difratograma de raio X, revelou caolinita como argilo-mineral presente, originário da decomposição dos feldspatos e biotita. A ocorrência deste argilo-mineral é decorrente das condições de boa drenagem dos perfis destas unidades.

#### 5.2.4 - Granulometria

Amostras deformadas dos horizontes B e C foram submetidas a ensaios granulométricos com sedimentação, com e sem o emprego de defloculante.

A tabela 5.2.4.1 mostra os resultados obtidos em termos das frações granulométricas. Também a classificação textural dada pelo diagrama triangular ou trilinear é apresentada.

As curvas granulométricas dos ensaios com defloculante são mostradas na figura 5.2.4.1.

#### 5.2.5 - Plasticidade

As características de plasticidade são dadas em função dos limites de consistência obtidos e apresentados na tabela 5.2.5.1.

Os valores médios do limite de liquidez (Wl), limite de plasticidade (Wp) e índice de plasticidade (IP), em função dos valores por horizonte dos perfis destas unidades, são:

<u>Wl/Wp/IP</u>	<u>HOR B</u>	<u>HOR C</u>
Wl (%)	55	42
Wp (%)	43	35
IP (%)	12	7

A classificação das amostras pelo sistema unificado (SUCS) e pelo sistema da HRB, a partir dos dados de granulometria e plasticidade, é mostrada na tabela 5.2.5.2.

TABELA 5.2.1.1 - Identificação dos pontos amostrados - unidades PVg e Rg (g.PG)

INUM. IREF.	PERFIL	LOCALIDADE	IREF.	UNIDADE DE		CLASS.	UNIDADE	MAT.	HORIZ.	PROF.
				MAPEAM. RAD/86	PEDOLOGIA BRA/73I					
1	09	CID.DE DEUS	CD	PVd10	Ca2	PV	Rg(g.PG)/PVg	GRAN.PG	B	0.5
17	*	*	*	*	*	*	*	*	C	1.0
18	*	*	*	*	*	*	*	*	C	1.5
19	*	*	*	*	*	*	*	*	C	2.0
20	*	*	*	*	*	*	*	*	C	2.5
21	*	*	*	*	*	*	*	*	C	3.0
22	*	*	*	*	*	*	*	*	C	4.0
2	02	ALDEIA SOS	AS	PVd10	Ca2	PV	Rg(g.PG)/PVg	GRAN.PG	B	1.0
23	*	*	*	*	*	*	*	*	C	2.5
24	36	CORREA LIMA	CL	PVd10	PH1	PV	Rg(g.PG)	GRAN.PG	C	3.5

TABELA 5.2.4.1 - Granulometria - unidades PVg e Rg (g.PG)

IREF.	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA COM DEFLOCULANTE						CLASSIFICACAO TEXTURAL TRIANGULAR
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA	
CD	B	0.5	2	36	11	8	21	22	fr.ag.ar.
CD	C	1.0	3	22	12	12	29	22	fr.
CD	C	1.5	3	33	13	17	26	8	fr.ar.
CD	C	2.0	3	24	26	17	29	1	ar.fr./fr.ar.
CD	C	2.5	3	29	21	22	24	1	ar.fr.
CD	C	3.0	3	32	21	20	22	2	ar.fr.
CD	C	4.0	0	9	30	12	39	10	fr.
AS	B	1.0	7	34	7	11	24	17	fr.ar.
AS	C	2.5	4	2	12	12	48	22	fr.
CL	C	3.5	3	29	17	19	29	3	fr.ar.

IREF.	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA SEM DEFLOCULANTE					
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA
CD	B	0.5	2	36	14	12	36	0
CD	C	1.0	3	22	11	16	48	0
CD	C	1.5	3	33	19	16	29	0
CD	C	2.0	3	24	11	20	42	0
CD	C	2.5	3	29	20	16	32	0
CD	C	3.0	3	32	22	15	28	0
CD	C	4.0	0	9	33	18	40	0
AS	B	1.0	8	33	5	27	27	0
AS	C	2.5	3	4	18	23	52	0
CL	C	3.5	3	28	22	17	30	0

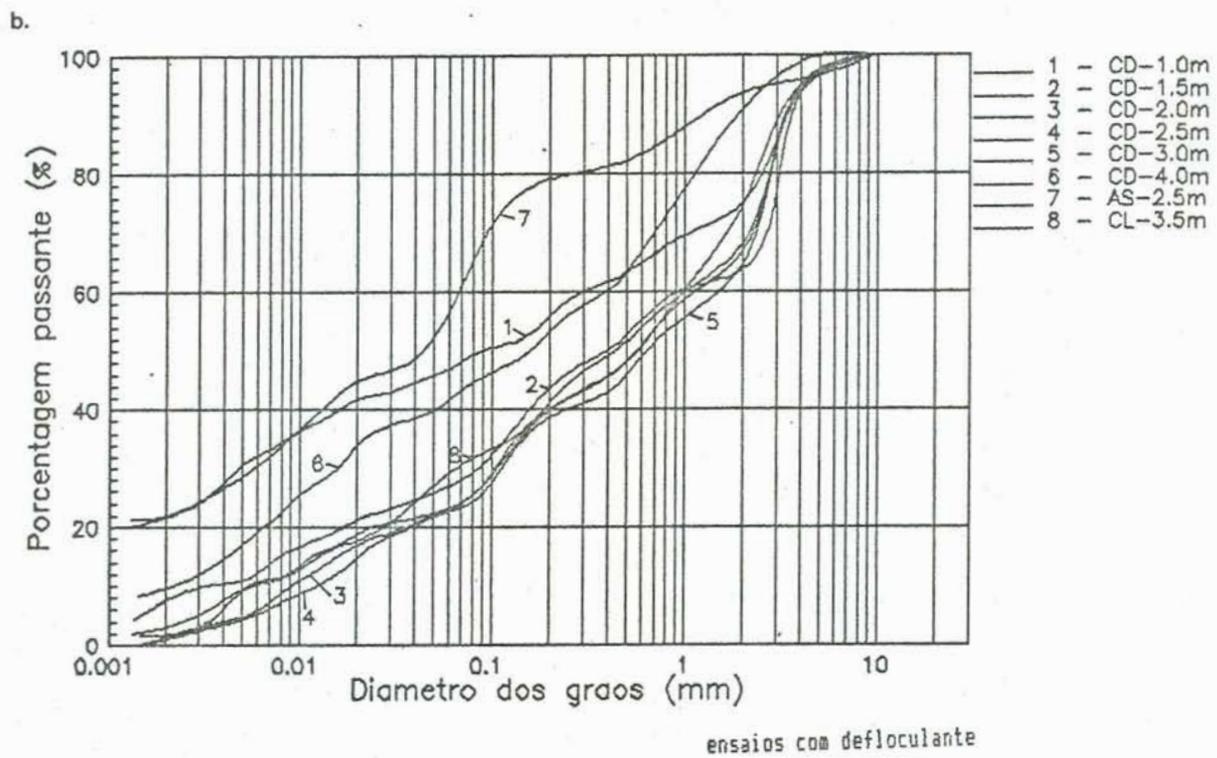
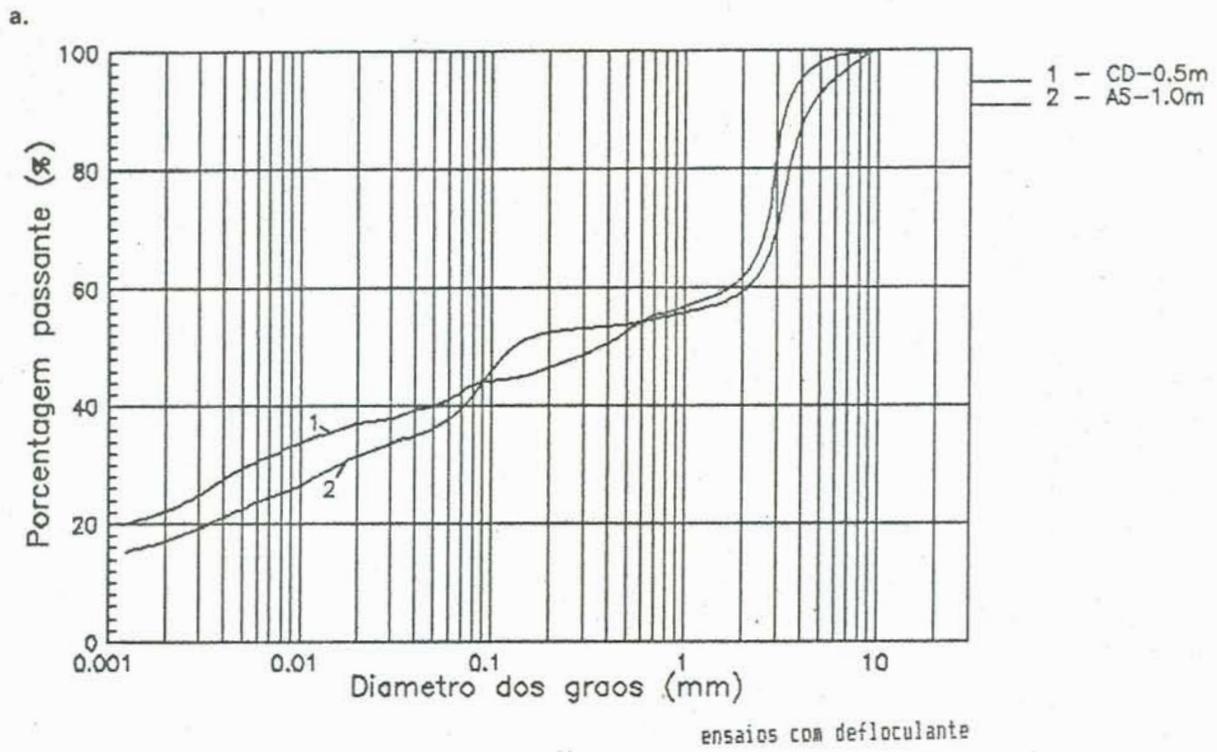


FIGURA 5.2.4.1 - Curvas granulométricas - unidades PVg e Rg (g.PG)  
a. horizonte B  
b. horizonte C

### 5.2.6 - Índices Físicos

A tabela 5.2.6.1 mostra os índices físicos obtidos das amostras indeformadas, importantes na análise das propriedades mecânicas destes solos, além dos valores do peso específico dos grãos.

Os valores médios em função dos horizontes por perfil são:

HORIZ	PESO ESP. GRÃOS [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. NAT. [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. SECO [kN/m <sup>3</sup> ]	ÍNDICE VAZIOS	GRAU SAT. [%]	TEOR. UMID. [%]
HOR B	26.1	16.4	13.6	0.92	58.0	20.4
HOR C	26.2	16.2	13.6	0.94	54.5	19.5

### 5.2.7 - Compressibilidade

Avaliada por meio dos ensaios oedométricos e adotado como parâmetro o índice de compressibilidade (C) e de descompressão (Cd). A variação e a média nos valores de C e Cd de acordo com os horizontes foi a seguinte:

NÍVEL DE TENSÕES [kN/m <sup>2</sup> ]	Valores de C e Cd (variações e médias)			
	HOR B*		HOR C	
	natural	inundado	natural	inundado
12.5-25	0.10	0.11	0.01-0.15 (0.05)	0.02-0.15 (0.06)
25-50	0.14	0.15	0.03-0.14 (0.09)	0.04-0.20 (0.10)
50-100	0.18	0.17	0.04-0.18 (0.10)	0.07-0.24 (0.13)
100-200	0.24	0.19	0.05-0.22 (0.16)	0.12-0.24 (0.18)
200-400	0.29	0.22	0.10-0.28 (0.20)	0.20-0.27 (0.23)
400-800	0.29	0.19	0.24-0.34 (0.27)	0.23-0.34 (0.28)
800-1600	0.25	0.22	0.25-0.49 (0.35)	0.21-0.36 (0.28)
1600-3200	-	-	0.26-0.51 (0.36)	0.24-0.38 (0.31)
DESCARGA (Cd)	0.02	0.01	0.02-0.03 (0.02)	0.02-0.03 (0.03)

\* dados de apenas um ensaio

TABELA 5.2.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidades PVg e Rg (g.PG)

IREFI	HORIZ.	PROF.   m	W <sub>L</sub>	W <sub>p</sub>	IP
			(%)	(%)	(%)
CD	B	0.5	54	37	17
CD	C	1.0	40	34	6
CD	C	1.5	39	34	5
CD	C	2.0	40	32	8
CD	C	2.5	37	27	10
CD	C	3.0	37	32	5
CD	C	4.0	44	36	8
AS	B	1.0	55	48	7
AS	C	2.5	53	47	6
CL	C	3.5	34	24	10

TABELA 5.2.5.2 - Classificação das amostras - unidades PVg e Rg (g.PG)

IREFI	HORIZ.	PROF.   m	CLASSIFICACAO	
			SUCS	HRB
CD	B	0.5	SM	A-7-5(4)
CD	C	1.0	ML	A-4(3)
CD	C	1.5	SM	A-2-4(0)
CD	C	2.0	SM	A-2-4(0)
CD	C	2.5	SM	A-2-4(0)
CD	C	3.0	SM	A-1-b(0)
CD	C	4.0	SM	A-5(3)
AS	B	1.0	SM	A-5(2)
AS	C	2.5	MH	A-5(9)
CL	C	3.5	SM	A-2-4(0)

TABELA 5.2.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidades PVg e Rg (g.PG)

IREFI	HORIZ.	PROF.   m	PESO ESPECIFICO kN/m <sup>3</sup>			INDICE   VAZIOS	GRAU   SATUR.   (%)	UNIDADE   NATURAL   (%)
			APARENTE   NATURAL	APARENTE   SECO	GRAOS			
CD	B	0.5	16.1	13.8	25.8	0.88	50.7	17.2
CD	C	1.0	17.2	14.7	26.3	0.80	57.1	17.3
CD	C	1.5	16.4	13.9	26.5	0.90	51.0	17.3
CD	C	2.0	15.6	13.2	26.3	0.99	47.4	17.8
CD	C	2.5	15.4	13.2	26.1	0.98	44.6	16.6
CD	C	3.0	15.3	13.3	25.8	0.94	40.1	14.6
CD	C	4.0	15.6	13.4	26.1	0.95	45.2	16.4
AS	B	1.0	16.7	13.5	26.4	0.96	65.3	23.6
AS	C	2.5	16.2	13.0	26.6	1.05	62.8	24.7
CL	C	3.5	16.4	14.0	25.7	0.84	53.1	17.2

As curvas do logaritmo da pressão versus deformação, para os solos ensaiados pertencentes a estas unidades geotécnicas, são apresentadas na figura 5.2.7.1.

#### 5.2.8 - Resistência ao Cisalhamento

Os parâmetros de resistência,  $c$  = intercepto de coesão e  $\theta$  = ângulo de atrito, foram obtidos por ensaios de cisalhamento direto nas condições natural e inundado, para tensões normais de 16 a 400  $\text{kN/m}^2$ . A variação dos valores de  $c$  e  $\theta$  encontrados, em função dos horizontes, são:

HORIZ	$c$ [ $\text{kN/m}^2$ ]		$\theta$ [graus]	
	natural	inundado	natural	inundado
HOR B	54.3-66.5	20.5-56.0	33-37	28-35
HOR C	28.4-43.5	20.7-50.8	34-41	28-36

As envoltórias de resistência para os solos ensaiados destas unidades são mostradas na figura 5.2.8.1.

#### 5.2.9 - Colapsividade

Os valores do coeficiente de colapso  $i$  para cada ponto, em um intervalo de tensões verticais de 15 a 400  $\text{kN/m}^2$ , são apresentados na tabela 5.2.9.1.

As variações nos índices máximos de cada ponto ( $i_{\text{máx}}$ ) e nas tensões para o colapso máximo, em função dos horizontes, são:

HORIZ	$i_{\text{máx}}$ [%]	TENSÃO $P/i_{\text{máx}}$ [ $\text{kN/m}^2$ ]
HOR B	6.0-8.5	100-400
HOR C	5.6-6.1	150-400

### 5.3 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO CANTAGALO - PVg e Rg(g.Cg)

#### 5.3.1 - Investigação

Para estas unidades foi investigado apenas um perfil, localizado no afastado Morro da Extrema (na porção sudeste do município). Estas unidades, pela ocorrência menos significativa em Porto Alegre, não foram objeto de amostragens e estudo de

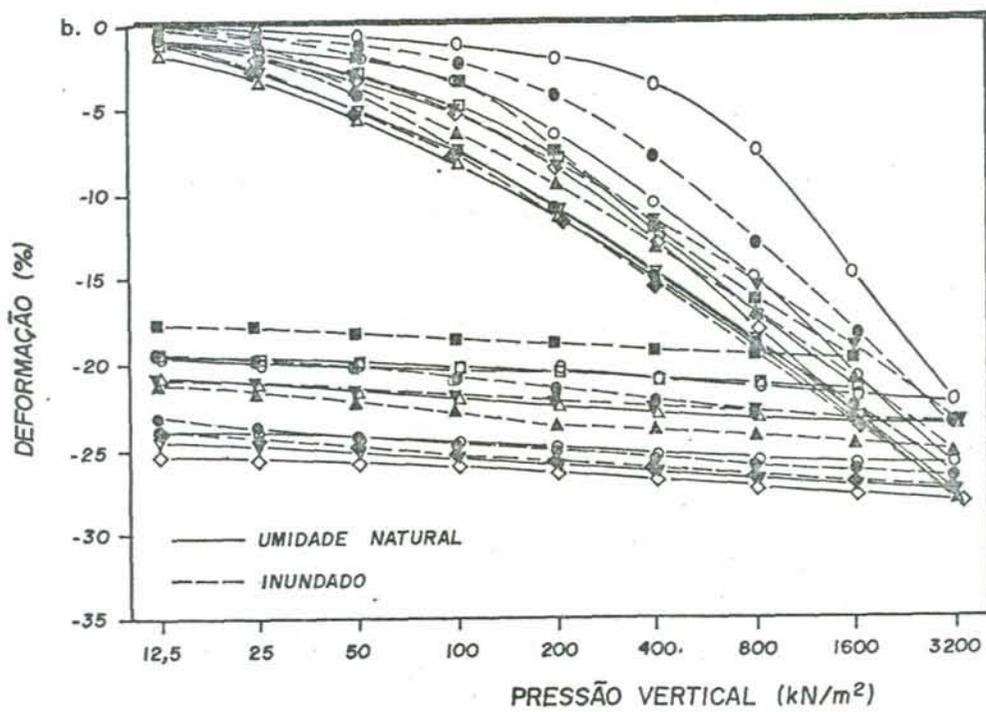
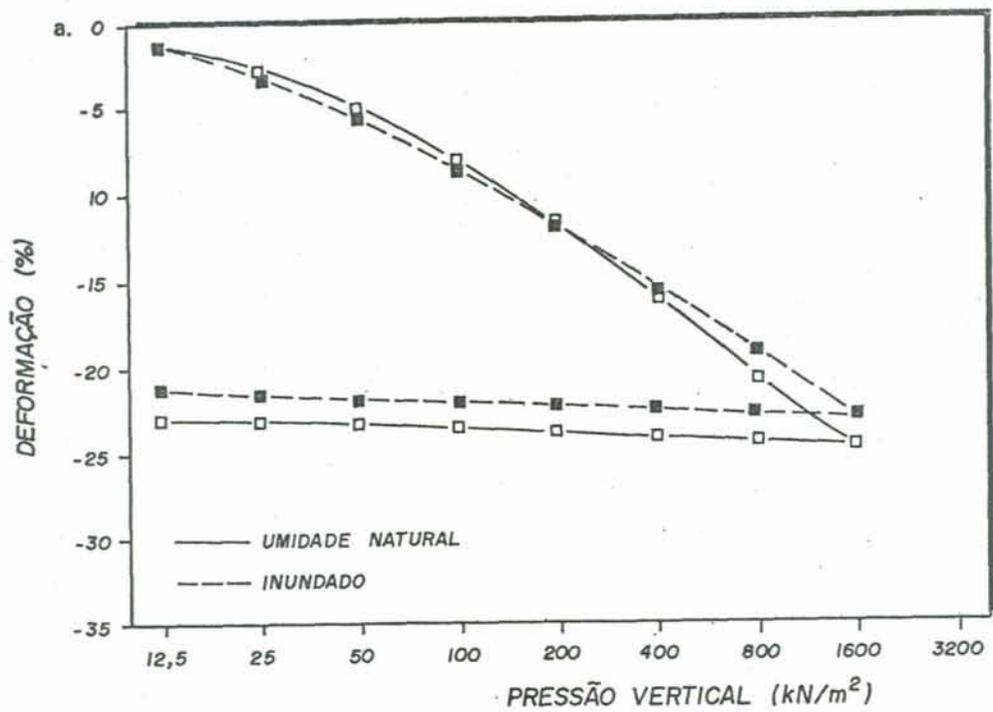
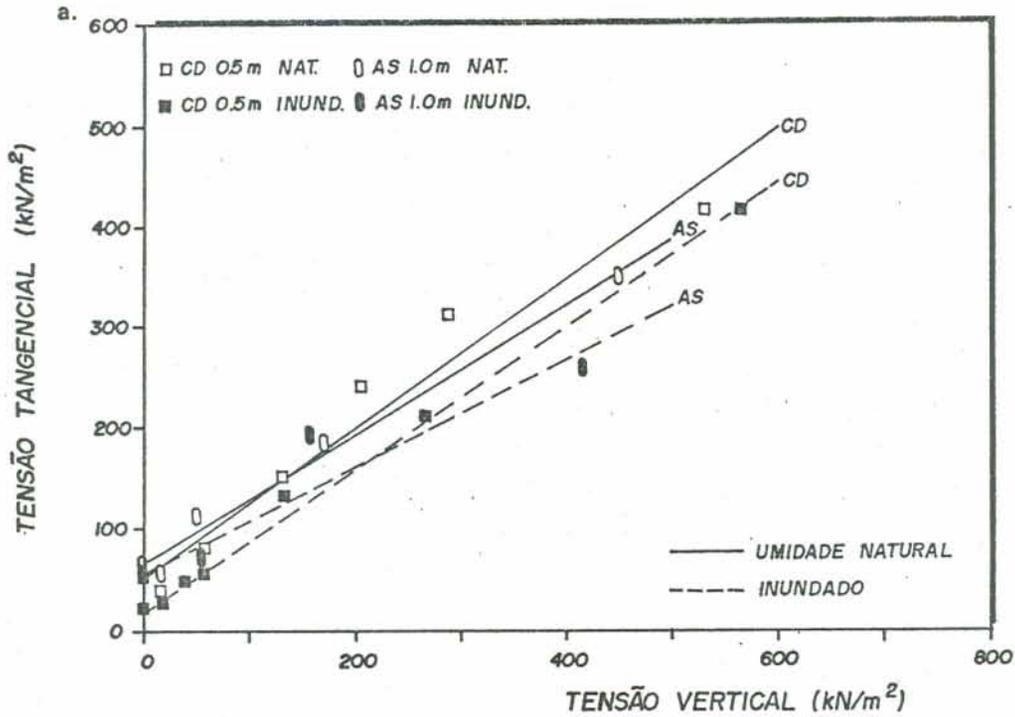


FIGURA 5.2.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada-unidades PVg e Rg (g.PG)  
a. horizonte B  
b. horizonte C



b.

REFI	HORIZ.	PROF.	NATURAL		INUNDADO	
			COESAO kN/m <sup>2</sup>	ANG.DE ATRITO	COESAO kN/m <sup>2</sup>	ANG.DE ATRITO
CD	B	0.5	54.3	37	20.5	35
CD	C	1.5	28.4	38	20.7	36
AS	B	1.0	66.5	33	56.0	28
AS	C	2.5	73.2	34	50.8	28
CL	C	3.5	43.5	41	36.5	35

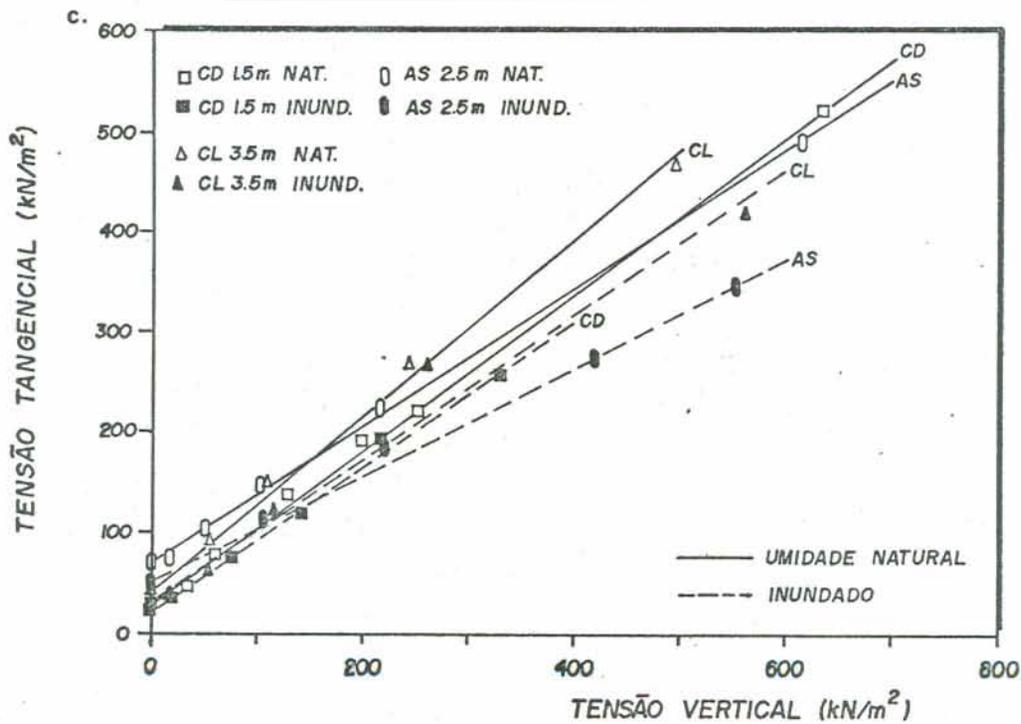


FIGURA 5.2.8.1 - Envoltórias de resistência - unidades PVg e Rg (g.PG)  
 a. horizonte B  
 b. valores de c e φ  
 c. horizonte C

propriedades em laboratório.

### 5.3.2 - Características Físico-Morfológicas dos Perfis

São bastante semelhantes àquelas encontradas para as unidades relacionadas ao Granito Ponta Grossa. Este fato é decorrente da semelhança petrográfica e mineralógica entre as litologias e da geomorfologia de ocorrência dos materiais de alteração.

Alguma diferença foi verificada na textura, principalmente dos solos saprolíticos, geralmente pouco mais grosseira.

Os solos do horizonte C têm sido empregados como material de empréstimo em obras de pavimentação, nas estradas do interior próximas à ocorrência das unidades.

## 5.4 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO SANTANA - PVg e Rg(g.S)

### 5.4.1 - Investigação

Foram investigados seis perfis, principalmente da unidade de solos litólicos, Rg(g.S), predominante neste substrato. Um perfil de solo litólico representativo, APAMECOR (AP), foi amostrado.

A completa identificação do perfil é apresentada na tabela 5.4.1.1.

### 5.4.2 - Características Físico-Morfológicas dos Perfis

O corpo granítico intrusivo denominado Granito Santana determina um relevo muito movimentado, constituindo alguns dos pontos mais altos e íngremes do município.

Verifica-se a incidência predominante de solos litólicos e afloramentos de rocha, resultando na significativa ocorrência da unidade Rg(g.S).

A presença de matacões é comum, até mesmo aflorando no topo e encostas dos morros.

A formação de perfis mais ou menos profundos é condicionada à estrutura fendilhada, bastante característica desta litologia. Junto às zonas de falhas, observa-se maior

intemperismo e uma profundidade maior em solos saprolíticos.

#### 5.4.3 - Mineralogia

Uma amostra de rocha do Granito Santana foi coletada e analisada em lâmina delgada. Uma análise mineralógica básica revelou:

QUARTZO	- 44 %	
FELDSPATO ALCALINO	- 50 %	Classif.:
PLAGIOCLASIO	- 5 %	FELDSPATO-ALCALINO GRANITO
BIOTITA	- < 1 %	

Nota-se novamente uma pequena proporção em minerais mais instáveis.

A granulação é grosseira e os grãos minerais mostram marcante deformação devido ao forte tectonismo.

O solo saprolítico apresenta uma fração grosseira composta de grãos de quartzo e feldspato alcalino em alteração. A fração argila deste solo, analisada por difratograma de raio X, revelou caolinita como argilo-mineral.

#### 5.4.4 - Granulometria

Os resultados em frações granulométricas e a classificação textural são apresentados na tabela 5.4.4.1. São acrescidos nesta, resultados médios obtidos por DAVISON DIAS (1987) para perfis podzólicos vermelho-amarelo da mesma litologia, representados pelo perfil DD.

A textura evidencia o processo de intemperismo no perfil AP. Nota-se que o ponto AP-1.0m, localizado no topo do horizonte C do perfil, apresenta uma granulometria bem mais fina que AP-2.0m, coletado junto à rocha alterada.

As curvas granulométricas destas amostras para os ensaios com defloculante são apresentadas na figura 5.4.4.1.

#### 5.4.5 - Plasticidade

Os limites de consistência e os índices de plasticidade para o perfil AP e também os valores médios dados por DAVISON DIAS (1987)(perfil DD) são apresentados na tabela 5.4.5.1.

A tabela 5.4.5.2 dá a classificação destes solos.

TABELA 5.2.9.1 - Coeficientes de Colapso (i) - unidades PVg e Rg (g.PG)

IREF	HORIZ.	PROF.	COEFICIENTE DE COLAPSIVIDADE i (%)							
			PRESSÃO VERTICAL kN/m <sup>2</sup>							
			15	30	50	100	150	200	300	400
CD	B	0.5	0.99	2.50	4.60	6.02	-	4.61	-	3.54
CD	C	1.5	2.84	0.70	5.31	5.30	5.98	5.79	-	-
AS	B	1.0	0.00	-	2.11	-	0.82	-	-	8.46
AS	C	2.5	0.22	-	0.97	0.72	-	4.77	7.18	6.14
CL	C	3.5	2.41	-	3.27	5.29	-	5.64	4.23	1.56

TABELA 5.4.1.1 - Identificação dos pontos amostrados - unidade Rg (g.S)

INUM.	PERFIL	LOCALIDADE	IREF	UNIDADE DE		CLASS.	UNIDADE	MAT.	HORIZ.	PROF.
				HAPEAM.	PEDOLOG.					
				RAD/86	BRA/73	PERFIL				
15	07	APAMECOR	AP	PVd10	PK1	R	Rg(g.S)	GRAN.S	C	1.0
16									C	2.0

TABELA 5.4.4.1 - Granulometria - unidades PVg e Rg (g.S)

IREF	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA COM DEFLOCULANTE						CLASSIFICACAO	
			[Z]							TEXTURAL
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA		
AP	C	1.0	0	0	24	22	22	32	fr.ag.ar.	
AP	C	2.0	6	40	16	18	20	0	ar.fr.	
DD	B	-	0	8	15	10	18	49	ag.	
DD	C	-	0	13	21	14	39	13	fr.	

IREF	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA SEM DEFLOCULANTE					
			[Z]					
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA
AP	C	1.0	0	0	23	31	46	0
AP	C	2.0	6	40	18	21	15	0
DD	B	-	0	12	11	10	52	15
DD	C	-	0	13	18	15	54	0

#### 5.4.6 - Índices Físicos

A tabela 5.4.6.1 apresenta os índices físicos e o peso específico dos grãos dos perfis AP e DD, para este último, desde os dados médios obtidos por DAVISON DIAS (1987).

#### 5.4.7 - Compressibilidade

Ensaio de compressão confinada, em DAVISON DIAS (1987), para os solos destas unidades registraram os seguintes valores para os índices de compressão (Cc) e descompressão (Cd):

HORIZ / CONDIÇÃO		Cc (200 - 800 kN/m <sup>2</sup> )	Cd
HOR B	inundado	0.23	0.02
HOR C	natural	0.19	0.01
	inundado	0.29	0.03

O Coeficiente de Adensamento (Cv) obtido para o solo saprolítico, sob uma tensão vertical de 100 kN/m<sup>2</sup>, foi de  $7.6 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/seg. Este valor de Cv foi determinado por DAVISON DIAS (1987), a partir dos dados do módulo de variação volumétrica de ensaios de compressão confinada e coeficiente de permeabilidade de ensaios triaxiais. O valor do coeficiente de permeabilidade (K) do horizonte C ensaiado, determinado no triaxial para uma tensão de consolidação de 100 kN/m<sup>2</sup>, foi de  $1.3 \times 10^{-4}$  cm/seg.

#### 5.4.8 - Resistência ao Cisalhamento

Os parâmetros de resistência de cisalhamento direto para os solos do perfil DD (DAVISON DIAS, 1987) são dados na tabela 5.4.8.1. Os resultados foram obtidos para tensões verticais entre 16 e 200 kN/m<sup>2</sup>.

### 5.5 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO GRANITO INDEPENDENCIA - PVg e Rg(g.I)

#### 5.5.1 - Investigação

Estas unidades ocorrem no centro e bairros mais urbanizados da cidade. Devido a isto, a investigação dos solos

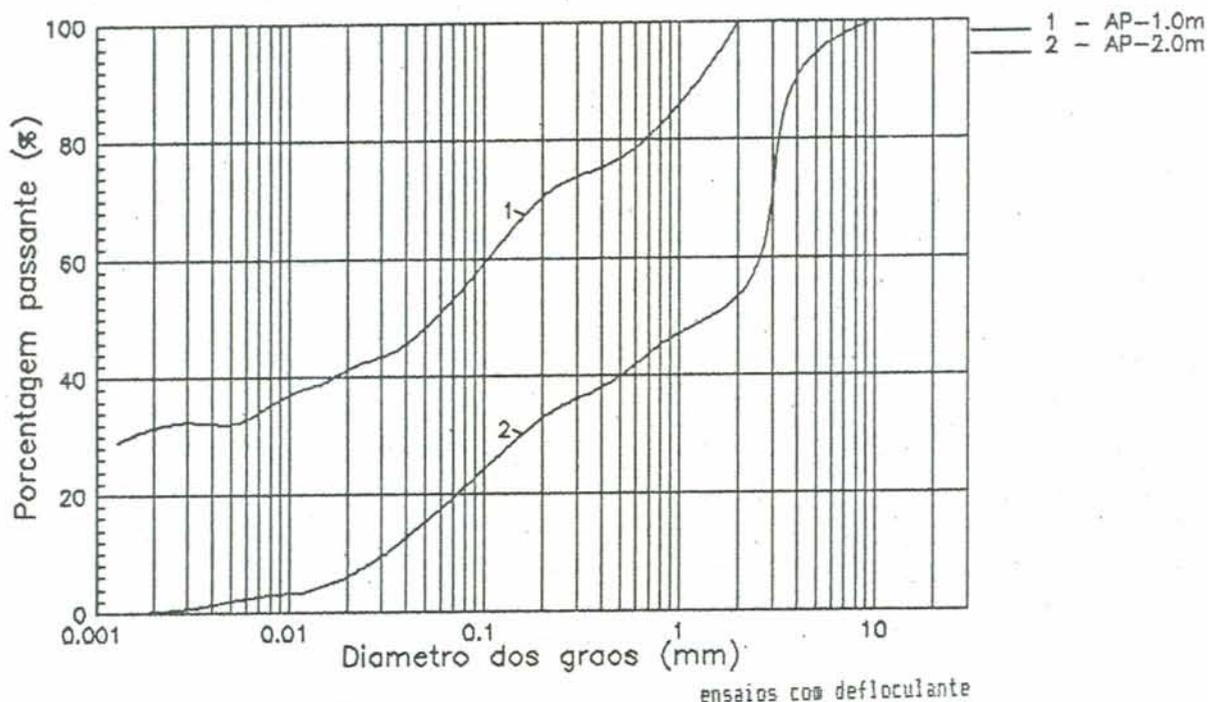


FIGURA 5.4.4.1 - Curvas granulométricas - unidade Rg (g.S)

TABELA 5.4.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidades PVg e Rg (g.S)

IREFI	HORIZ.	PROF.	Wl (%)	Wp (%)	IP (%)
AP	C	1.0	48	30	18
AP	C	2.0	-	-	NP
DD	B	-	56	35	21
DD	C	-	44	36	8

DD - DADOS DE DAVISON DIAS (1987)

TABELA 5.4.5.2 - Classificação dos materiais - unidades PVg e Rg (g.S)

IREFI	HORIZ.	PROF.	SUCS	HRB
AP	C	1.0	ML	A-7-5(8)
AP	C	2.0	SM	A-1-b
DD	B	-	MH	A-7-5
DD	C	-	*	A-5

DD - DADOS DE DAVISON DIAS (1987)

\* variavel MH/HL/SM

TABELA 5.4.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidades PVg e Rg (g.S)

IREFI	HORIZ.	PROF.	INATURAL	APARENTE SECO	PESO ESPECIFICO GRAOS (kN/m <sup>3</sup> )	INDICE VAZIOS	GRAU SATUR. (Z)	UMIDADE NATURAL (Z)
AP	C	1.0	17.5	15.1	26.0	0.72	55.8	15.5
AP	C	2.0	16.7	14.1	25.4	0.80	58.6	18.5
DD	B	-	17.4	14.0	26.8	0.90	70.0	22.8
DD	C	-	16.7	13.9	26.7	0.95	52.0	20.9

DD - DADOS DE DAVISON DIAS (1987)

das litologias do Granito Independência foi feita em escavações de estacas e subsolos de obras. Investigaram-se escavações localizadas nos bairros Bela Vista, Mont Serrat, Petrópolis e Moinhos de Vento.

Seis perfis foram investigados, totalizando 22 pontos amostrados. Os perfis são:

CA - CASEMIRO DE ABREU  
AR - ANTONIO REBOUÇAS  
CT - CARLOS TREIN FILHO  
JM - J.S.MARTINS  
BG - AV. BAGE  
TS - TOBIAS DA SILVA

A identificação completa dos pontos de amostragem é dada pela tabela 5.5.1.1.

#### 5.5.2 -Características Físico-Morfológicas dos Perfis

Assim como nas outras unidades de substrato granítico abordadas, os perfis de solos desenvolvidos apresentam pouca evolução pedológica. Entretanto, verificou-se um intenso intemperismo do material rochoso e grandes profundidades em solos saprolíticos (de até 20 metros). Este aspecto parece estar relacionado a ocorrência, nesta unidade litológica, de gnaisses feldspáticos e micáceos associados aos granitos, de composição mineralógica bem menos estável que aquela das rochas que originaram os solos das unidades anteriormente descritas. Convém destacar que nesta unidade são necessários estudos geológicos destinados a individualizar destas rochas metamórficas.

O horizonte B (unidade PVg) apresenta-se, em geral, como um solo argiloso vermelho com alguma areia. O caráter de transporte deste material não é tão nítido. A consistência varia de média a rija. As condições de drenagem são boas, no entanto, em certas depressões tornam-se prejudicadas e os materiais tendem a assumir uma consistência mole e cores mais acinzentadas, próprias da redução dos óxidos de ferro.

Os solos saprolíticos do horizonte C apresentam grandes variações, face a heterogeneidades constatadas no material rochoso destas unidades. Em geral, a textura é areno-siltosa e as cores amareladas e rosadas são as mais comuns nos



perfis bem drenados. Já nos perfis imperfeitamente drenados, verificou-se cores cinzentas e até mesmo esverdeadas (perfil BG) para estes materiais de alteração. Foi freqüente a ocorrência de matacões nas escavações investigadas.

E conveniente destacar que a grande interferência do homem sobre o meio físico nestas zonas da cidade, influenciam a marcantes modificações nas características morfológicas e genéticas dos perfis de solos. Este fato, associado às heterogeneidades na litologia, tornou complexo o estudo de ocorrência e de perfis típicos destas unidades.

Um outro aspecto constatado em campo é a presença de pegmatitos, que atravessam a rocha e também o solo saprolítico pois, sendo mais resistentes ao intemperismo, mantêm-se parcialmente íntegros. No perfil BG, na profundidade de 7 metros, observou-se vestígios de veio pegmatítico em meio a massa de solo saprolítico.

SCHNEIDER (1959) comenta a existência de diques semelhantes a muros, de poucos centímetros a vários metros de espessura, que atravessam a massa de solo em direções diversas. Alguns destes veios são essencialmente muscovíticos, representando superfícies de fraqueza sob o ponto de vista geotécnico.

### 5.5.3 - Mineralogia

As rochas que constituem a unidade geológica Granito Independência variam desde granitos cinzas a gnaisses de acentuada xistosidade.

Uma amostragem do material rochoso foi feita nos altos do bairro Bela Vista. Foram coletadas amostras de uma rocha granítica cinza e aparentemente isotrópica, que se fazia abundante nas diversas escavações realizadas em obras deste bairro.

Em lâmina delgada, a amostra revelou a seguinte mineralogia básica e classificação:

QUARTZO	- 40%	
FELDSPATO ALCALINO	- 10%	Classif: GRANODIORITO
PLAGIOCLASIO	- 45%	
BIOTITA	- 5%	

Observa-se que a rocha apresenta mais alto teor em plagioclásio (feldspato mais instável ao intemperismo) se comparado com a composição das rochas graníticas já analisadas (Granito Ponta Grossa e Granito Santana).

Os solos saprolíticos apresentam significativo teor de silte e fração areia composta de feldspatos em decomposição e pouco quartzo. A argila, também presente, é produto da intemperização dos plagioclásios e micas. Entretanto, o que mais chama a atenção é a presença de mica nos solos do horizonte C destas unidades, muitas vezes em grande quantidade.

SCHNEIDER (1959) já comentava o teor elevado em mica sericita (variedade fina da mica muscovita), sob a forma de palhetas finíssimas, sedosas e de aspecto prateado, em determinados solos saprolíticos do Granito Independência. Segundo o autor, esta característica confere menor capacidade de carga e maior compressibilidade a estes materiais. Também comenta que esta mica não pode ser explicada pelos processos normais de intemperismo, admitindo processos hidrotermais de alteração (modificações mineralógicas por soluções aquosas quentes) dos feldspatos.

No perfil BG constatou-se, a partir de certa profundidade, a ocorrência de material saprolítico de cor verde escura, muito rico em mica cloritizada (com alteração a clorita), originado possivelmente de uma rocha gnaissódica rica em mica. O mineral micáceo apresenta-se no solo em forma de lamina finíssimas de baixa dureza que comprometem as características de coesão e atrito deste solo. Verificou-se que a presença de grãos de quartzo em outras profundidades tendem a melhorar as propriedades do material.

AZEVEDO (1990), no seu estudo baseado em sondagens de simples reconhecimento em área de ocorrência destas unidades geotécnicas, verifica nos relatórios de sondagem uma grande incidência de registros de solos micáceos.

Foram enviadas amostras representativas dos solos saprolíticos dos perfis CA e BG para uma análise mineralógica das argilas pelo difratograma de raio X. Para o solo CA somente caolinita foi verificada como argilo-mineral. Já para o solo BG (altamente micáceo), foi encontrada illita acompanhando a caolinita, provavelmente originada nos processos de

intemperização das micas.

#### 5.5.4 - Granulometria

As frações granulométricas e a classificação textural dos solos ensaiados destas unidades são apresentadas na tabela 5.5.4.1. A figura 5.5.4.1 mostra as curvas granulométricas para os ensaios com defloculante.

De modo particular, convém destacar os pontos CT-12m, CT-13m e BG-7m, que são solos pedregulhosos. As amostras do perfil CT são misturas de solo saprolítico e porções de saprolito, coletadas próximo a rocha; já a amostra do perfil BG apresenta pedregulhos oriundos de um veio de material menos intemperizado.

#### 5.5.5 - Plasticidade

Os limites de consistência e índices de plasticidade para as amostras destas unidades são dados na tabela 5.5.5.1.

Os valores médios dos limites e de IP, em função dos horizontes de cada perfil, são:

!Wl/Wp/IP !	HOR B !	HOR C !
Wl (%)	44	38
Wp (%)	33	29
IP (%)	11	9

Três dos solos ensaiados verificaram não plásticos (NP), CT-12m e CT-13m são solos pedregulhosos e BG-16m é um material muito micáceo.

A classificação destes solos é apresentada na tabela 5.5.5.2.

#### 5.5.6 - Índices Físicos

Os índices físicos e o peso específico dos grãos dos solos são apresentados na tabela 5.5.6.1.

Os valores médios das grandezas, em função dos horizontes de cada perfil, são os seguintes:

TABELA 5.5.4.1 - Granulometria - unidades PVg e Rg (g.I)

REFI	HORIZ.	PROF.     m	GRANULOMETRIA COM DEFLOCULANTE [Z]						CLASSIFICACAO     TEXTURAL     TRIANGULAR	
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA		
CA	B	1.0	0	7	11	18	32	32	fr.ag.	
CA	C	3.5	0	0	20	24	45	11	fr.	
CT	B	1.0	0	0	12	28	19	41	ag.	
CT	C	2.0	0	0	18	24	33	25	fr.	
CT	C	5.0	4	29	25	18	23	1	ar.fr.	
CT	C	6.0	3	20	35	17	25	0	ar.fr.	
CT	C	8.0	3	17	35	16	25	4	fr.ar.	
CT	C	10.0	3	29	33	18	17	0	ar.fr.	
CT	C	12.0	25	51	13	6	5	0	pedregulhoso	
CT	C	13.0	34	52	6	4	4	0	pedregulhoso	
AR	C	3.0	0	8	20	23	43	6	fr.ar.	
JM	B	1.0	1	17	8	14	16	44	ag.	
BG	B	2.0	0	1	15	38	29	17	fr.ar.	
BG	C	4.0	0	0	21	33	38	8	fr.ar.	
BG	C	6.0	2	2	13	30	49	4	fr.ar.	
BG	C	7.0	35	42	4	6	13	0	pedregulhoso	
BG	C	11.0	7	4	11	40	37	1	fr.ar.	
BG	C	16.0	4	12	13	29	36	6	fr.ar.	
TS	B	2.0	0	9	10	23	26	32	fr.ag.	
TS	C	4.0	0	3	13	21	57	6	fr.sl.	
TS	C	6.5	2	4	18	34	30	12	fr.ar.	
TS	C	8.0	0	4	25	29	25	17	fr.ar.	

REFI	HORIZ.	PROF.     m	GRANULOMETRIA SEM DEFLOCULANTE [Z]						
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA	
CA	B	1.0	0	7	13	21	56	3	
CA	C	3.5	0	0	41	24	35	0	
CT	B	1.0	0	0	14	22	64	0	
CT	C	2.0	0	0	41	22	37	0	
CT	C	5.0	4	29	27	15	25	0	
CT	C	6.0	3	20	35	14	28	0	
CT	C	8.0	3	17	37	17	26	0	
CT	C	10.0	3	29	34	14	20	0	
CT	C	12.0	25	50	14	7	4	0	
CT	C	13.0	34	52	6	4	4	0	
AR	C	3.0	0	7	26	25	42	0	
JM	B	1.0	1	17	15	21	46	0	
BG	B	2.0	0	2	13	22	60	3	
BG	C	4.0	1	1	22	30	46	0	
BG	C	6.0	2	1	15	27	55	1	
BG	C	7.0	35	41	5	7	12	0	
BG	C	11.0	7	4	13	31	37	8	
BG	C	16.0	4	12	8	28	42	6	
TS	B	2.0	0	9	13	15	57	6	
TS	C	4.0	0	2	15	20	63	0	
TS	C	6.5	2	4	20	27	47	0	
TS	C	8.0	0	3	17	29	51	0	

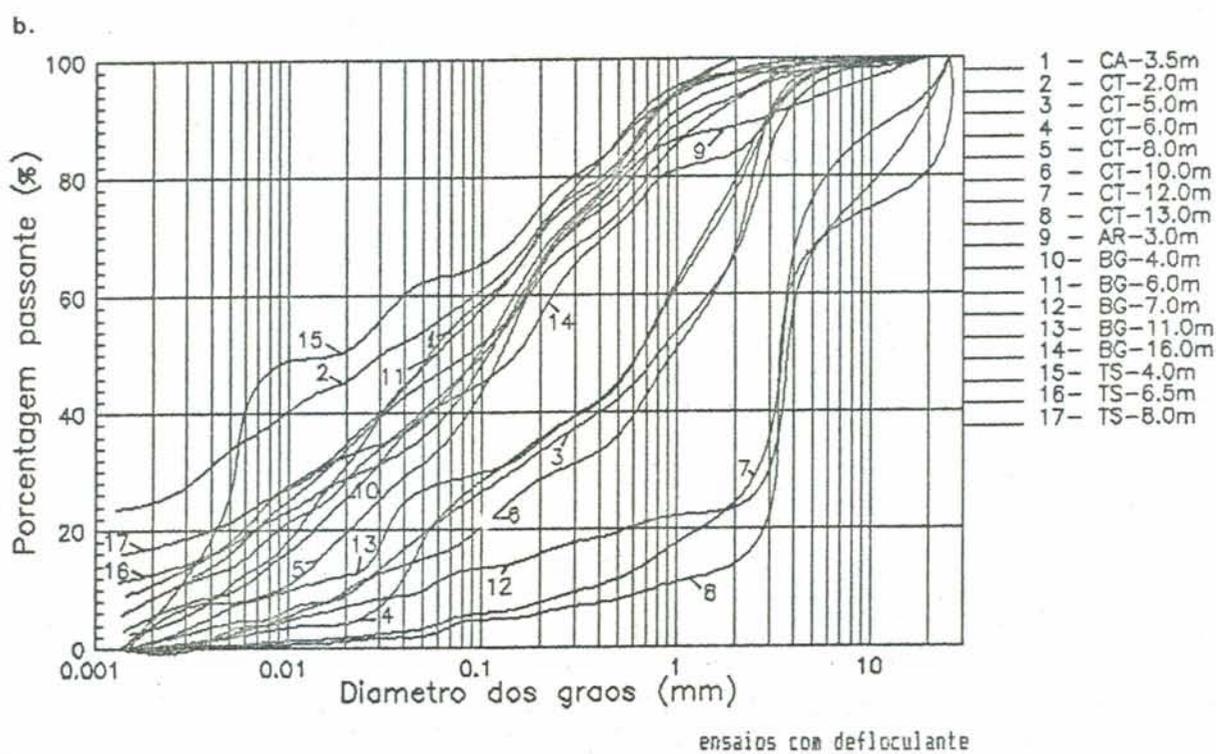
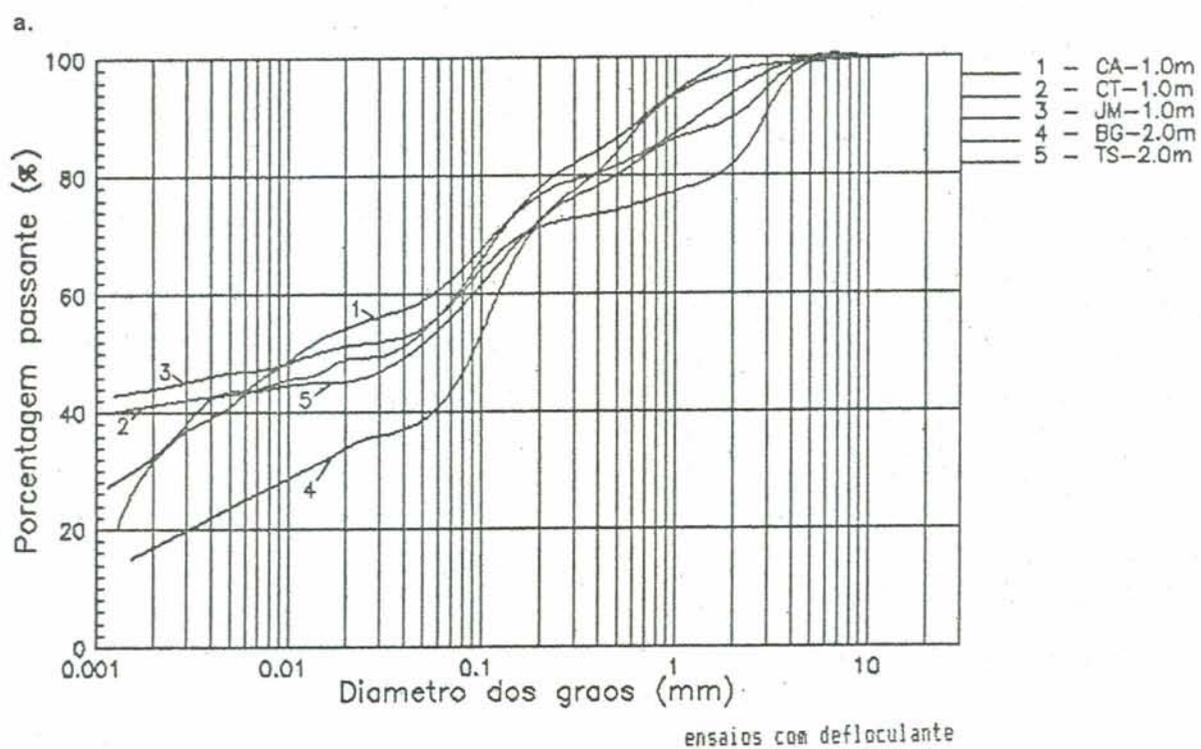


FIGURA 5.5.4.1 - Curvas granulométricas - unidades PVg e Rg (g.I)  
a. horizonte B  
b. horizonte C

TABELA 5.5.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade  
- unidades PVg e Rg (g.I)

REF	HORIZ.	PROF.	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	IP (%)
CA	B	1.0	49	35	14
CA	C	3.5	35	29	6
CT	B	1.0	45	33	12
CT	C	2.0	43	34	9
CT	C	5.0	35	27	8
CT	C	6.0	30	25	5
CT	C	8.0	30	24	6
CT	C	10.0	30	23	7
CT	C	12.0	-	-	NP
CT	C	13.0	-	-	NP
AR	C	3.0	39	35	4
JH	B	1.0	46	42	4
BG	B	2.0	37	24	13
BG	C	4.0	47	31	16
BG	C	6.0	44	28	16
BG	C	7.0	41	33	8
BG	C	11.0	40	26	14
BG	C	16.0	43	-	NP
TS	B	2.0	45	29	16
TS	C	4.0	42	29	13
TS	C	6.5	27	18	9
TS	C	8.0	33	23	10

TABELA 5.5.5.2 - Classificação das amostras - unidades PVg e Rg (g.I)

REF	HORIZ.	PROF.	CLASSIFICAÇÃO	
			SUCS	HRB
CA	B	1.0	ML	A-7-5(9)
CA	C	3.5	ML	A-4(4)
CT	B	1.0	ML	A-7-5(6)
CT	C	2.0	ML	A-5(5)
CT	C	5.0	SM	A-2-4(0)
CT	C	6.0	SM	A-1-b(0)
CT	C	8.0	SM	A-2-4(0)
CT	C	10.0	SM	A-2-4(0)
CT	C	12.0	SP	A-1-a(0)
CT	C	13.0	SP	A-1-a(0)
AR	C	3.0	SM	A-4(3)
JH	B	1.0	ML	A-5(6)
BG	B	2.0	SM	A-6(3)
BG	C	4.0	SM	A-7-5(4)
BG	C	6.0	ML	A-7-6(6)
BG	C	7.0	SP-SM	A-1-a(0)
BG	C	11.0	SM	A-6(2)
BG	C	16.0	-	A-5(2)
TS	B	2.0	ML	A-7-6(8)
TS	C	4.0	ML	A-7-6(7)
TS	C	6.5	SC	A-4(1)
TS	C	8.0	SC	A-4(1)

HORIZ	PESO ESP. GRAOS [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. NAT. [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. SECO [kN/m <sup>3</sup> ]	INDICE VAZIOS	GRAU SAT. [%]	TEOR UMID [%]
HOR B	26.4	17.0	14.0	0.89	64.1	21.7
HOR C	26.4	17.1	14.3	0.84	60.0	19.2

### 5.5.7 - Compressibilidade

A variação e os valores médios para os índices de compressibilidade dos solos destas unidades, ensaiados sob compressão confinada, são:

NIVEL DE TENSOES [kN/m <sup>2</sup> ]	Valores de C e Cd (variações e médias)			
	HOR B		HOR C	
	natural	inundado	natural	inundado
12.5-25	0.01-0.05 (0.03)	0.04-0.05 (0.05)	0.01-0.07 (0.04)	0.03-0.06 (0.05)
25-50	0.01-0.12 (0.06)	0.07-0.08 (0.08)	0.03-0.11 (0.07)	0.06-0.11 (0.08)
50-100	0.02-0.16 (0.10)	0.11-0.12 (0.12)	0.06-0.13 (0.09)	0.10-0.15 (0.12)
100-200	0.05-0.28 (0.17)	0.20-0.21 (0.21)	0.13-0.17 (0.15)	0.14-0.21 (0.17)
200-400	0.09-0.36 (0.25)	0.29-0.30 (0.30)	0.20-0.25 (0.21)	0.20-0.24 (0.22)
400-800	0.19-0.47 (0.33)	0.33-0.34 (0.34)	0.26-0.30 (0.27)	0.24-0.29 (0.26)
800-1600	0.26-0.35 (0.31)	0.29-0.30 (0.30)	0.25-0.31 (0.28)	0.25-0.32 (0.28)
1600-3200	-	-	0.27-0.32 (0.28)	0.25-0.32 (0.28)
DESCARGA (Cd)	0.01-0.02 (0.01)	0.02	0.02-0.07 (0.04)	0.03-0.07 (0.05)

As curvas do logaritmo da pressão vertical pela deformação, para os solos ensaiados, são apresentadas na figura 5.5.7.1.

### 5.5.8 - Resistência ao Cisalhamento

As envoltórias de resistência, obtidas pelos ensaios de cisalhamento direto, são mostradas na figura 5.5.8.1.

Os parâmetros  $c$  e  $\phi$  encontrados, em função dos horizontes, são:

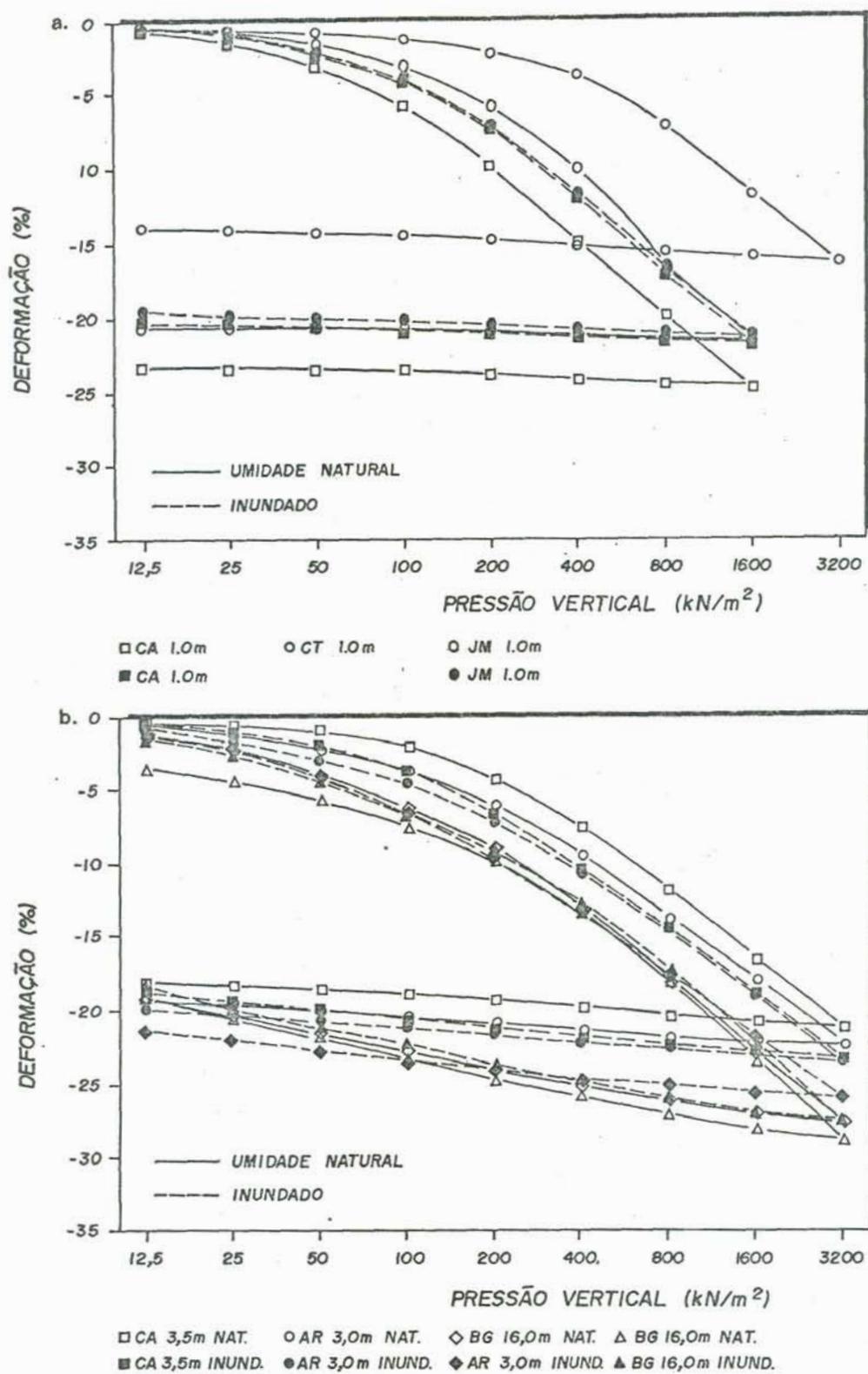
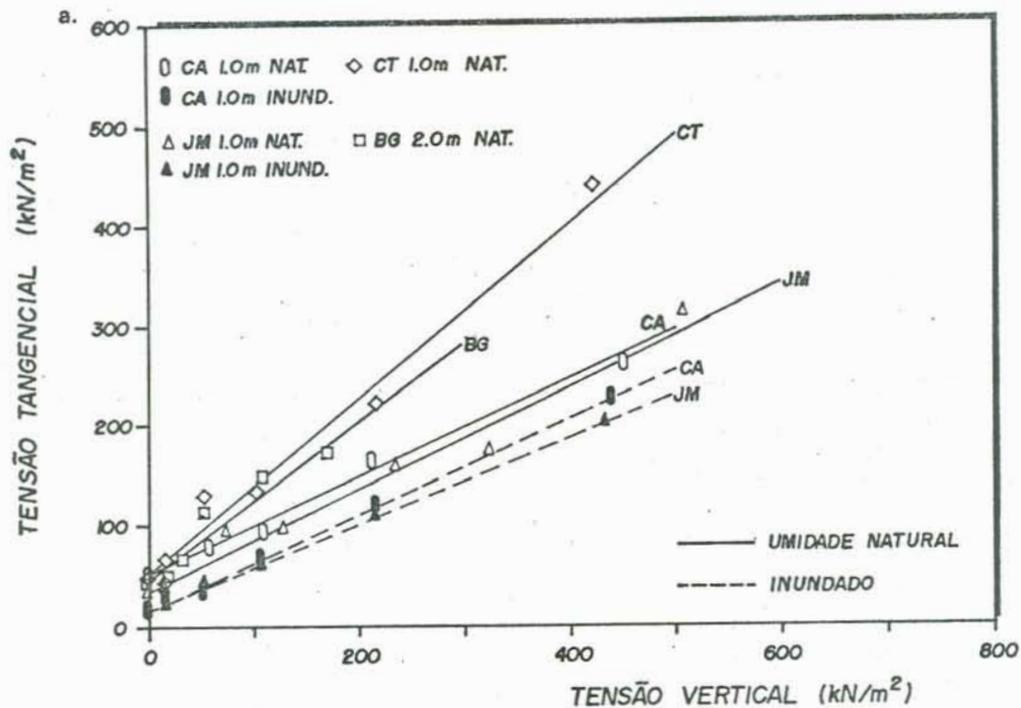


FIGURA 5.5.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada -unidades PVg e Rg (g.I)  
a. horizonte B  
b. horizonte C



b.

REFI	HORIZ.	PROF.	NATURAL		INUNDADO	
			COESAO kN/m <sup>2</sup>	ANG.DE ATRITO	COESAO kN/m <sup>2</sup>	ANG.DE ATRITO
CA	B	1.0	54.3	26	15.4	26
CA	C	3.5	53.6	29	27.8	29
CT	B	1.0	55.7	41	-	-
CT	C	2.0	61.9	35	34.4	29
AR	C	3.0	33.2	35	14.5	34
JM	B	1.0	38.4	27	17.8	23
BG	B	2.0	49.5	38	-	-
BG	C	16.0	-	-	20.0	24

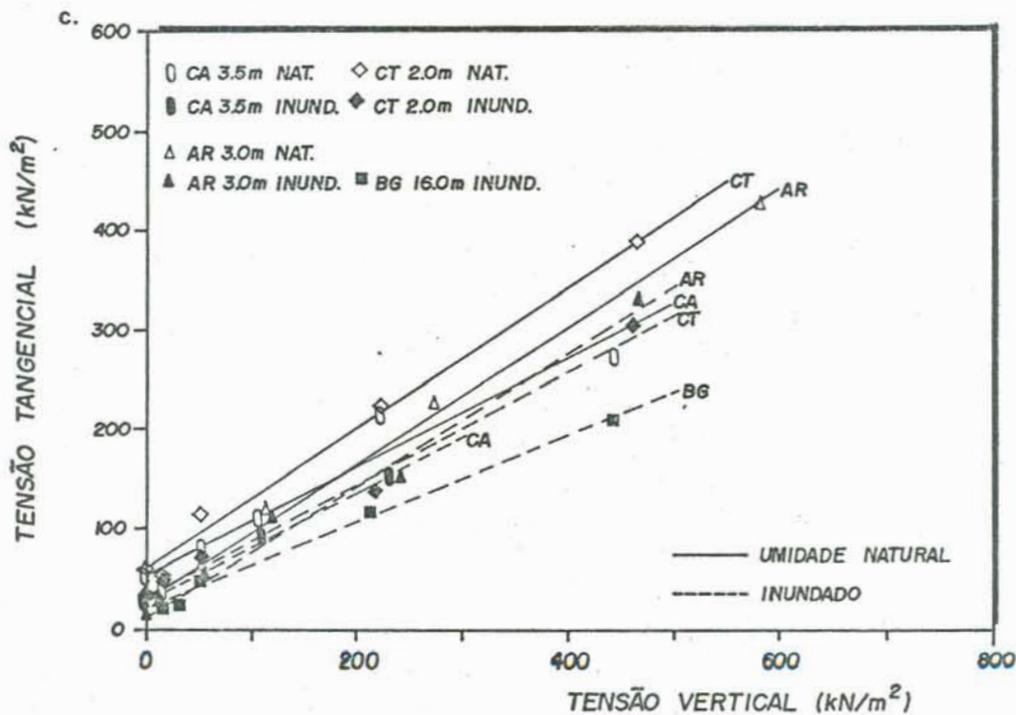


FIGURA 5.5.8.1 - Envoltórias de resistência - unidades PVg e Rg (g.I)

a. horizonte B

b. valores de c e  $\phi$

c. horizonte C

HORIZ	c [kN/m <sup>2</sup> ]		Ø [graus]	
	natural	inundado	natural	inundado
HOR B	38.4-55.7	15.4-17.8	26-41	23-26
HOR C	33.2-61.9	14.5-34.4	29-35	24-34

#### 5.5.9 - Colapsividade

Os valores para o coeficiente de colapso por ponto são apresentados na tabela 5.5.9.1. Os valores máximos por ponto e as respectivas tensões assim variaram em função dos horizontes:

HORIZ	imáx [%]	TENSÃO P/ imáx [kN/m <sup>2</sup> ]
HOR B	6.3-7.6	100-200
HOR C	4.1-4.8	200-400

#### 5.6 - UNIDADES GEOTECNICAS COM SUBSTRATO MIGMATITOS P<sub>Vm</sub> e R<sub>m</sub>

##### 5.6.1 - Investigação

As rochas migmatíticas da região, sujeitas a intensos processos de metamorfismo, constituem uma litologia muito complexa. Este fato propicia a ocorrência de solos muito heterogêneos, principalmente os saprolíticos, condicionados a composição e estrutura da rocha de origem.

Levando em conta este aspecto, foram investigados onze perfis de solos oriundos destas rochas, sendo que cinco deles foram amostrados e ensaiados em laboratório. São eles:

- BM - BECO DO MONZA
- CC - CERAMICA CORDEIRO
- CE - CEEE
- F - AV. FORTE
- SF - PARQUE SANTA FE

A identificação completa destes perfis é apresentada na tabela 5.6.1.1.

##### 5.6.2 - Características Físico-Morfológicas dos Perfis

Estas rochas, pelo que consta, de maior idade

TABELA 5.5.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidades Pv<sub>g</sub> e R<sub>g</sub> (g.I)

IREFI	HORIZ.	PROF. m	PESO ESPECÍFICO kN/m <sup>3</sup>			INDICE VAZIOS (%)	GRAU SATUR. (%)	UNIDADE NATURAL (%)
			APARENTE NATURAL	APARENTE SECO	GRAOS			
CA	B	1.0	16.6	13.5	26.3	0.95	64.1	23.1
CA	C	3.5	16.5	14.2	26.0	0.82	50.5	16.0
CT	B	1.0	18.1	15.2	26.3	0.73	68.8	19.1
CT	C	2.0	17.3	14.9	26.3	0.77	56.1	16.3
CT	C	5.0	-	-	26.5	-	-	-
CT	C	6.0	-	-	26.1	-	-	-
CT	C	8.0	-	-	26.2	-	-	-
CT	C	10.0	-	-	26.3	-	-	-
CT	C	12.0	-	-	26.4	-	-	-
CT	C	13.0	-	-	26.3	-	-	-
AR	C	3.0	16.5	13.6	26.3	0.94	59.6	21.2
JH	B	1.0	16.0	12.6	26.1	1.08	65.8	27.2
BG	B	2.0	17.2	14.6	26.2	0.79	57.8	17.3
BG	C	4.0	-	-	26.3	-	-	-
BG	C	6.0	-	-	26.9	-	-	-
BG	C	7.0	-	-	26.7	-	-	-
BG	C	11.0	-	-	26.6	-	-	-
BG	C	16.0	17.9	14.6	26.8	0.84	73.7	23.2
TS	B	2.0	-	-	27.1	-	-	-
TS	C	4.0	-	-	27.2	-	-	-
TS	C	6.5	-	-	26.8	-	-	-
TS	C	8.0	-	-	26.8	-	-	-

TABELA 5.5.9.1 - Coeficientes de colapso (i) - unidades Pv<sub>g</sub> e R<sub>g</sub> (g.I)

IREFI	HORIZ.	PROF. m	COEFICIENTE DE COLAPSIVIDADE i (%)				
			PRESSAO VERTICAL kN/m <sup>2</sup>				
			15	50	100	200	400
CA	B	1.0	0.16	2.52	5.48	6.30	3.44
CA	C	3.5	1.61	1.02	3.06	4.80	-
CT	C	2.0	0.83	3.44	-	3.27	4.76
AR	C	3.0	0.57	2.59	3.13	2.95	4.09
JH	B	1.0	0.19	3.95	7.60	6.21	3.11

geológica, foram sujeitas a processos intempéricos e erosivos mais intensos, constituindo um relevo mais suave de coxilhas.

Os perfis de solos formados nestas unidades são, em geral, mais profundos e evoluídos. A rocha sã mais raramente aflora a superfície.

O relevo suave propicia uma maior fixação do horizonte A, nitidamente mais arenoso que o horizonte B, aspecto característico do processo de podzolização.

O horizonte B avermelhado apresenta textura argilosa com alguma areia. No caso de alguns perfis podzólicos vermelho-amarelo investigados, a lixiviação resultou em uma estrutura bastante friável para os solos deste horizonte.

Os solos saprolíticos do horizonte C mostraram-se muito heterogêneos, com textura variando desde argilosa a arenosa e colorações muito variadas.

Os perfis, em geral, são bem drenados.

#### 5.6.3 - Mineralogia

A análise dos componentes mineralógicos do material de origem e dos solos saprolíticos torna-se tão complexa quanto a própria litologia dos migmatitos. A ocorrência de solos saprolíticos visivelmente micáceos foi verificada.

Para análise mineralógica por difratograma de raio X foram enviadas amostras do horizonte B (perfil CC) e do horizonte C (perfil CE). A fração fina do horizonte B revelou quartzo e o argilo-mineral caolinita e do C, além do quartzo e caolinita, revelou o argilo-mineral illita.

#### 5.6.4 - Granulometria

A distribuição granulométrica e a classificação textural dos solos amostrados são apresentadas na tabela 5.6.4.1. A figura 5.6.4.1 mostra as curvas granulométricas obtidas para os ensaios com defloculante.

#### 5.6.5 - Plasticidade

Os limites de consistência e os índices de plasticidade encontrados para estes solos, desde os ensaios de caracterização, são apresentados na tabela 5.6.5.1.

TABELA 5.6.1.1 - Identificação das amostras - unidades PVm e Rm

INUM. IREF.	PERFIL	LOCALIDADE	UNIDADE DE		CLASS. PEDOL.	UNIDADE GEOTECNICA	MAT. ORIGEM	HORIZ.	PROF.	
			REFI RAD/86	MAPEAM. BRA/73						
8	03	B.DO MONZA	BH	PVd1	PM1	PV	Rm	MIG.HOM.	B	1.5
9	35	CER.CORD.	CC	PVd1	Ca2	PV	Rm/PVm	M.HOM/AST	B	1.0
10	37	PQ.STA.FE	SF	PVd1	Ca2	PV	Rm/PVm	MIG.HOM.	B	1.0
42									C	3.5
11	12	CEEE	CE	PVd1	Ca2	PV	Rm/PVm	MIG.HET.	B	1.0
43									C	4.0
44	39	AV.DO FORTE	F1	PVd1	Ca2	PV	PVpf/m	MIG.HET.	C1	3.0
45	39	AV.DO FORTE	F2	PVd1	Ca2	PV	PVpf/m	MIG.HET.	C2	3.0

TABELA 5.6.4.1 - Granulometria - unidades PVm e Rm

IREFI	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA COM DEFLOCULANTE [%]					CLASSIFICACAO TEXTURAL	
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA	TRIANGULAR
BH	B	1.5	0	5	13	12	14	56	ag.
CC	B	1.0	0	2	12	38	30	18	fr.ar./fr.
SF	B	1.0	0	3	11	21	35	30	fr.ag.
SF	C	3.5	0	3	29	16	34	18	fr.
CE	B	1.0	0	13	10	12	23	42	ag.
CE	C	4.0	0	9	21	28	32	10	fr.ar.
F1	C1	3.0	0	15	22	21	35	7	fr.ar.
F2	C2	3.0	0	6	29	15	50	0	fr.ar./fr.sl.

IREFI	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA SEM DEFLOCULANTE [%]					ARGILA
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	
BH	B	1.5	0	4	20	19	57	0
CC	B	1.0	0	2	11	39	45	3
SF	B	1.0	0	3	9	21	61	6
SF	C	3.5	0	3	24	19	54	0
CE	B	1.0	0	12	13	24	51	0
CE	C	4.0	0	9	25	21	45	0
F1	C1	3.0	0	15	25	17	42	1
F2	C2	3.0	0	5	31	17	47	0

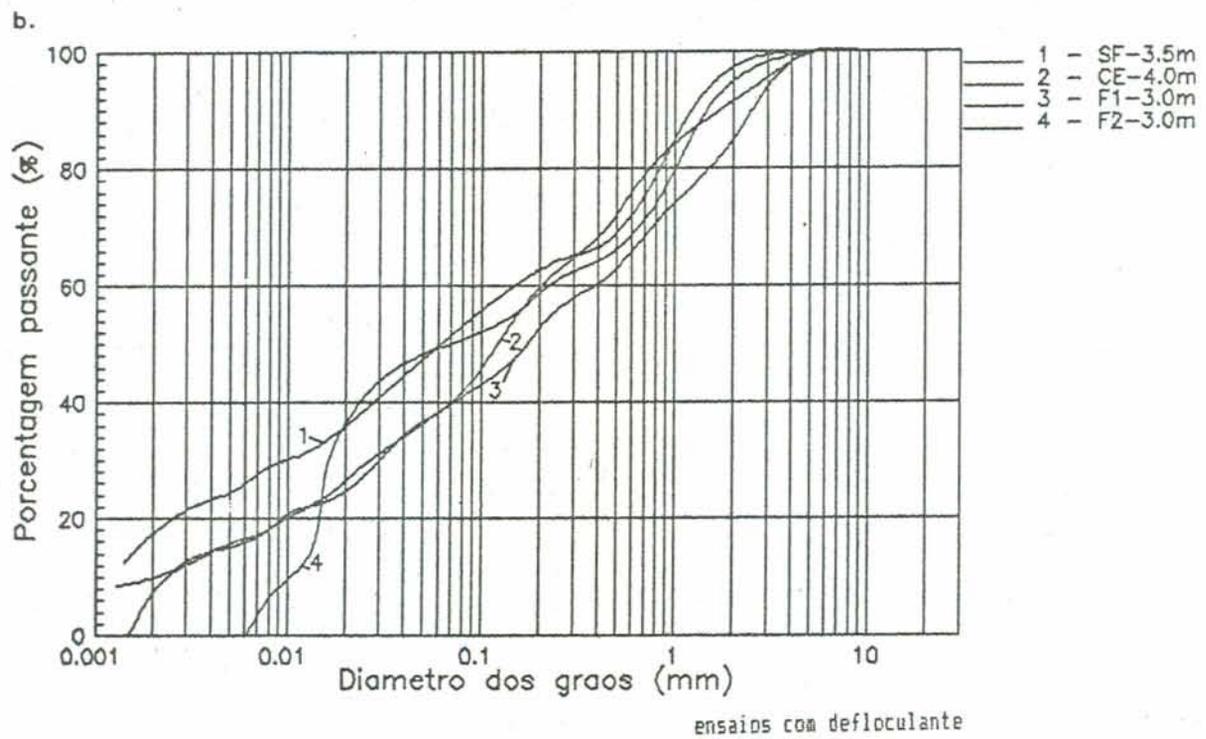
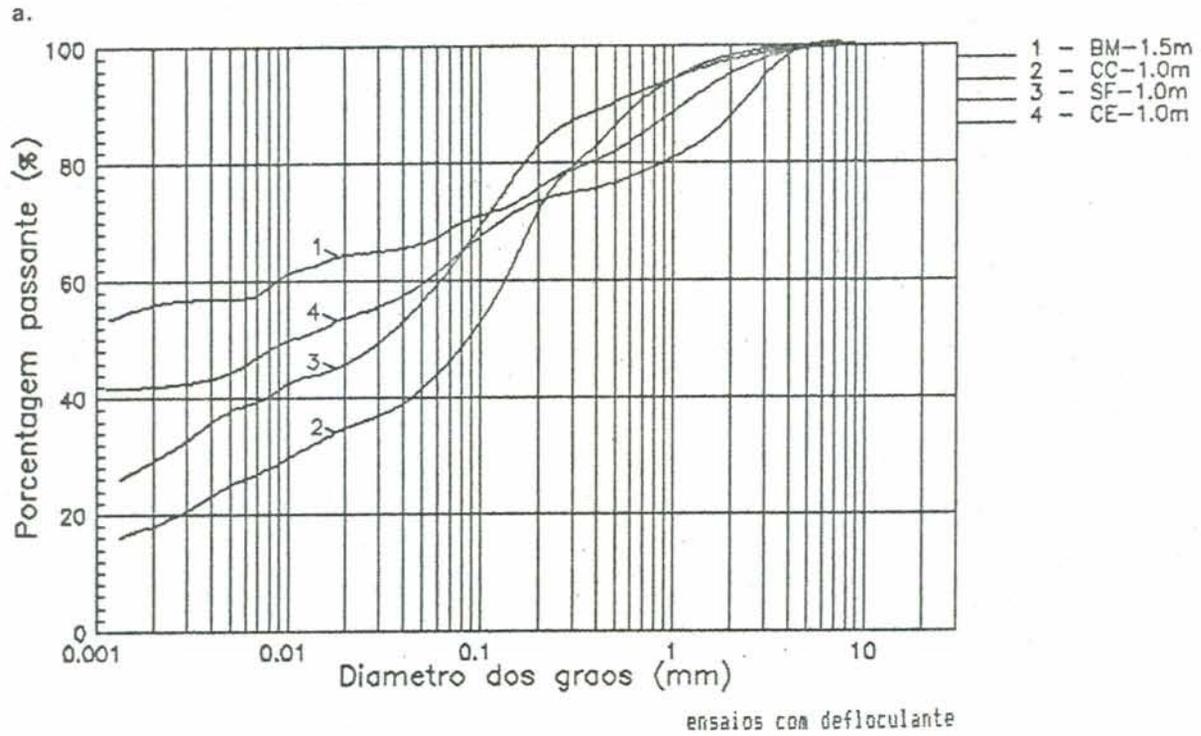


FIGURA 5.6.4.1 - Curvas granulométricas - unidades PVm e Rm  
a. horizonte B  
b. horizonte C

Os valores médios por horizonte de cada perfil são:

Wl/Wp/IP	HOR B	HOR C
Wl (%)	46	43
Wp (%)	32	36
IP (%)	14	7

A tabela 5.6.5.2 apresenta a classificação das amostras.

#### 5.6.6 - Índices Físicos

Os índices físicos e peso específico dos grãos destes solos de migmatitos são apresentados na tabela 5.6.6.1.

Os valores médios por horizonte de cada perfil são:

HORIZ	PESO ESP. GRAOS [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. NAT. [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. SECO [kN/m <sup>3</sup> ]	INDICE VAZIOS	GRAU SAT. [%]	TEOR UMID [%]
HOR B	26.4	17.4	14.4	0.85	65.3	20.6
HOR C	26.5	16.9	14.2	0.90	61.9	20.6

#### 5.6.7 - Compressibilidade

Os valores para os índices de compressibilidade dos solos ensaiados sob compressão confinada foram os seguintes:

NIVEL DE TENSÕES [kN/m <sup>2</sup> ]	Valores de C e Cd (variações e médias)			
	HOR B		HOR C	
	natural	inundado	natural	inundado
12.5-25	0.02	0.02-0.03 (0.03)	0.01-0.04 (0.02)	0.01-0.06 (0.03)
25-50	0.05	0.03-0.07 (0.05)	0.02-0.06 (0.04)	0.03-0.10 (0.06)
50-100	0.07-0.08 (0.08)	0.05-0.09 (0.07)	0.04-0.11 (0.07)	0.05-0.15 (0.09)
100-200	0.12-0.13 (0.13)	0.07-0.19 (0.13)	0.06-0.16 (0.12)	0.07-0.25 (0.14)
200-400	0.16-0.26 (0.21)	0.10-0.28 (0.20)	0.11-0.35 (0.22)	0.15-0.33 (0.22)
400-800	0.22-0.31 (0.27)	0.14-0.29 (0.24)	0.20-0.46 (0.27)	0.20-0.36 (0.27)
800-1600	0.25-0.28 (0.27)	0.22-0.25 (0.24)	0.28-0.51 (0.36)	0.26-0.39 (0.31)
1600-3200	-	-	0.28-0.44 (0.35)	0.26-0.41 (0.32)
DESCARGA (Cd)	0.01-0.03 (0.02)	0.01-0.03 (0.02)	0.02-0.05 (0.04)	0.03-0.06 (0.04)

TABELA 5.6.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidades Pvm e Rm

IREFI	HORIZ.	PROF.	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	IP
			(%)	(%)	(%)
BK	B	1.5	52	32	20
CC	B	1.0	31	25	6
SF	B	1.0	43	30	13
SF	C	3.5	42	38	4
CE	B	1.0	58	42	16
CE	C	4.0	41	32	9
F1	C1	3.0	40	34	6
F2	C2	3.0	49	40	9

TABELA 5.6.5.2 - Classificação das amostras - unidades Pvm e Rm

IREFI	HORIZ.	PROF.	CLASSIFICACAO	
			SUCS	HRB
BK	B	1.5	MH	A-7-5(13)
CC	B	1.0	SM	A-4(3)
SF	B	1.0	ML	A-7-5(8)
SF	C	3.5	ML	A-5(4)
CE	B	1.0	MH	A-7-5(11)
CE	C	4.0	SM	A-5(1)
F1	C1	3.0	SM	A-4(1)
F2	C2	3.0	SM	A-5(4)

TABELA 5.6.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidades Pvm e Rm

IREFI	HORIZ.	PROF.	PESO ESPECIFICO kN/m <sup>3</sup>			GRAU UMIDADE		
			APARENTE NATURAL	APARENTE SECO	GRAOS	INDICE VAZIOS	SATUR. (%)	NATURAL (%)
BK	B	1.5	17.0	14.0	26.2	0.88	65.9	21.5
CC	B	1.0	17.0	14.4	26.5	0.85	56.5	18.0
SF	B	1.0	-	-	26.2	-	-	-
SF	C	3.5	17.1	14.5	26.5	0.83	58.6	18.3
CE	B	1.0	18.1	14.8	26.8	0.81	73.5	22.4
CE	C	4.0	17.8	14.5	26.1	0.80	72.6	22.1
F1	C1	3.0	16.6	14.9	26.7	0.94	57.8	20.4
F2	C2	3.0	15.1	12.3	26.8	1.18	51.3	22.4

A figura 5.6.7.1 apresenta as curvas do logaritmo da pressão vertical pela deformação em compressão confinada.

#### 5.6.8 - Resistência ao Cisalhamento

Os parâmetros de resistência encontrados para os solos destas unidades geotécnicas, em função dos horizontes, são:

HORIZ	c [kN/m <sup>2</sup> ]		Ø [graus]	
	natural	inundado	natural	inundado
HOR B	22.4-93.9	15.7-49.9	26-39	24-26
HOR C	27.0-107.5	10.4-45.0	28-39	21-34

A figura 5.6.8.1 mostra as envoltórias de resistência destes solos.

#### 5.6.9 - Colapsividade

Os coeficientes de colapso para as diferentes tensões verticais são apresentados na tabela 5.6.9.1.

Os valores máximos e as respectivas tensões assim variaram em função dos horizontes:

HORIZ	imáx [%]	TENSÃO P/ imáx [kN/m <sup>2</sup> ]
HOR B	5.7-8.0	100-400
HOR C	3.7-11.6	100-400

### 5.7 - UNIDADE GEOTECNICA SOBRE O ALTERITO SERRA DE TAPES - PVpf(AST)

#### 5.7.1 - Investigação

Nas zonas de ocorrência do Alterito Serra de Tapes foram investigados cinco perfis, dos quais três foram amostrados. São eles:

BZ - BALTAZAR O. GARCIA

JI - JARDIM ITU

UP - UPAMAROTI

A tabela 5.7.1.1 apresenta a identificação completa destes perfis.

Nos trabalhos de investigação verificou-se que os

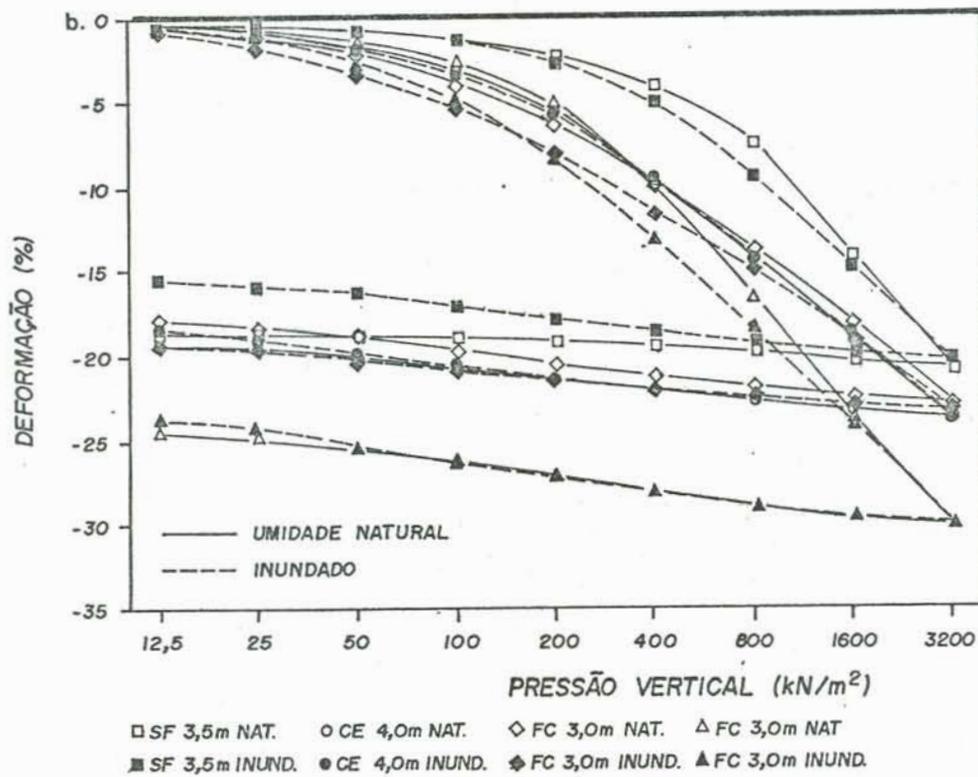
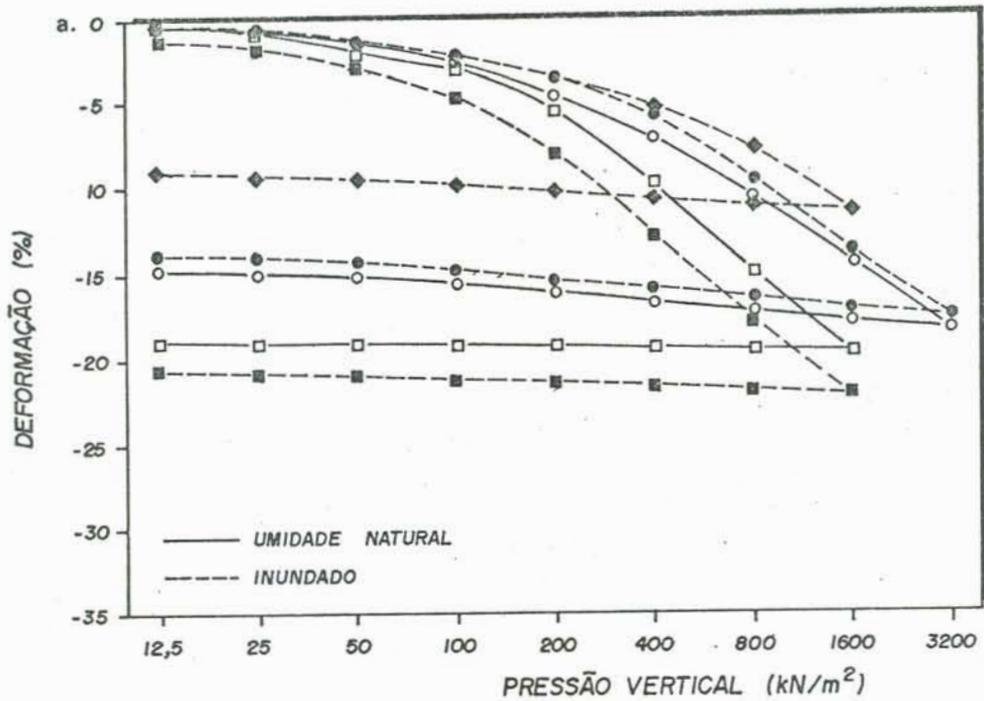
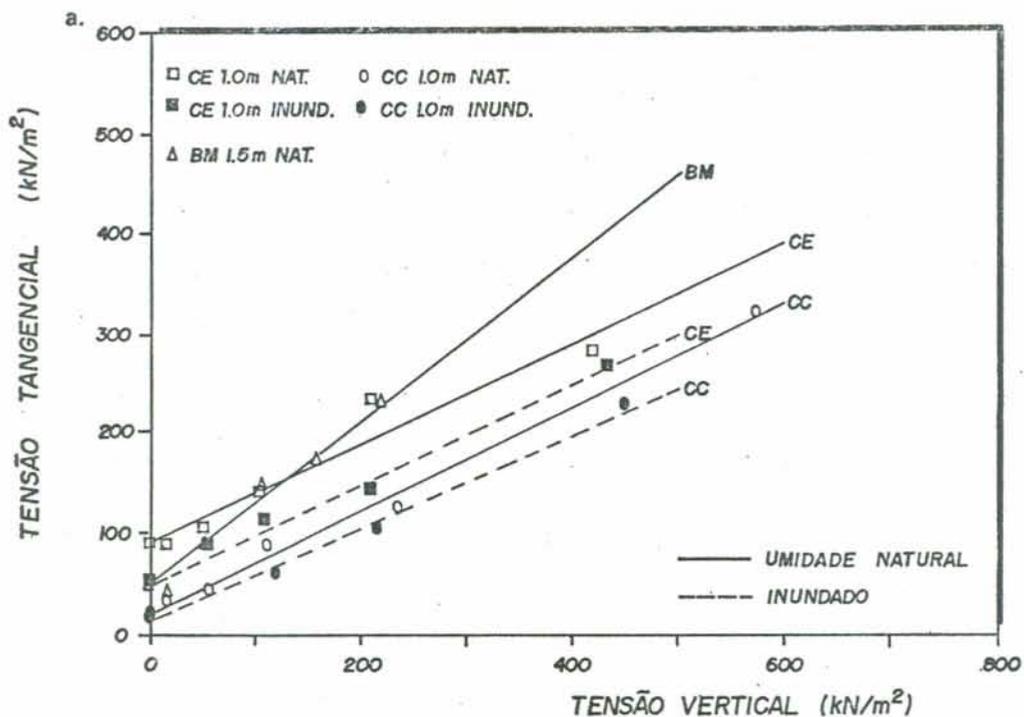


FIGURA 5.6.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada - unidades P<sub>Vm</sub> e R<sub>m</sub> de  
a. horizonte B  
b. horizonte C



b.

REFI	HORIZ.	PROF.	NATURAL		INUNDADO	
			COESAO kN/m <sup>2</sup>	ANG.DE ATRITO	COESAO kN/m <sup>2</sup>	ANG.DE ATRITO
BH	B	1.5	54.0	39	-	-
CC	B	1.0	22.4	27	15.7	24
SF	C	3.5	107.5	39	45.0	21
CE	B	1.0	93.9	26	49.9	26
CE	C	4.0	47.3	29	27.7	24
F1	C1	3.0	38.8	34	11.5	34
F2	C2	3.0	27.0	28	10.4	28

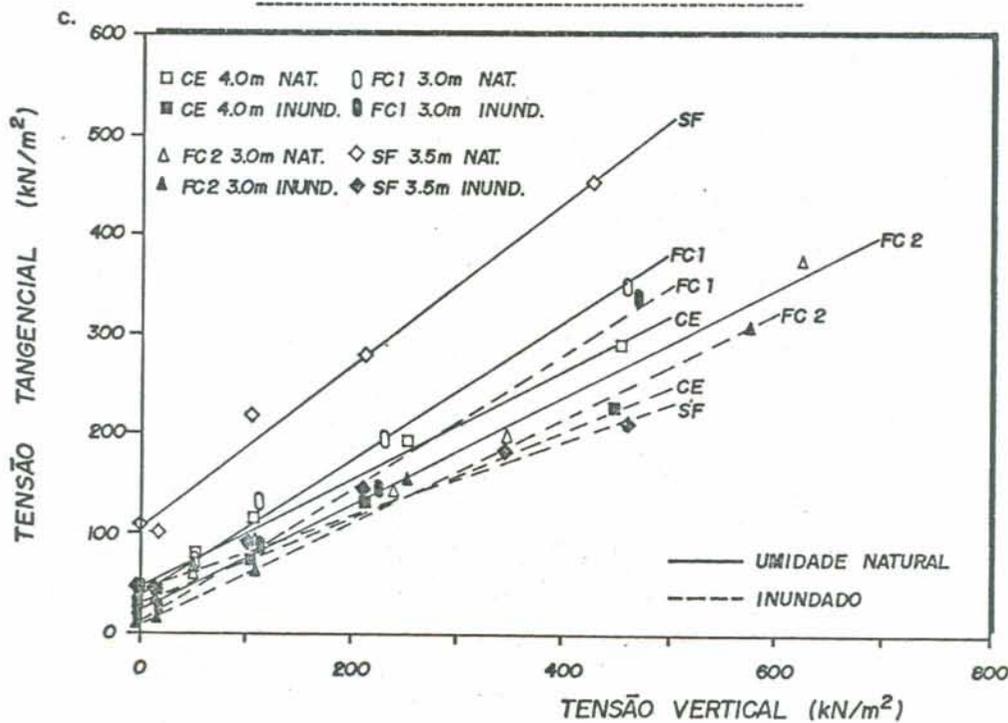


FIGURA 5.6.8.1 - Envoltórias de resistência - unidades P<sub>Vm</sub> e R<sub>m</sub>  
 a. horizonte B  
 b. valores de c e Ø  
 c. horizonte C

perfis podzólicos de solos laterizados, próprios da unidade, estabeleciam um contato lateral interdigitado com os solos sedimentares hidromórficos (HID) ou mesmo ocorria que os paleossolos coluvionares cobriam as formações sedimentares nas transições para o relevo plano. A investigação de campo também revelou a presença, em certos locais, de colúvios recentes (sem evolução pedogenética) nesta unidade; estes materiais não são incorporados ao estudo, pois envolvem enfoques diferenciados.

#### 5.7.2 -Características Físico-Morfológicas dos Perfis

Sobre os paleossolos ferralitizados de origem coluvionar e eluvionar são formados os mais bem desenvolvidos perfis podzólicos vermelho-amarelo da região de estudo.

Estes perfis apresentam um horizonte B laterizado relativamente profundo. O transporte coluvionar não aparenta ser recente e é evidenciado pela presença de grãos grossos dispersos, "discordantes" com a textura mais argilosa do horizonte.

Apresentam características estruturais bastante variáveis em função do intemperismo. A cimentação por óxidos de ferro em agregações argilosas tende a formar concreções ferruginosas que tornam estes solos bastante rijos e duros, principalmente quando pouco úmidos. Esta característica foi observada nos perfis investigados, com maior ou menor intensidade, dependente da gênese de cada perfil. SCHNEIDER et al.(1974), na Folha Geológica de Porto Alegre, também descreve cimentações por sesquióxidos para estes paleossolos bastante intemperizados.

A drenagem do perfil pode ser comprometida na sua uniformidade pelos referidos concrecionamentos. Em alguns casos, verificou-se que, a nível de detalhe, estabeleciam-se caminhos preferenciais de percolação, onde processos de redução dos óxidos de ferro prevalecem e tornam o perfil visivelmente mosqueado (com manchas cinzentas na matriz de solo avermelhado).

Onde o horizonte A permanecia estável, era nítido o gradiente textural (A mais arenoso que o B), com o acúmulo de argila no horizonte B subsuperficial.

Em geral, estes solos apresentam as maiores espessuras em horizonte B laterizado, é portanto nesta unidade onde este material verifica maior importância geotécnica.

O horizonte C corresponde a litologia a qual os paleossolos recobrem.

### 5.7.3 - Mineralogia

Uma característica importante destes solos é a laterização ou ferralitização, ou seja, existe acúmulo de sesquióxidos de ferro formando agregações, que tornam-se bastante endurecidas em condições de pouca umidade. Entretanto, o endurecimento ainda é facilmente reversível com um maior umedecimento do material.

Ensaio de difratograma de raio X revelaram para a fração fina o argilo-mineral caolinita e quartzo. Na fração grossa são encontrados grãos de quartzo de tamanhos e formas diversas.

### 5.7.4 - Granulometria

A distribuição em frações granulométricas destes solos e a classificação textural são apresentadas na tabela 5.7.4.1.

A figura 5.7.4.1 mostra as curvas granulométricas obtidas para os ensaios com defloculante.

### 5.7.5 - Plasticidade

Os valores dos limites de consistência e índices de plasticidade são dados na tabela 5.7.5.1.

Os valores médios para estes parâmetros são:

!Wl/Wp/IP !	HOR B !
Wl (%)	42
Wp (%)	31
IP (%)	11

A classificação dos materiais é apresentada na tabela 5.7.5.2.

TABELA 5.6.9.1 - Coeficientes de colapso (i) - unidades P<sub>Vm</sub> e R<sub>m</sub>

REFI	HORIZ.	PROF.	COEFICIENTE DE COLAPSIVIDADE i (%)					
			PRESSAO VERTICAL kN/m <sup>2</sup>					
			15	50	100	200	300	400
CC	B	1.0	0.24	1.27	7.97	5.96	-	2.05
SF	C	3.5	0.45	1.38	4.50	6.65	14.17	11.60
CE	B	1.0	0.49	0.34	1.60	5.04	-	5.65
CE	C	4.0	0.26	1.19	3.28	3.70	-	0.69
F1	C1	3.0	1.27	2.70	5.77	4.87	-	4.86
F2	C2	3.0	3.46	2.00	7.66	8.56	-	5.75

TABELA 5.7.1.1 - Identificação das amostras - unidade PVpf (AST)

NUM.	PERFIL	LOCALIDADE	REFI	UNIDADE DE		CLASS.	UNIDADE	MAT.	HORIZ.	PROF.
				MAPEAM.	PEDOLOG					
REFI				RAD/86	BRA/731	PERFIL	GEOTECNICA	ORIGEM		
12	11	BALTAZAR	BZ	PVd1	Ca2	PV	PVpf(AST)	A.SER.TAP	B	1.0
13	40	UPAMAROTI	UP	PVd10	Ca2	PV	PVpf(AST)	A.SER.TAP	B	1.0
14	38	JARDIM ITU	JI	PVd1	Ca2	PV	PVpf(AST)	A.SER.TAP	B	3.0

TABELA 5.7.4.1 - Granulometria - unidade PVpf (AST)

REFI	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA COM DEFLOCULANTE						CLASSIFICACAO
			[%]						
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA	TEXTURAL
									TRIANGULAR
BZ	B	1.0	0	6	9	31	24	30	fr.ag.ar.
UP	B	1.0	0	10	18	10	18	44	ag.
JI	B	3.0	1	9	10	30	40	10	fr.

REFI	HORIZ.	PROF.	GRANULOMETRIA SEM DEFLOCULANTE					
			[%]					
			PEDREG.	AR.GROS	AR.MEDI	AR.FINA	SILTE	ARGILA
BZ	B	1.0	0	6	8	26	60	0
UP	B	1.0	0	10	15	28	47	0
JI	B	3.0	1	9	12	31	47	0

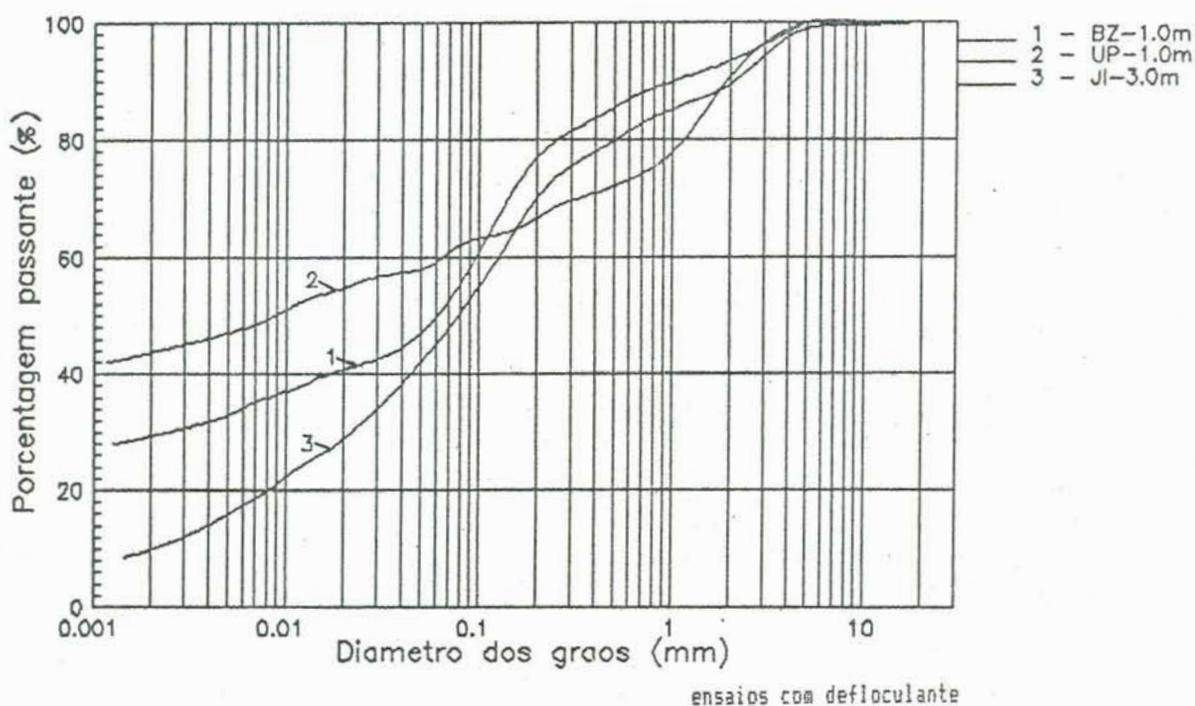


FIGURA 5.7.4.1 - Curvas granulométricas - unidade PVpf (AST)

TABELA 5.7.5.1 - Limites de Atterberg e índices de plasticidade - unidade PVpf (AST)

REFI	HORIZ.	PROF.	W <sub>L</sub>	W <sub>p</sub>	IP
		m	(%)	(%)	(%)
BZ	B	1.0	38	29	9
UP	B	1.0	50	39	11
JI	B	3.0	38	26	12

TABELA 5.7.5.2 - Classificação das amostras -unidade PVpf (AST)

REFI	HORIZ.	PROF.	CLASSIFICACAO	
		m	SUCS	HRB
BZ	B	1.0	ML	A-4(4)
UP	B	1.0	ML/MH	A-7-5(7)
JI	B	3.0	SH	A-6(4)

### 5.7.6 - Índices Físicos

Os valores dos índices físicos e peso específico dos grãos para os pontos amostrados são dados na tabela 5.7.6.1.

Os valores médios destas grandezas são:

HORIZ	PESO ESP. GRÃOS [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. NAT. [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. AP. SECO [kN/m <sup>3</sup> ]	ÍNDICE VAZIOS	GRAU SAT. [%]	TEOR UMID [%]
HOR B	26.6	17.6	15.1	0.77	58.3	16.3

### 5.7.7 - Compressibilidade

Marcantes modificações estruturais foram verificadas nestes materiais, considerando amostragens em condições climáticas diferentes. Isto motivou que para a compressibilidade a análise fosse feita individualmente para amostras coletadas em tempo seco e tempo chuvoso. Este tipo de abordagem, diferenciada com a condição climática, se resumiu a compressibilidade. Foram os resultados de ensaios de compressão confinada aqueles que mostraram com clareza tal influência.

Os valores dos índices de compressibilidade são:

NÍVEL DE TENSÕES [kN/m <sup>2</sup> ]	Valores de C e Cd (variações e médias)		
	HOR B		
	natural(ps)	natural(pc)	inundado
12.5-25	0.01-0.04 (0.02)	0.03-0.04 (0.04)	0.01-0.07 (0.05)
25-50	0.01-0.07 (0.03)	0.11-0.12 (0.12)	0.02-0.18 (0.10)
50-100	0.03-0.11 (0.06)	0.17-0.22 (0.20)	0.03-0.24 (0.14)
100-200	0.03-0.18 (0.09)	0.20-0.37 (0.29)	0.05-0.34 (0.21)
200-400	0.05-0.20 (0.10)	0.28-0.41 (0.35)	0.06-0.34 (0.23)
400-800	0.07-0.24 (0.13)	0.28-0.34 (0.31)	0.11-0.38 (0.25)
800-1600	0.17-0.26 (0.21)	0.24-0.30 (0.27)	0.17-0.29 (0.24)
DESCARGA (Cd)	0.01	0.02	0.01-0.02 (0.02)

ps: período seco    pc: período chuvoso

As curvas do logaritmo da pressão vertical pela

deformação das amostras dos solos desta unidade são mostradas na figura 5.7.7.1.

#### 5.7.8 - Resistência ao Cisalhamento

A figura 5.7.8.1 apresenta as envoltórias de resistência obtidas dos ensaios de cisalhamento direto.

As variações nos parâmetros de coesão e atrito para os solos da unidade são:

HORIZ	c [kN/m <sup>2</sup> ]		Ø [graus]	
	natural	inundado	natural	inundado
HOR B	78.3-101.3	12.2-43.5	32-35	24-28

#### 5.7.9 - Colapsividade

A tabela 5.7.9.1 apresenta os valores para o coeficiente de colapso nos diferentes níveis de tensões.

Destaca-se a grande variação nos valores de  $i_{máx}$ :

HORIZ	$i_{máx}$ [%]	TENSAO P/ $i_{máx}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
HOR B	2.9-18.3	100-400

TABELA 5.7.6.1 - Índices físicos e peso específico dos grãos - unidade PVpf (AST)

REFI	HORIZ.	PROF.	PESO ESPECÍFICO kN/m <sup>3</sup>			GRAUS	ÍNDICE VAZIOS	GRAU SATUR. (%)	UMIDADE NATURAL (%)
			APARENTE NATURAL	APARENTE SECO	GRAOS				
BZ	B	1.0	19.5	16.7	27.0	0.61	71.9	16.4	
UP	B	1.0	16.8	14.4	25.9	0.81	53.8	16.4	
J1	B	3.0	16.5	14.3	26.8	0.89	49.3	16.1	

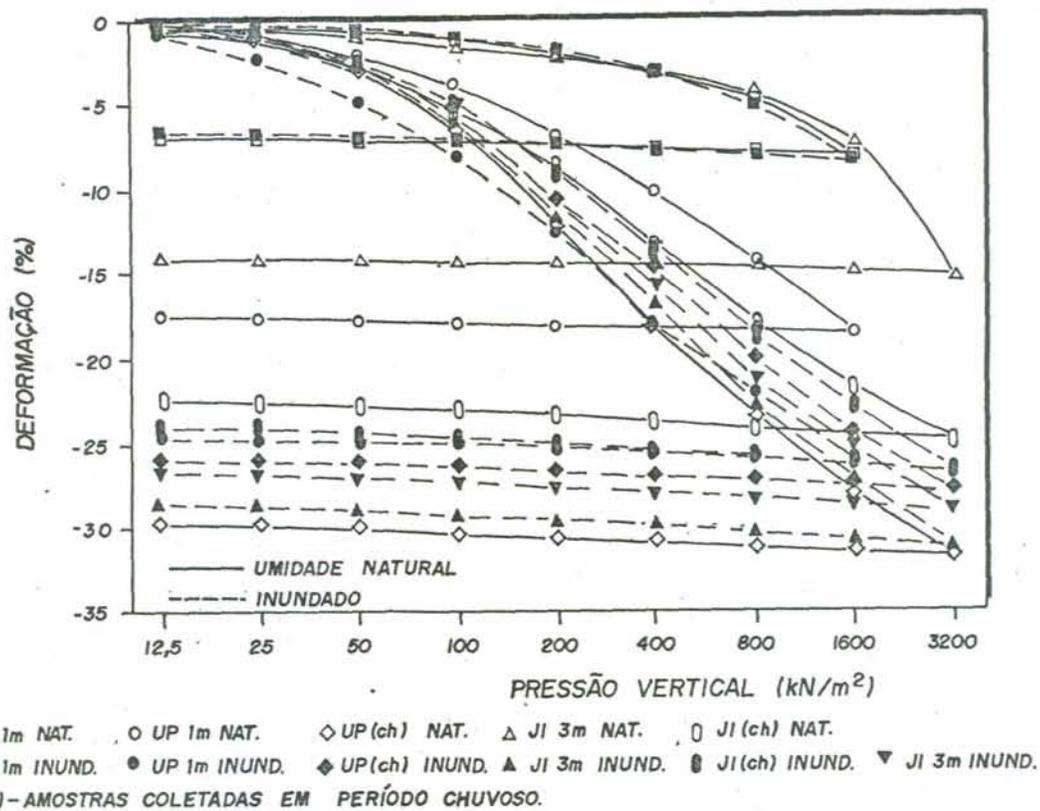
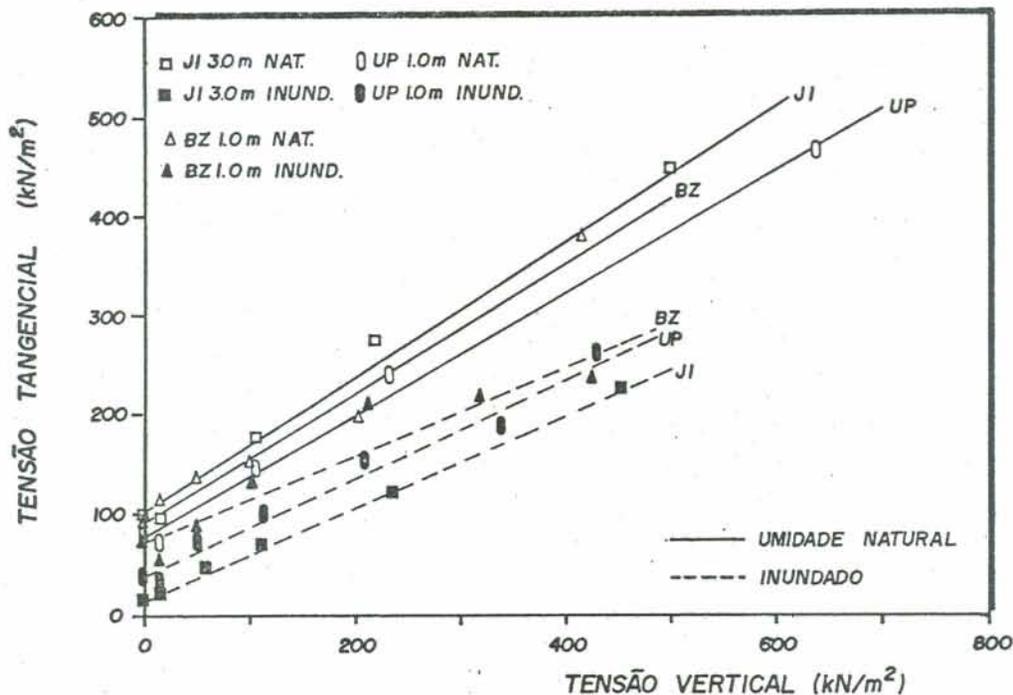


FIGURA 5.7.7.1 - Curvas pressão x deformação para ensaios de compressão confinada - unidade PVpf (AST)



REFI	HORIZ.	PROF. (m)	NATURAL		INUNDADO	
			COESAO (kN/m <sup>2</sup> )	ANG.DE ATRITO	COESAO (kN/m <sup>2</sup> )	ANG.DE ATRITO
BZ	B	1.0	94.0	33	71.5	24
UP	B	1.0	78.3	32	33.7	28
JI	B	3.0	101.3	35	12.2	25

FIGURA 5.7.8.1 - Envoltórias de resistência -unidade PVpf (AST)

TABELA 5.7.9.1 - Coeficientes de colapso (i)-unidade PVpf (AST)

REFI	HORIZ.	PROF. (m)	COEFICIENTE DE COLAPSIVIDADE (i) (%)					
			PRESSAO VERTICAL (kN/m <sup>2</sup> )					
			15	50	100	200	300	400
BZ	B	1.0	0.39	0.29	2.07	1.93	6.67	1.77
UP	B	1.0	0.71	1.33	4.50	3.78	10.53	8.86
JI	B	3.0	1.71	13.16	12.73	15.84	-	18.27

## **6 - ANÁLISE GLOBAL DAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS SOLOS DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS INVESTIGADAS**

Neste capítulo são analisados os dados obtidos desde os trabalhos de campo e principalmente dos ensaios de laboratório, com o objetivo de evidenciar algumas características e propriedades daqueles solos formados do intemperismo dos granitos, gnaisses e migmatitos de Porto Alegre. A análise é apresentada em seis ênfases, de acordo com as características e propriedades geotécnicas investigadas, são elas: granulometria, plasticidade, características estruturais do estado indeformado, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e colapsividade.

### **6.1 - GRANULOMETRIA**

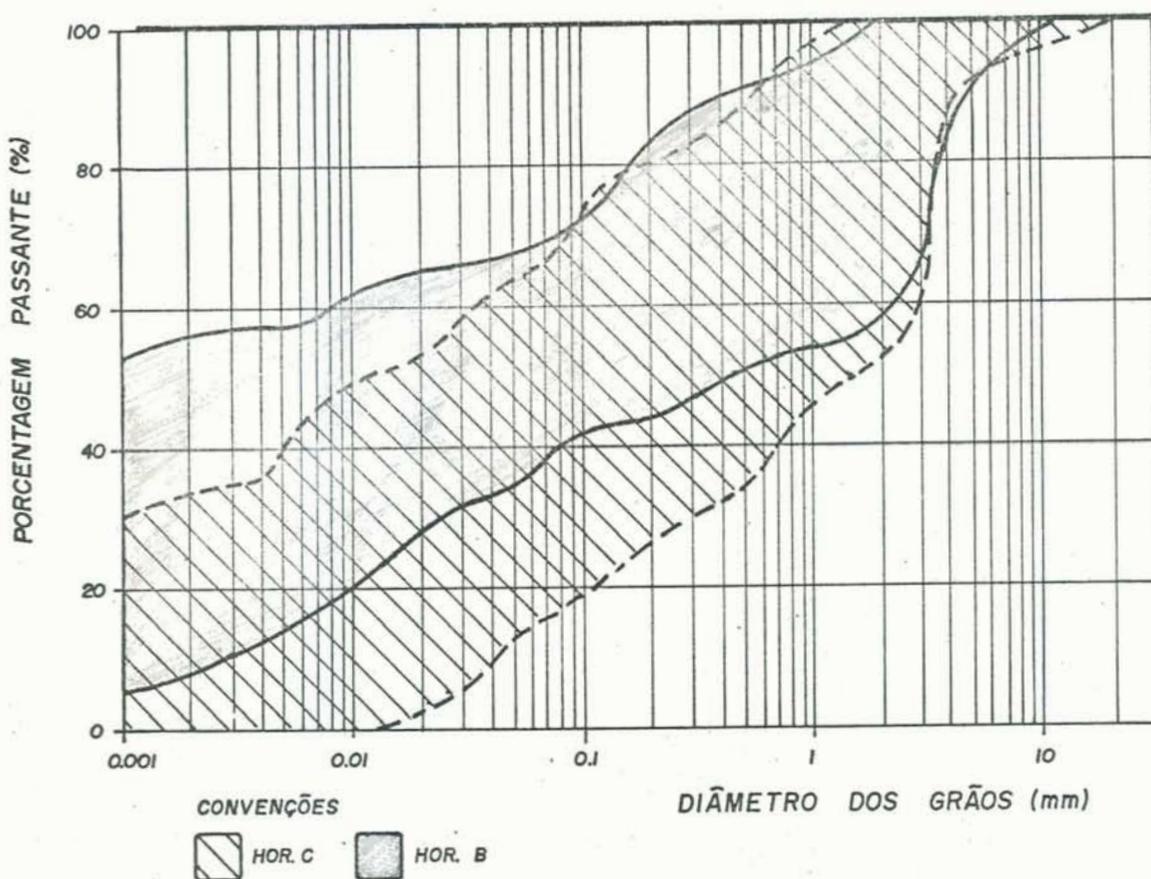
A granulometria dos solos dos horizontes B e C é representada pelas faixas granulométricas e diagrama textural mostrados na figura 6.1.1.

Observa-se que os solos de ambos horizontes apresentam granulometria bastante variada. A análise tátil-visual de campo, com o enquadramento dos materiais no perfil de intemperismo, favorece o esclarecimento de certas dispersões nos resultados; no entanto, são admitidos muitos fatores que influenciam na granulometria destes solos. No estudo destes materiais observou-se que os principais fatores estão relacionados ao grau e tipo de intemperismo e aos procedimentos dos ensaios granulométricos.

Para investigar a influência do intemperismo, foram analisados os resultados de granulometria de alguns perfis mais completos. A figura 6.1.2 apresenta a granulometria dos perfis CD, CT, BG e TS ao longo da profundidade.

A tendência esperada no aumento no teor de finos da rocha até os horizontes superficiais foi verificada.

a.



b.

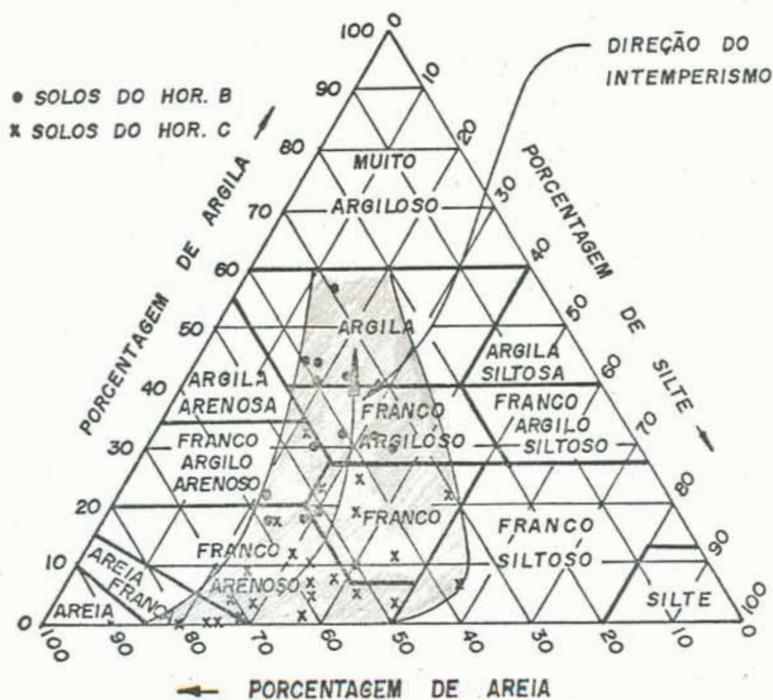


FIGURA 6.1.1 - Granulometria dos horizontes B e C  
 a. faixas granulométricas  
 b. diagrama textural

## FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

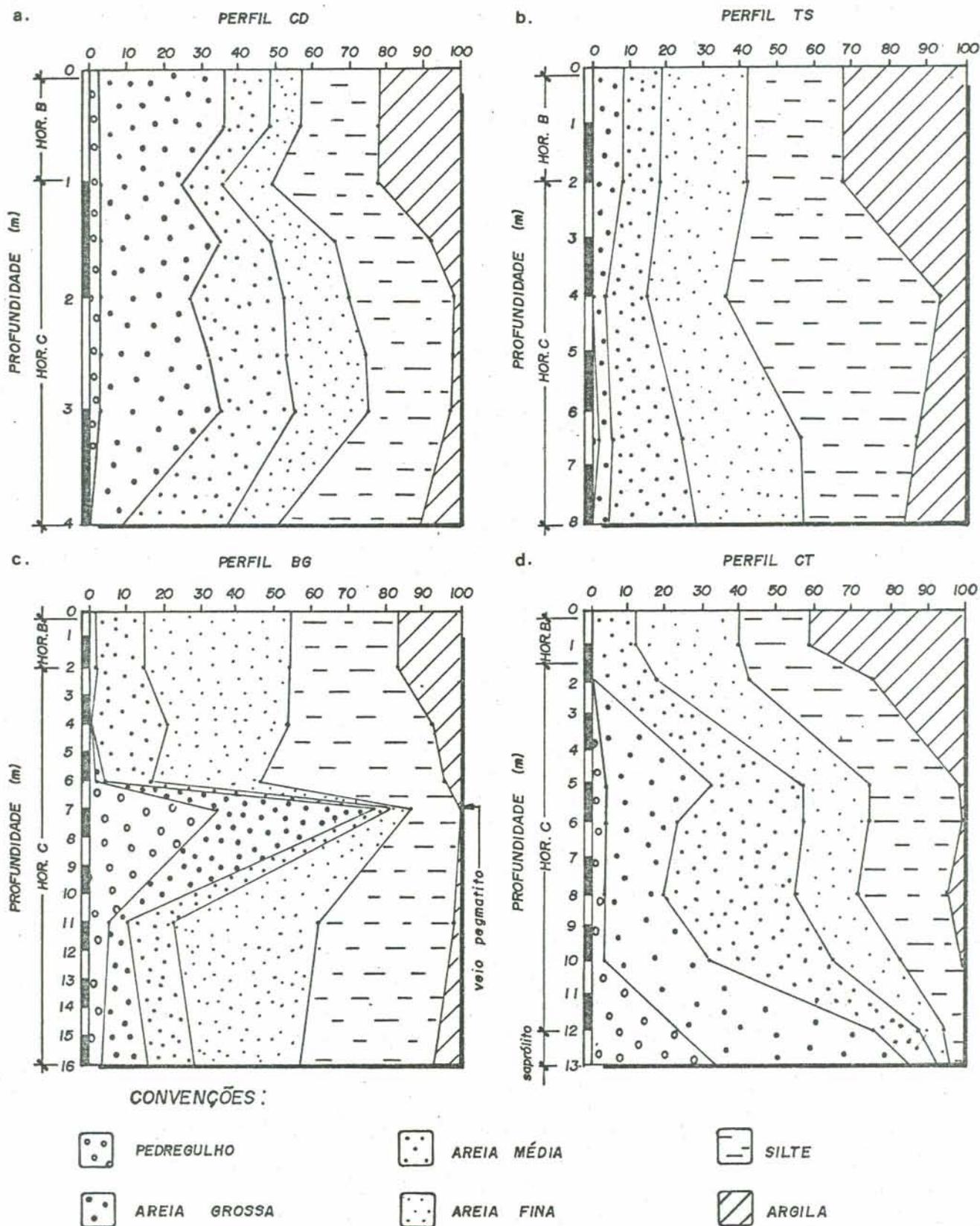


FIGURA 6.1.2 - Granulometria ao longo de perfis de intemperismo

- a. perfil CD  
 b. perfil TS  
 c. perfil BG  
 d. perfil CT

Entretanto, nota-se que esta variação só se torna sensível na transição do horizonte C saprolítico para o horizonte B.

Dentro do horizonte C, a ocorrência de zonas menos intemperizadas em meio a massa de solo saprolítico, como resquícios estruturais de núcleos de rocha (matacões), ou mais intemperizadas, como superfícies de infiltração de água (diaclasses, falhas, zonas de contato,...), foram freqüentemente observadas em campo. Estas heterogeneidades na massa de solo resultam em dispersões numa suposta variação contínua do intemperismo com a profundidade, constatadas numa simples análise visual dos materiais. Isto se reflete diretamente na granulometria, materiais localizados lado a lado no perfil e com intemperismo visivelmente diferente apresentam distribuição granulométrica distinta. Tem-se como exemplo os pontos F1 e F2 do perfil F da unidade PVm.

Cabe enfatizar que a heterogeneidade no intemperismo não só influencia a granulometria, mas também outras características e propriedades geotécnicas.

Quanto ao material de origem, verificou-se que a granulação e os tipos minerais da rocha-mãe vão repercutir na granulometria dos solos formados. Neste sentido, as unidades geotécnicas dão bom indicativo da textura dos materiais, exceto nos casos onde a variedade de rochas numa mesma unidade é muito grande (é o caso das unidades com substrato migmatitos).

Constatou-se que, no geral, as unidades com substrato Granito Ponta Grossa, Granito Cantagalo e Granito Santana apresentam solos saprolíticos mais grosseiros (em torno de 60 % de fração grossa).

Os solos lateríticos do horizonte B apresentam outras razões que podem justificar as variações na granulometria.

Alguns destes solos mostram sinais morfológicos de que sofreram transporte de caráter principalmente coluvial, nestes é comum a presença de grãos grosseiros de quartzo "incompatíveis" com a matriz mais fina e com o intemperismo do perfil. Estes grãos acabam por serem significativos na porcentagem em peso da fração areia grossa e até mesmo pedregulho.

Outro fator a ser considerado na granulometria deste horizonte é o grau de podzolização, que vai determinar uma

maior ou menor concentração de argila nos solos de perfis podzólicos vermelho-amarelo. E depende das condições de drenagem e lixiviação do perfil.

Os ensaios granulométricos (peneiramento e sedimentação) envolvem questões discutíveis que mereceram reflexão quando do estudo destes solos. Dizem respeito ao tratamento das amostras e aos métodos de ensaios propriamente dito.

A utilização de defloculante mostrou-se necessária na determinação da real fração argila, principalmente para os solos do horizonte B. Variações de 0 a 56 % no teor de argila de uma mesmo ponto amostrado foram verificadas na comparação entre ensaios respectivamente sem e com defloculante. A argila apresenta-se ligada a partículas maiores ou cimentadas em agregações de difícil dispersão.

O destorroamento das amostras mostrou aspectos questionáveis. Fortes agregações apresentadas por solos laterizados do horizonte B exigiram um paciente destorroamento, por outro lado, a maioria dos solos saprolíticos ensaiados apresentam grãos de feldspatos alterados em diversos tamanhos e em diferentes estágios de friabilidade. Em ambos os casos, com a preparação das amostras, tais grãos eram reduzidos a variáveis dimensões em função do grau de destorroamento. Embora um uniforme grau de destorroamento tivesse sido procurado, este fator de dispersão dos resultados não pode ser desprezado.

Também cabe enfatizar que os resultados dos ensaios por sedimentação dos solos muito micáceos, a destacar os solos saprolíticos dos perfis BG e CE, são duvidosos. A forma lamelar das partículas de mica resulta em processos de sedimentação que não obedecem a Lei de Stokes, válida somente para partículas esféricas e na qual basea-se o cálculo do ensaio por norma.

## 6.2 - PLASTICIDADE

Os gráficos da figura 6.2.1 mostram os limites de consistência ( $W_l$  e  $W_p$ ) e os teores de umidade natural dos solos estudados. Através do gráfico observa-se que o teor de umidade dos materiais dos horizontes B e C é inferior ao limite de plasticidade, logo, os materiais encontram-se no estado sólido

ou semi-sólido.

A figura 6.2.2 apresenta os solos estudados no Gráfico de Plasticidade de Casagrande.

São traçadas, para comparação, faixas de ocorrência dadas por VARGAS (1953) para solos de origem litológica semelhante. Quase todos os pontos ensaiados encontram-se nas faixas estabelecidas por Vargas para os solos de granitos e gnaisses.

A grande maioria dos solos situam-se abaixo da linha A e à esquerda da linha B ( $W_l < 50\%$ ), na zona de solos arenosos e silteosos de baixa plasticidade e também característica de solos argilosos caoliniticos e iliticos. Os poucos pontos localizados à direita da linha B, pertencentes ao horizonte B, ocupam a zona de solos silteosos de alta plasticidade.

As variações nos limites de consistência e índices de plasticidade para todos os solos amostrados são:

!HORIZ !	! Wl [%] !	! Wp [%] !	! IP [%] !
HOR B	37-58	24-48	4-20
HOR C	27-53	18-47	5-18

A Atividade Coloidal de Skempton ( $A_c$ ) verificou valores anormalmente altos em solos saprolíticos com porcentagem de argila muito baixa. Com resultados desta natureza, esperia-se encontrar argilas ativas do tipo 2:1; entretanto, as análises por difratograma de raio X para algumas amostras revelaram predominância do argilo-mineral caolinita, do tipo 1:1, o que já era estimado devido às boas condições de drenagem e lixiviação da grande maioria dos perfis estudados.

A partir destes fatos, conclui-se que a atividade coloidal como proposta por Skempton deixa de ser indicativo indireto da mineralogia onde a fração argila é muito pequena (como é o caso de grande parte dos solos saprolíticos de granitos, gnaisses e migmatitos em questão). Isto é justificável, considerando que o parâmetro foi desenvolvido inicialmente para argilas sedimentares.

Segundo as recomendações de MEDINA (1989), a atividade coloidal dos materiais foi novamente calculada, agora função apenas do material passante na peneira n.40 (# 0.42 mm),

aquele empregado nos ensaios de limites de consistência. Os resultados tornaram-se mais compatíveis, entretanto mostram-se ainda discutíveis para os solos muito pouco argilosos.

Em função disso, a análise da atividade coloidal foi feita com base nos valores obtidos para o horizonte B, no geral, mais argiloso. Os valores de  $A_c$  (calculados pela definição original de Skempton) são apresentados na tabela 6.2.1. Verifica-se que este horizonte é composto por solos predominantemente inativos ( $A_c < 0.75$ ), apenas três amostras são enquadradas como solos de atividade normal ( $0.75 < A_c < 1.25$ ).

Estes resultados são compatíveis com os resultados dos difratogramas de raio X, que indicaram sempre o argilo-mineral caolinita para amostras dos solos do horizonte B.

Dados de  $W_l$ ,  $IP$  e % de argila foram lançados no gráfico de plasticidade e da atividade associados, proposto por VARGAS (1988) como auxiliar na classificação de solos tropicais finos. A figura 6.2.3 mostra a localização dos solos do horizonte B no gráfico. Observa-se que os dados plotados aproximam-se ao campo dos solos classificados pelo autor como KL e KH, subgrupos propostos para agrupar argilas arenosas e argilas siltosas do tipo caolinita, de alta (KH) e baixa (KL) plasticidade. A zona hachurada representa a faixa de ocorrência dos dados de solos lateríticos de gnaiss pesquisados por Vargas. E também sugerido o subíndice "f" (KHf e KLf) para indicar a presença de sesquióxidos de ferro formando agregações. Esta característica foi constatada em muitos dos solos investigados, a destacar nos solos da unidade PVpf(AST).

Quanto às técnicas de ensaio de limites de Atterberg e preparação das amostras, alguns aspectos merecem comentário.

A pseudoplasticidade, ou seja, o escorregamento do material no aparato de Casagrande (empregado no ensaio do limite de liquidez), foi constatada principalmente para os solos com alto teor de mica. Estes materiais apresentam dificuldades no ensaio também para o limite de plasticidade; como exemplo, o ponto BG-16m foi considerado não plástico (NP) pela baixa trabalhabilidade causada pelo alto teor em mica. Conclui-se daí que, para os solos micáceos, devem ser encarados com cautela os resultados de ensaios padrões de caracterização.

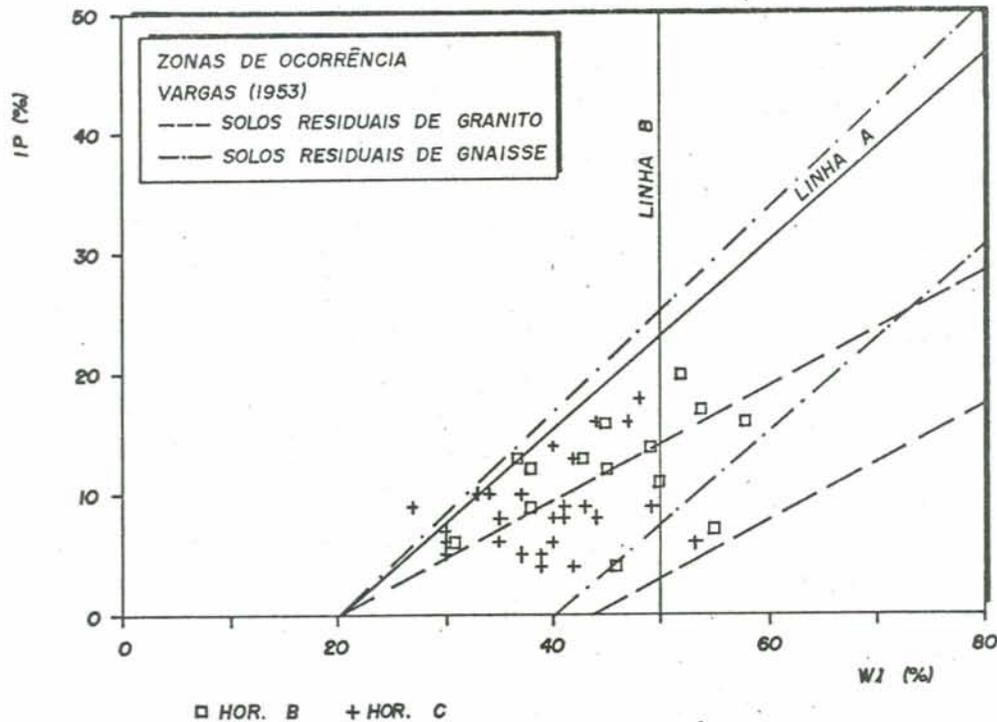


FIGURA 6.2.2 - Localização dos solos estudados no Gráfico de Plasticidade de Casagrande

TABELA 6.2.1 -

Atividade coloidal dos solos do horizonte B

PTO AMOSTRADO	ATIVIDADE COLOIDAL Ac
CD	0.77
AS	0.41
CA	0.44
CT	0.29
JH	0.09
BG	0.76
TS	0.50
BK	0.36
CC	0.33
SF	0.43
CE	0.38
BZ	0.30
UP	0.25
JI	1.20

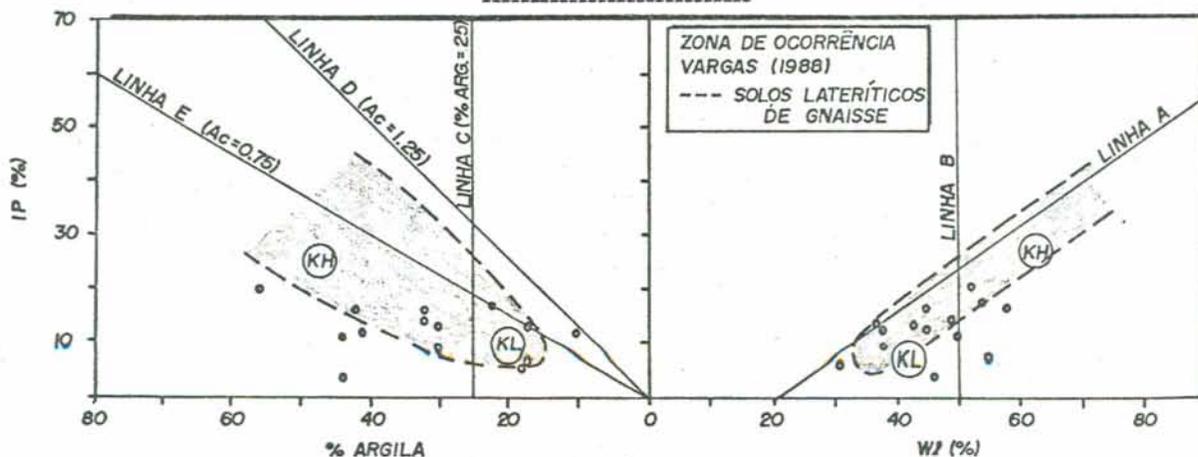


FIGURA 6.2.3 - Localização dos solos estudados no gráfico de plasticidade e atividade coloidal associados (VARGAS, 1988)

A influência do grau de secagem das amostras nos valores dos limites não foi quantificada. Os ensaios foram executados com as amostras secas ao ar; os teores de umidade higroscópica apresentaram pouca variação. Por observações ao longo da pesquisa, verificou-se que a secagem em estufa das amostras tendia a causar alterações estruturais com a desidratação, principalmente na cimentação das partículas.

Já quanto ao destorroamento, as mesmas questões referentes a formação de agregações cimentadas por sesquióxidos e a presença de minerais primários friáveis, comentadas anteriormente, tomam efeito.

### 6.3-CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS NO ESTADO INDEFORMADO

#### 6.3.1 - Cimentação e Estruturas Reliquiarias

Tanto as pequenas amostras indeformadas como a análise in situ dos materiais nos perfis investigados, revelaram marcantes características macroestruturais de grande interesse geotécnico.

Destacam-se as cimentações das partículas e as estruturas reliquiarias como manifestações mais importantes. São variantes de difícil quantificação, entretanto de perceptível influência no comportamento geotécnico dos diferentes materiais estudados.

A cimentação das partículas nestes solos de intemperismo subtropical parece ter duas origens:

- a) Nos solos laterizados do horizonte B, observa-se cimentações devido ao acúmulo de sesquióxidos de ferro e alumínio, produtos finais do intemperismo, que concentram-se neste horizonte como resultado do processo de podzolização. Em todas as unidades geotécnicas de perfis podzólicos vermelho-amarelo, os solos do horizonte B apresentam cimentações por sesquióxidos, em maior ou menor grau. Nos solos da unidade PVpf nota-se a formação de fortes agregações de grande coesão que, em alguns casos, até mesmo dificultavam as operações de escavação manual.

b) Nos solos saprolíticos do horizonte C, verifica-se cimentações mais fracas decorrentes dos processos iniciais de argilização que, associadas às tensões residuais da rocha-mãe, permitiam o agrupamento de partículas em agregações, geralmente mais friáveis que aquelas comentadas no item "a".

Estas cimentações são variáveis ao longo do perfil e dependem fundamentalmente do intemperismo. A argilização cresce com o grau de intemperismo, enquanto as tensões residuais da rocha tendem a decrescer.

Conforme alerta IRFAN (1988), as cimentações variam em amostras coletadas a curta distância devido a heterogeneidade do intemperismo, relacionada a formação de microambientes diferenciados, favorecedores ou não dos processos de cimentação das partículas.

Verificou-se que a cimentação manifesta-se no comportamento geomecânico dos solos estudados sob quatro formas:

- Em alguns solos do horizonte B, pequenas e fortes agregações conferem uma textura "pseudogranular";
- Surgimento de variável pré-adensamento "virtual";
- Ocorrência de coesão "verdadeira", em valores de até  $100 \text{ kN/m}^2$  e
- Ruptura frágil sob baixas tensões confinantes.

As estruturas reliquias observadas nas massas de solos saprolíticos são principalmente descontinuidades residuais da rocha, que ainda preservam nítidas feições estruturais no solo. Encontram-se preenchidas ou não com material argiloso.

Tanto na investigação de campo dos perfis como nas amostras indeformadas de laboratório, estruturas deste tipo foram constatadas.

Estas estruturas alertam para o fato de que para estes solos saprolíticos, no estudo do comportamento geomecânico, deve se ter em mente dois universos : a massa "homogênea" de solo, de onde as pequenas amostras foram coletadas para avaliação da compressibilidade e resistência ao cisalhamento, e a massa de solo no sentido global, onde são

incluídas as estruturas reliquias que parecem governar o comportamento geomecânico em muitos dos casos. Para abordar este último universo, seriam necessárias amostras de grande tamanho ou ensaios in situ. Portanto, de acordo com o programa experimental empregado, não foi avaliado quantitativamente o papel das estruturas reliquias no comportamento destes solos.

A investigação de campo revelou estruturas reliquias em todos os solos saprolíticos e em diferentes escalas. Ocorrem com destaque nos solos de alteração em zonas de falhas e de contatos litológicos intrusivos, onde o diaclasamento das rochas de origem é mais intenso.

Observou-se que planos de fraqueza reliquias condicionam o deslocamento de pequenas massas de solo em alguns dos taludes investigados.

A xistosidade de rochas metamorfizadas, preservada no solo saprolítico, também constitui um tipo de estrutura reliquia de importância geotécnica. No perfil BG, constatou-se nos solos saprolíticos de maior profundidade a presença de tais xistosidades. Entretanto, notou-se que, devido ao forte intemperismo, estas estruturas tendem a desaparecer com a distância desde a rocha sã.

#### 6.3.2 - Índices Físicos

Uma análise estatística básica envolvendo os resultados de índices físicos de todos os pontos amostrados foi realizada. Os dados foram obtidos a partir das amostras indeformadas destinadas aos ensaios de compressão confinada e cisalhamento direto.

Foram avaliadas as seguintes grandezas: peso específico aparente natural, peso específico aparente seco, índice de vazios, grau de saturação e teor de umidade natural.

A análise estatística foi feita com base nos valores médios das grandezas obtidos por ponto amostrado.

As variações, valores médios ( $\bar{x}$ ), desvios padrões ( $s$ ) e coeficientes de variação (CV), em função dos horizontes das unidades geotécnicas, são apresentados na tabela 6.3.2.1. "N" representa o número de pontos amostrados e "n" o número total de amostras indeformadas.

TABELA 6.3.2.1 - Análise estatística básica para os valores dos índices físicos dos solos em função dos horizontes das unidades geotécnicas (variações e médias)

UNIDADE GEOTEC.	HORIZ	PESO ESP. NATURAL [kN/m <sup>3</sup> ]	PESO ESP. SECO [kN/m <sup>3</sup> ]	INDICE VAZIOS	GRAU DE SATUR. [%]	TEOR DE UMIDADE [%]
PVg-Rg (g.PG)	HOR B	16.1-16.7	13.5-13.8	0.88-0.96	50.7-65.3	17.2-23.6
	$\bar{x}$	16.4	13.6	0.92	58.0	20.4
	N=2 s	0.4	0.2	0.06	10.4	4.5
	n=22 CV	2.46%	1.25%	6.15%	17.87%	21.91%
	HOR C	15.3-17.2	13.0-14.7	0.80-1.05	40.1-62.8	14.0-24.7
$\bar{x}$	16.0	13.6	0.93	50.2	17.7	
N=8 s	0.6	0.6	0.08	7.4	3.0	
n=52 CV	3.99%	4.08%	8.79%	14.71%	16.70	
PVg-Rg (g.S)	HOR C	16.7-17.5	14.1-15.1	0.72-0.80	55.8-58.6	15.5-18.5
	$\bar{x}$	17.1	14.6	0.76	57.2	17.0
	N=2 s	0.6	0.7	0.06	2.0	2.2
	n=6 CV	3.23%	5.08%	7.44%	3.41%	12.72%
	PVg-Rg (g.I)	HOR B	16.0-18.1	12.6-15.2	0.73-1.08	57.8-68.8
$\bar{x}$		17.0	14.0	0.89	64.1	21.7
N=4 s		0.9	1.2	0.16	4.7	4.4
n=36 CV		5.30%	8.38%	17.80%	7.28%	20.29%
HOR C		16.5-17.9	13.6-14.9	0.70-0.90	50.5-73.7	16.0-23.2
$\bar{x}$	17.1	14.3	0.80	60.0	19.2	
N=4 s	0.7	0.6	0.08	9.9	3.6	
n=41 CV	4.15%	3.90%	10.21%	16.43%	18.81%	
PVm-Rm	HOR B	17.0-18.1	14.0-14.8	0.81-0.88	56.5-73.5	18.0-22.4
	$\bar{x}$	17.4	14.4	0.85	65.3	20.6
	N=3 s	0.6	0.4	0.04	8.5	2.3
	n=31 CV	3.60%	2.61%	4.13%	13.02%	11.30%
	HOR C	15.1-17.8	12.3-14.9	0.80-1.10	51.3-72.6	18.3-22.4
$\bar{x}$	16.6	14.1	0.90	60.1	20.8	
N=4 s	1.1	1.2	0.14	9.0	1.9	
n=49 CV	6.86%	8.34%	15.71%	14.96%	9.16%	
PVpf (AST)	HOR B	16.5-19.5	14.3-16.7	0.61-0.89	49.3-71.9	16.1-16.4
	$\bar{x}$	17.6	15.1	0.77	58.3	16.3
	N=3 s	1.6	1.4	0.14	12.0	0.2
	n=44 CV	9.18%	9.12%	18.73%	20.52%	1.13%

Destaca-se a heterogeneidade dos materiais como causa da variação nos índices físicos. As grandezas apresentam-se tão variáveis em um mesmo horizonte quanto entre diferentes unidades. Segundo alguns autores (p.ex. IRFAN,1988), os complexos e heterogêneos arranjos entre as partículas e as diferentes características composicionais das amostras resultam em dispersões desta grandeza para valores de índice físicos.

Os teores de umidade, graus de saturação e índices de vazios apresentam as maiores variabilidades. Entretanto, em todos os casos  $CV < 25 \%$ , o que permite considerar, de maneira geral, a amostragem aceitável.

Os solos mostram-se parcialmente saturados. Verifica-se uma tendência de que os valores de grau de saturação e teor de umidade sejam pouco maiores para o horizonte B. Isto era esperado pelo caráter, em geral, mais argiloso dos solos deste horizonte.

O índice de vazios é, na grande maioria das amostras, inferior a 1.0. Variabilidade extrema para esta grandeza foi observada para os solos da unidade PVpf, evidenciando a complexidade estrutural destes materiais.

Quanto à densidade dos materiais, nota-se valores maiores do peso específico seco para os paleossolos ferralitizados (hor B/PVpf), com média de  $15.1 \text{ kN/m}^3$ , que podem ter explicação na maior concentração de densos óxidos de ferro em uma estrutura fechada e cimentada que, em muitas das amostras deste material, foi verificada.

Para estes solos da unidade PVpf, além dos vazios, também a saturação e a densidade são relativamente muito variáveis, para valores quase constantes de umidade. Novamente enfatiza-se as heterogeneidades no arranjo estrutural das partículas deste material, aparentemente mais homogêneo que qualquer um dos solos saprolíticos estudados.

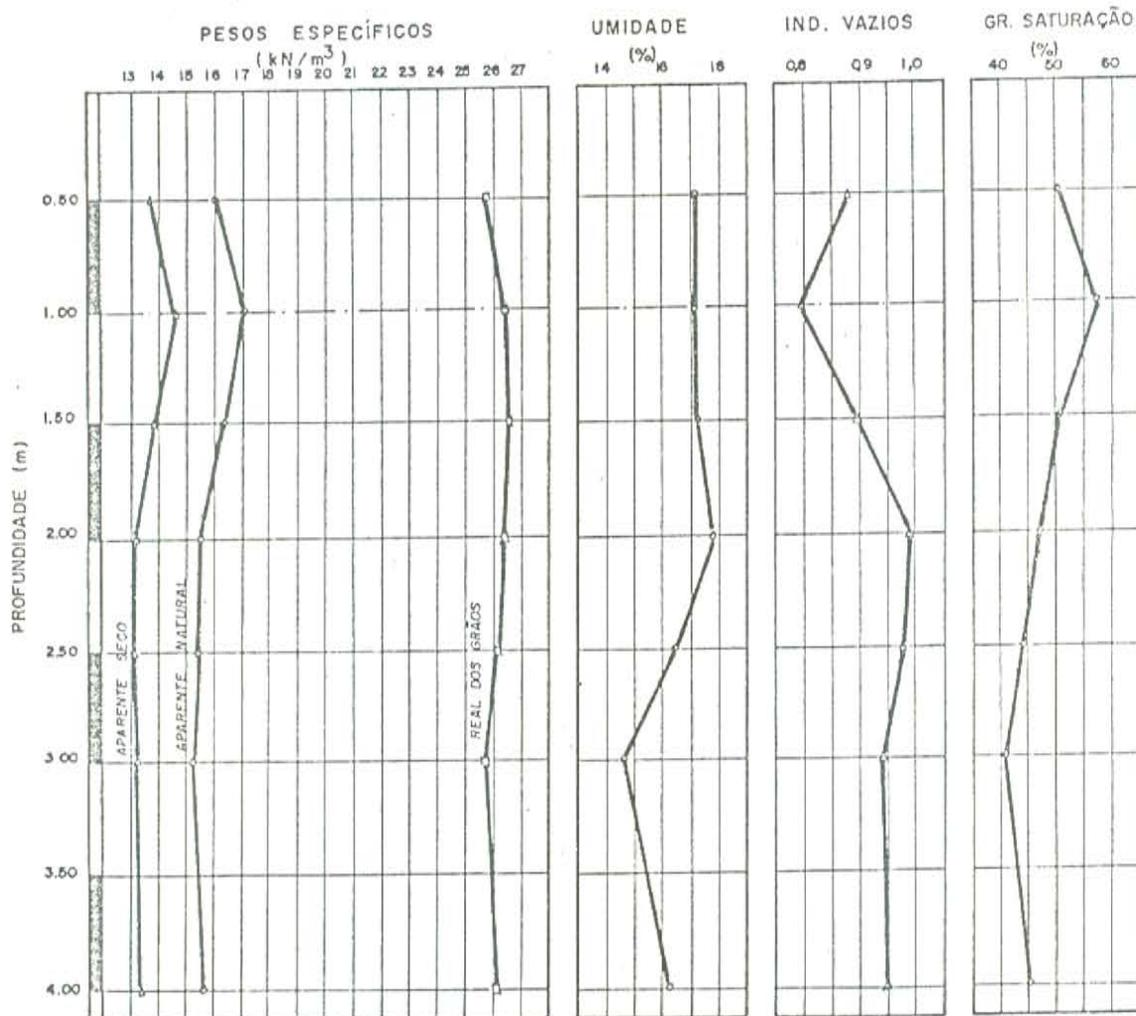
Um perfil podzólico vermelho-amarelo foi escolhido para analisar a variação dos índices físicos com a profundidade. E o perfil CD, formado do intemperismo do Granito Ponta Grossa. A figura 6.3.2.1 apresenta a variação das grandezas no perfil. Observa-se que:

- Os valores dos pesos específicos natural e seco mostram acréscimo na zona de transição entre os

FIGURA 6.3.2.1 - Variação dos índices físicos no perfil de intemperismo CD

- VARIAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS COM A PROFUNDIDADE

PERFIL CD



horizontes, decorrente da redução nos vazios. Os materiais desta zona já apresentam um acentuado processo de argilização, no entanto, não se encontram tão lixiviados quanto os materiais do horizonte B acima, isto justifica a redução nos vazios. A partir desta zona, verifica-se pouca variação na densidade dos materiais;

- O teor de umidade mantém-se com pouca variação até a profundidade de 2.0 m, a partir daí, nota-se uma redução, provavelmente resultado do caráter mais arenoso do solo saprolítico e
- Em consequência, o grau de saturação sofre pequeno acréscimo na zona de transição dos horizontes e redução a maior profundidade.

#### 6.4 - COMPRESSIBILIDADE

A compressibilidade dos solos foi avaliada por meio dos ensaios de compressão confinada. A principal característica revelada nos ensaios foi um pré-adensamento "virtual", tanto para os solos do horizonte B como do horizonte C, na umidade natural e na condição inundada.

Embora o pré-adensamento seja claro, não é fácil a definição do valor de pressão vertical no qual as amostras passam de uma fase de pequenas a uma de maiores deformações aproximadamente proporcionais ao logaritmo das pressões aplicadas. Nas curvas do logaritmo da pressão pelo índice de vazios, a passagem de uma fase a outra mostrou ser, na maioria dos casos, representada por meio de uma curva de longo raio. Com isso, a determinação precisa da pressão de pré-adensamento "virtual" por meios gráficos convencionais fica muito prejudicada, acarretando resultados inseguros.

No entanto, não é difícil de constatar que este pré-adensamento é muito variável, ele é associado a complexos fatores que também regem outros aspectos do comportamento geomecânico destes solos, são eles: cimentação, sucção, macroestrutura, tensões residuais e outros.

Em função destes fatores, são também muito variáveis

os tradicionais índices de compressibilidade : índice de recompressão ( $C_r$ ) e índice de compressão ( $C_c$ ). Portanto, os resultados são apresentados na forma de um índice de compressibilidade único,  $C$ , definido de forma idêntica aos índices tradicionais, porém para cada intervalo de carga. Com isso, toda a variabilidade fica associada a um único parâmetro. Para a descompressão (ou descarga) foi considerado o índice de descarga ( $C_d$ ) médio para toda a fase.

A tabela 6.4.1 apresenta os resultados em função de  $C_r$ ,  $C_c$  e  $C_d$  e da pressão de pré-adensamento "virtual" ( $p'c$ ) para os solos das diferentes unidades geotécnicas. A tabela 6.4.2 reúne os resultados em função de  $C$  (expresso para cada nível de carregamento do ensaio) e  $C_d$  (médio para a fase de descarga), conforme já apresentados de acordo com as unidades geotécnicas no capítulo anterior.

Das figuras 5.2.7.1, 5.5.7.1, 5.6.7.1 e 5.7.7.1 constata-se deformações de até  $\frac{30}{2}\%$  para tensões verticais máximas de 1600 ou 3200  $\text{kN/m}^2$ . Observa-se também que a inundação influencia as características de compressibilidade. Em geral, ela reduz os valores das pressões de pré-adensamento "virtual", mas não existe uma tendência clara em aumentar os valores máximos de deformação (em altas tensões verticais). Esta redução no pré-adensamento parece ocasionada pela ação da água afetando as cimentações e a sucção, reforçando a tese de que seriam estes fatores os principais causadores deste pré-adensamento.

As características estruturais apresentam forte influência sobre a compressibilidade dos solos estudados. Um exemplo é dado na figura 6.4.1, onde as curvas que representam o comportamento sob compressão confinada de amostras dos pontos JI-3.0m e UP-1.0m, da unidade PVpf, são mostradas.

Observa-se em ambos os pontos que amostras com mais baixos índices de vazios iniciais, tatilmente mais rijas e cimentadas, verificam sob compressão bem menores deformações (cerca de 50% dos valores das outras amostras) e pressões de pré-adensamento nitidamente maiores.

Convém destacar que as amostras de cada ponto foram coletadas em mesmo local, dentro de um mesmo horizonte nos perfis e à mesma profundidade.

TABELA 6.4.1 - Índices de recompressão (Cr), de compressão (Cc) e de descarga (Cd) e pressões de pré-adensamento em função dos horizontes das unidades geotécnicas (variações e médias)

UNIDADE IGEDTEC.	HORIZ. / /COND. ENSAIO	Cr	Cc	Cd	P'c (kN/m <sup>2</sup> )	e (p/ P'c)
PVg Rg (g.PG)	HOR B natural	-	0.27	0.02	60	0.82
	inundado	-	0.20	0.01	35	0.68
HOR C	natural	0.02-0.10 (0.05)	0.26-0.50 (0.33)	0.02-0.03 (0.02)	87-603 (223)	0.68-0.93 (0.82)
	inundado	0.02-0.09 (0.06)	0.23-0.36 (0.27)	0.02-0.03 (0.03)	24-263 (106)	0.73-0.91 (0.83)
PVg Rg (g.I)	HOR B natural	0.01-0.05 (0.03)	0.26-0.41 (0.33)	0.01-0.02 (0.01)	93-214 (241)	0.62-0.96 (0.84)
	inundado	0.04-0.07 (0.06)	0.31	0.02	132-155 (144)	0.86-0.91 (0.89)
HOR C	natural	0.02-0.06 (0.04)	0.26-0.31 (0.29)	0.02-0.07 (0.05)	186-275 (228)	0.60-0.73 (0.68)
	inundado	0.04-0.07 (0.06)	0.24-0.31 (0.27)	0.03-0.07 (0.05)	120-302 (194)	0.59-0.76 (0.68)
IPVm Rm	HOR B natural	0.04	0.25-0.28 (0.27)	0.01-0.03 (0.02)	148-162 (155)	0.71-0.80 (0.76)
	inundado	0.03-0.05 (0.04)	0.24-0.27 (0.26)	0.01-0.03 (0.02)	120-282 (201)	0.64-0.73 (0.69)
HOR C	natural	0.02-0.05 (0.03)	0.28-0.47 (0.36)	0.02-0.05 (0.04)	182-603 (316)	0.68-0.95 (0.77)
	inundado	0.02-0.06 (0.04)	0.26-0.39 (0.31)	0.03-0.06 (0.04)	166-363 (238)	0.68-0.96 (0.78)
PVpf (AST)	HOR B natural a	0.02-0.07 (0.04)	0.19-0.47 (0.30)	0.01-0.02 (0.01)	148-1413 (615)	0.52-0.72 (0.62)
	natural b	0.03-0.04 (0.04)	0.27-0.36 (0.32)	0.02	46-105 (76)	0.76-0.88 (0.82)
inundado	0.01-0.10 (0.05)	0.17-0.34 (0.28)	0.01-0.02 (0.02)	43-407 (124)	0.57-1.01 (0.83)	

OBSERVAÇÕES:

(...) - valores medios

\* natural a - amostra no periodo seco

natural b - amostra no periodo chuvoso

TABELA 6.4.2 - Índices de compressibilidade (C) em função dos horizontes das unidades geotécnicas (variações e médias)

UNIDADE IGEOTEC.	HORIZ./ /COND. ENSAIO	NÍVEIS DE TENSÕES [ k N / m <sup>2</sup> ]								DESCARGA
		12.5 - 25	25 - 50	50 - 100	100 - 200	200 - 400	400 - 800	800 - 1600	1600 - 3200	
IPVg Rg	HOR B natural	0.10	0.14	0.18	0.24	0.29	0.29	0.25	-	0.02
	inundado	0.11	0.15	0.17	0.19	0.22	0.19	0.22	-	0.01
(g.PG)	HOR C natural	0.01-0.15 (0.05)	0.03-0.14 (0.09)	0.04-0.18 (0.10)	0.05-0.22 (0.16)	0.10-0.28 (0.20)	0.24-0.34 (0.27)	0.25-0.49 (0.35)	0.26-0.51 (0.36)	0.02-0.03 (0.02)
	inundado	0.02-0.15 (0.06)	0.04-0.20 (0.10)	0.07-0.24 (0.13)	0.12-0.24 (0.18)	0.20-0.27 (0.23)	0.23-0.34 (0.28)	0.21-0.36 (0.28)	0.24-0.38 (0.31)	0.02-0.03 (0.03)
IPVg Rg	HOR B natural	0.01-0.05 (0.03)	0.01-0.12 (0.06)	0.02-0.16 (0.10)	0.05-0.28 (0.17)	0.09-0.36 (0.25)	0.19-0.47 (0.33)	0.26-0.35 (0.31)	-	0.01-0.02 (0.01)
	inundado	0.04-0.05 (0.05)	0.07-0.08 (0.08)	0.11-0.12 (0.12)	0.20-0.21 (0.21)	0.29-0.30 (0.30)	0.33-0.34 (0.34)	0.29-0.30 (0.30)	-	0.02
(g.I)	HOR C natural	0.01-0.07 (0.04)	0.03-0.11 (0.07)	0.06-0.13 (0.09)	0.13-0.17 (0.15)	0.20-0.25 (0.21)	0.26-0.30 (0.27)	0.25-0.31 (0.28)	0.27-0.32 (0.28)	0.02-0.07 (0.04)
	inundado	0.03-0.06 (0.05)	0.06-0.11 (0.08)	0.10-0.15 (0.12)	0.14-0.21 (0.17)	0.20-0.24 (0.22)	0.24-0.29 (0.26)	0.25-0.32 (0.28)	0.25-0.32 (0.28)	0.03-0.07 (0.05)
IPVm Rm	HOR B natural	0.02	0.05	0.07-0.08 (0.08)	0.12-0.13 (0.13)	0.16-0.26 (0.21)	0.22-0.31 (0.27)	0.25-0.28 (0.27)	-	0.01-0.03 (0.02)
	inundado	0.02-0.03 (0.03)	0.03-0.07 (0.05)	0.05-0.09 (0.07)	0.07-0.19 (0.13)	0.10-0.28 (0.20)	0.14-0.29 (0.24)	0.22-0.25 (0.24)	-	0.01-0.03 (0.02)
IPVpf	HOR C natural	0.01-0.04 (0.02)	0.02-0.06 (0.04)	0.04-0.11 (0.07)	0.06-0.16 (0.12)	0.11-0.35 (0.22)	0.20-0.46 (0.27)	0.28-0.51 (0.36)	0.28-0.44 (0.35)	0.02-0.05 (0.04)
	inundado	0.01-0.06 (0.03)	0.03-0.10 (0.06)	0.05-0.15 (0.09)	0.07-0.25 (0.14)	0.15-0.33 (0.22)	0.20-0.36 (0.27)	0.26-0.39 (0.31)	0.26-0.41 (0.32)	0.03-0.06 (0.04)
(AST)	HOR B natural (ps)	0.01-0.04 (0.02)	0.01-0.07 (0.03)	0.03-0.11 (0.06)	0.03-0.18 (0.09)	0.05-0.20 (0.10)	0.07-0.24 (0.13)	0.17-0.26 (0.21)	-	0.01
	natural (pc)	0.03-0.04 (0.04)	0.11-0.12 (0.12)	0.17-0.22 (0.20)	0.20-0.37 (0.29)	0.28-0.41 (0.35)	0.28-0.34 (0.31)	0.24-0.30 (0.27)	-	0.02
(AST)	inundado	0.01-0.07 (0.05)	0.02-0.18 (0.10)	0.03-0.24 (0.14)	0.05-0.34 (0.21)	0.06-0.34 (0.23)	0.11-0.38 (0.25)	0.17-0.29 (0.24)	-	0.01-0.02 (0.02)

OBSERVAÇÕES:

(...) - valores médios

(ps) - amostras coletadas em período seco

(pc) - amostras coletadas em período chuvoso

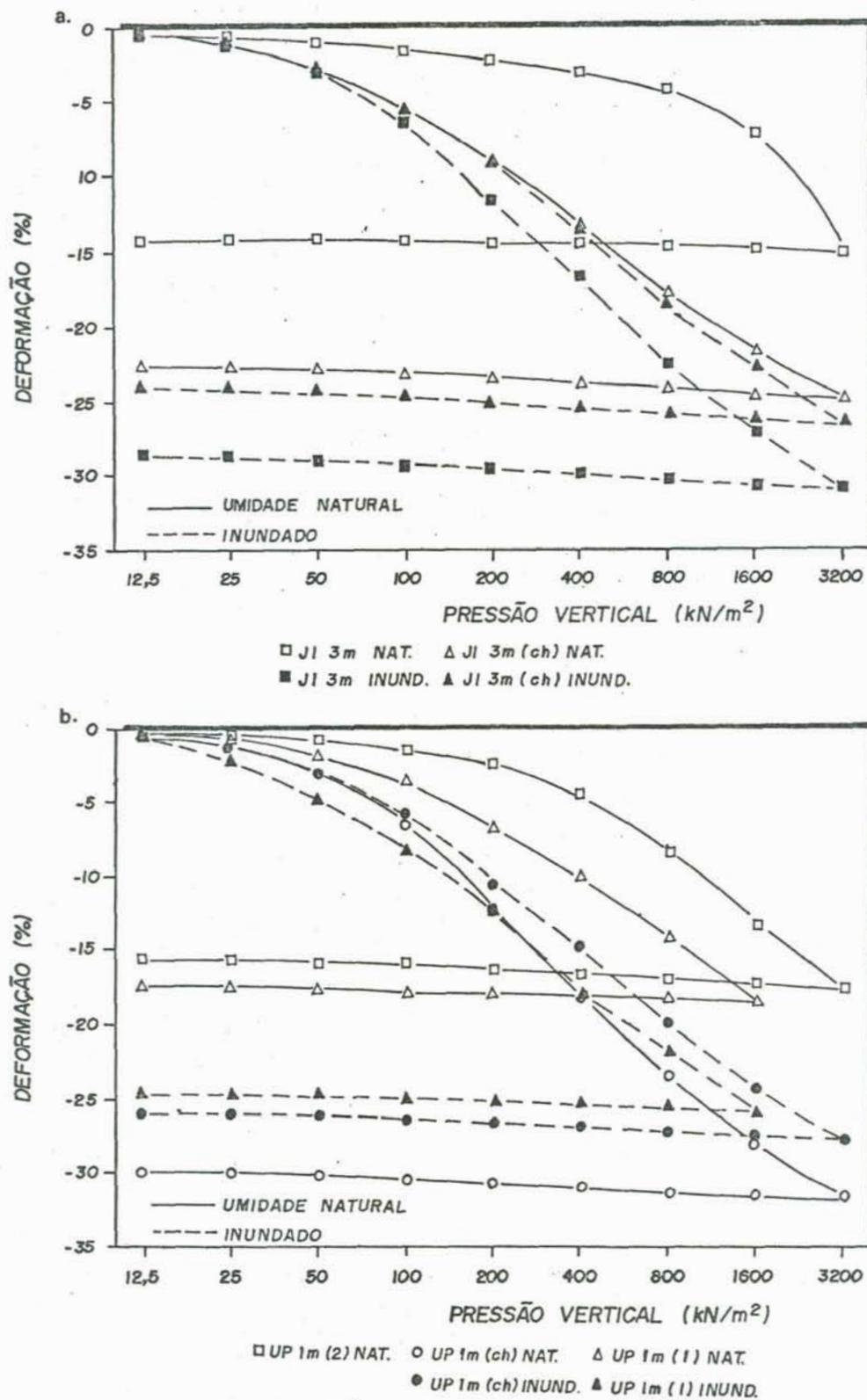


FIGURA 6.4.1 - Comportamento sob compressão confinada dos pontos JI-3.0m e UP-1.0m (unidade PVpf)  
a. JI-3.0m  
b. UP-1.0m

A composição mineralógica também mostrou influência. Amostras do ponto BG-16m (solo saprolítico do granito Independência), fortemente micáceas, mostraram destacada recuperação na fase de descarregamento, com Cd da ordem de 0.07. Propriedade semelhante para solos micáceos de origem similar foi observada por RUDOCK (1967).

Comparando os resultados de Cc com os valores de índice de vazios e limite de liquidez dos materiais, nota-se, apesar de muita dispersão, uma tendência de crescimento da compressibilidade com os vazios e com Wl. A dispersão é bem maior em ensaios na umidade natural e é justificada pela existência de uma série de outros fatores em jogo na compressibilidade destes solos de intemperismo subtropical.

Para algumas amostras dos horizontes B e C, foi analisada a evolução dos recalques com o tempo. Os pontos para os quais este aspecto foi investigado são:

CT-1.0m	horizonte B	\
BG-16.0m	horizonte C	- PVg-Rg(g.I)
AR-3.0m	horizonte C	/
CE-1.0m	horizonte B	- PVm
JI-3.0m	horizonte B	- PVpf(AST)
UP-1.0m	horizonte B	/

Para as amostras destes pontos, foram realizados ensaios de compressão confinada com estágios de 24 horas. A evolução tempo-recalque foi analisada em curvas do logaritmo do tempo pela altura do corpo de prova.

As curvas construídas a partir dos resultados dos ensaios mostraram-se desfiguradas da forma teórica, preconizada para argilas sedimentares saturadas.

A evolução dos recalques com o tempo mostrou-se em três etapas:

1a.) Um significativo recalque "instantâneo" (verificado a 7 segundos da aplicação da carga), que variou de 16 a 86 % do recalque total em um dado estágio de carga. Na maioria dos casos, o valor médio fica em torno de 60 % do recalque total;

- 2a.) Um adensamento primario que aproximou em forma a curva teórica somente nas mais altas tensões e
- 3a.) Uma compressão secundária da mesma ordem de grandeza do recalque da etapa anterior. Somados os recalques da 2a. e 3a. etapas, em média atingem os 40% restantes do recalque total do estágio.

Convém destacar que em muitos dos casos, não são distinguíveis entre si os recalques destas últimas etapas, principalmente sob baixas tensões verticais.

O considerável recalque "instantâneo" parece estar relacionado a parcial saturação destes solos. Na primeira etapa verifica-se uma compressão sobre fases sólida + líquida + gasosa distribuídas em complexos arranjos estruturais.

SOWERS (1963) também verifica recalques instantâneos da ordem de 2/3 do recalque total para solos saprolíticos com grau de saturação de 50 a 70 %.

Esta propriedade justifica a redução no tempo para cada estágio de carga, empregada para outras amostras, a fim de tornar mais agil o programa de ensaios de compressão confinada. Num período de 4 horas adotado, mais do que 90 % do recalque do estágio era estabelecido.

A figura 6.4.2 mostra uma curva do logaritmo do tempo pelo recalque, onde as três etapas distintas e uma aproximação da forma da curva teórica na etapa de adensamento primário são verificados.

Para uma melhor avaliação dos recalques "instantâneos" observados, a tabela 6.4.3 apresenta a relação entre estes e o recalque total ( $R_i/R_t$  expressa em porcentagem) nos diferentes estágios de carga.

Verifica-se que, principalmente nos ensaios inundados, existe uma tendência da relação  $R_i/R_t$  atingir maiores valores nos níveis intermediários de tensões (de 200 a 400  $\text{kN/m}^2$ ). Para os mais baixos e mais altos níveis de tensões, menores valores para  $R_i/R_t$  são encontrados, a exceção na tensão inicial dos ensaios (12.5  $\text{kN/m}^2$ ), onde a acomodação do corpo de prova sob o primeiro carregamento provoca distorções no resultado.

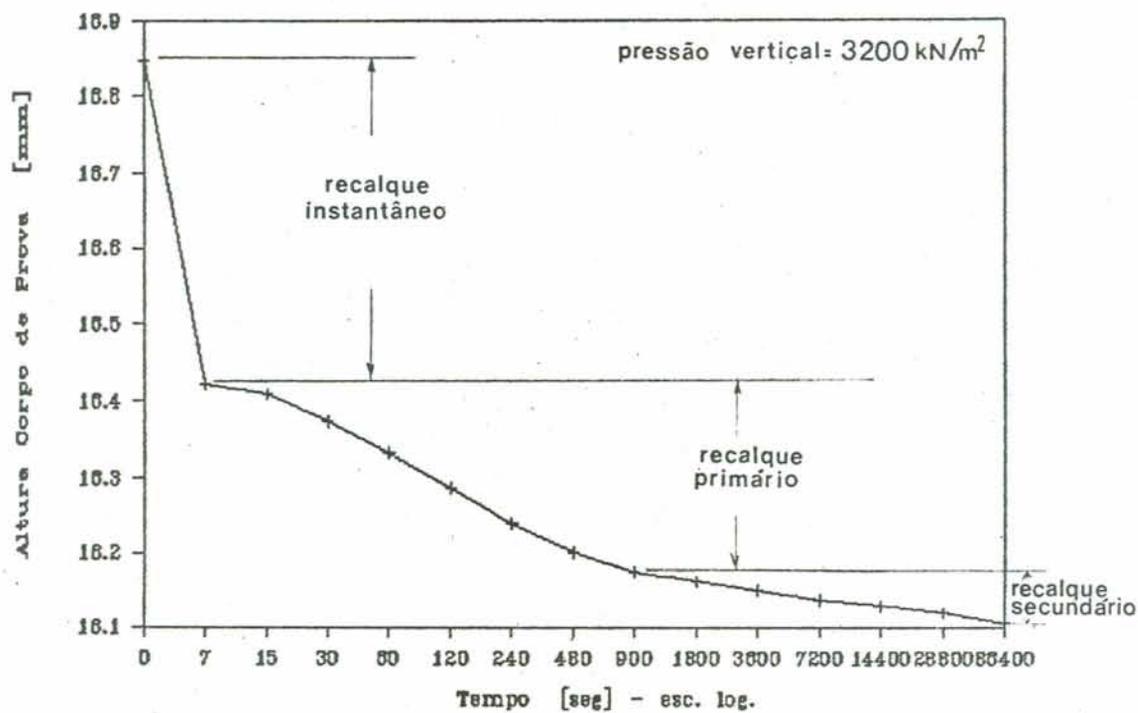


FIGURA 6.4.2 - Exemplo de curva tempo x recalque (CE-1m inund.) mostrando as três etapas na evolução dos recalques sob compressão confinada

Nos ensaios na umidade natural, a dispersão é maior, entretanto, pode-se notar que os máximos valores de  $R_i/R_t$  ocorrem entre 400 e 1600  $\text{kN/m}^2$ .

A figura 6.4.3 apresenta os valores médios, considerando conjuntamente os ensaios na umidade natural e inundados. A tendência comentada ainda se preserva.

Para aqueles estágios de carga onde foi possível distinguir uma etapa de adensamento primário, calculou-se o Coeficiente de Adensamento  $C_v$ .

O parâmetro obtido deve ser encarado com cautela, pois não representa a velocidade dos recalques totais para os solos ensaiados, e sim de uma menor parcela, na qual não são considerados os significativos recalques "instantâneos".

Valores de  $C_v$  adequados para a avaliação da velocidade dos recalques totais de solos com propriedades semelhantes, devem ser obtidos por via indireta, a partir de coeficientes de permeabilidade (p.ex. obtidos de triaxiais) e de módulos de variação volumétrica (obtidos dos ensaios de compressão confinada).

A tabela 6.4.4 apresenta os valores de  $C_v$ . A figura 6.4.4 mostra a variação dos valores médios de  $C_v$  com o nível de tensões. Observa-se o decréscimo de  $C_v$  com o aumento nas tensões.

A partir destes valores de  $C_v$  e do Módulo de Variação Volumétrica ( $mv$ ), estimou-se os valores do coeficiente de permeabilidade dos solos, válidos para a etapa de adensamento primário, isto é, após as amostras terem recalcado instantaneamente. Logo, tal parâmetro, designado  $K_{ap}$ , não deve ser relacionado a permeabilidade natural destes solos.

A tabela 6.4.5 apresenta os valores calculados do  $K_{ap}$ . A figura 6.4.5 ilustra o decréscimo de  $K_{ap}$  com o aumento nas tensões.

## 6.5 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência ao cisalhamento dos solos dos horizontes B e C foi avaliada por ensaios de cisalhamento direto. Para cada ponto amostrado ensaiaram-se em média cinco amostras por condição de umidade (ensaios na umidade natural e

TABELA 6.4.3 - Relação entre os recalques "instantâneos" e totais ( $R_i/R_t$ ) em % para diferentes estágios de carga

PUNTO/ UNIDADE	CONDICAO ENSAIO	NIVEIS DE TENSOES (kN/m <sup>2</sup> )									VALORES MEDIOS	
		12.5	25	50	100	200	400	800	1600	3200		
I JARDIM ITU	PS-NAT	63.6	20.6	26.2	16.2	28.1	38.6	37.4	58.5	74.8	40.4	
I HOR B - PVpf(AST)	PS-INU1	63.1	44.1	66.7	82.1	86.3	85.5	78.2	60.0	46.9	68.1	
I	PS-INU2	64.4	61.3	74.6	86.1			37.0	57.3	40.2	60.1	
I	PC-NAT	49.4	44.6	74.9	79.4	79.0	82.1	77.8	62.6	46.7	66.3	
I	PC-INU	51.2	56.2	76.7	80.8	81.9	81.1	74.1	61.7	48.7	68.0	
I UPANAROTI-B-PVpf	PC-NAT	71.7	38.9	70.3	79.1	83.1	83.3	81.4	75.2	63.0	71.8	
I	PC-INU	33.7	55.8	64.3	75.7	81.0	72.7	81.1	77.3	62.4	67.1	
I ICEEE-HOR B - PVm	NAT	65.6	51.3	61.2	68.7	73.3	75.7	77.3	69.9	47.4	65.6	
I	INU1	76.4	60.5	62.7	69.5	70.6	70.7	81.3	67.7	57.3	68.5	
I AV. BAGE	NAT1	73.1	69.6	74.6	69.7	70.9	73.0	75.5	80.6	70.1	73.0	
I HOR C-PVg/Rg(g,I)	NAT2	75.6	60.6	67.4	70.0	73.3	74.3	72.1	71.3	73.4	70.9	
I	INU	70.0	64.5	70.7	71.2	70.8	66.7	71.8	70.2	72.5	69.8	
I CARLOS T.F.-B-PVg	NAT	76.9	45.8	48.8	52.9	61.0	65.8	68.0	73.0	63.8	61.8	
I A.REB-C-PVg/Rg(gI)	INU	77.7	64.8	70.2	69.0	71.9	72.8	72.5	69.4	71.1	71.0	
I	VALORES MEDIOS	65.2	52.0	65.0	69.3	71.6	72.5	70.4	68.2	59.9	66.1	

OBS: NAT - ensaio no teor de unidade natural  
INU - ensaio inundado

PS - amostra coletada em periodo seco  
PC - amostra coletada em periodo chuvoso

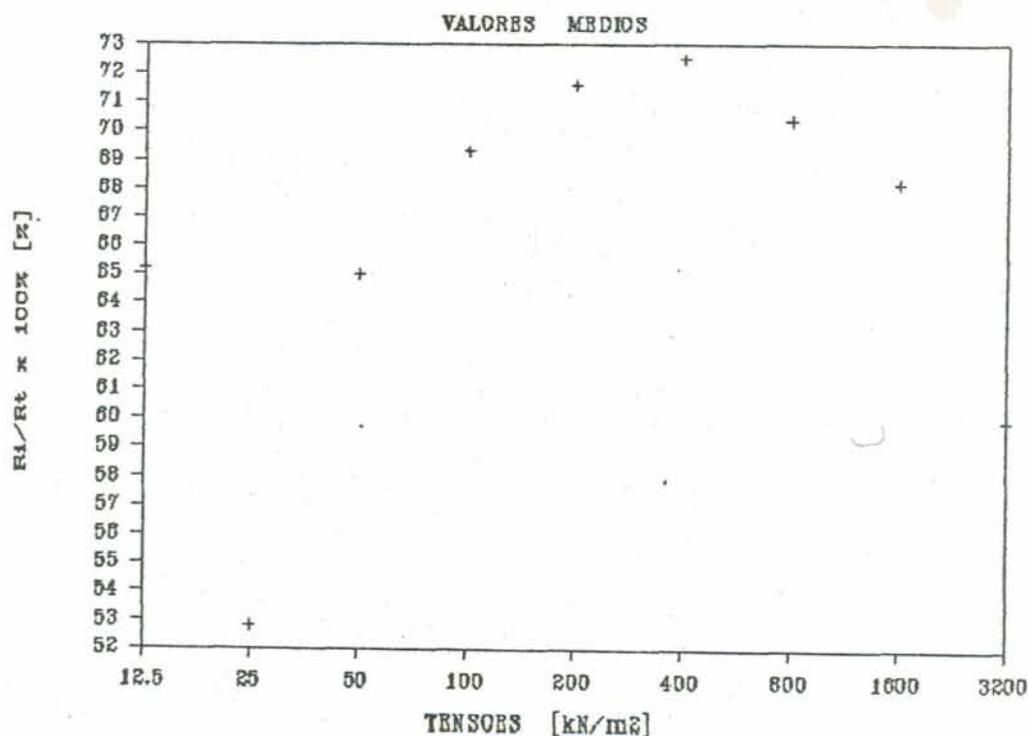


FIGURA 6.4.3 - Relação  $R_i/R_t$  para os diferentes níveis de tensões - valores médios

TABELA 6.4.4 - Valores do coeficiente de adensamento (Cv) em cm<sup>2</sup>/seg para os diferentes estágios de carga

PONTO/ UNIDADE	CONDICAO ENSAIO	NIVEIS DE TENSOES (kN/m <sup>2</sup> )								VALORES	
		12.5	25	50	100	200	400	800	1600	3200	MEDIOS
I	PS-NAT	*	*	*	*	*	*	*	*	0.00379	0.00379
I JARDIM ITU	PS-INU1	*	*	0.01480	0.01180	0.01500	0.00873	0.00819	0.00340	0.00117	0.00901
I HOR B - PVp(AST)	PS-INU2	*	0.01240	0.01570	0.01330			0.00111	0.00264	0.00104	0.00770
I	PC-NAT	*	*	0.01730	0.01560	0.01650	0.01620	0.00691	0.00404	0.00141	0.01110
I	PC-INU	*	0.01440	0.01860	0.01420	0.01570	0.01190	0.00916	0.00293	0.00141	0.01100
I UPAMAROTI-B-PVp	PC-NAT	*	*	0.01090	0.00967	0.01000	0.01030	0.00861	0.00663	0.00490	0.00872
I	PC-INU	*	0.01850	0.01610	0.01120	0.01220	0.01230	*	0.00859	0.00557	0.01210
I ICEEE-HOR B - PVm	NAT	*	*	*	*	0.01430	0.01580	0.01170	0.00499	0.00240	0.00984
I	INU1	*	*	*	*	0.02050	0.01870	0.01250	0.01450	0.00180	0.01360
I AV. BAGE	NAT1	*	*	*	*	0.01150	0.01000	0.00927	0.00903	0.00429	0.00898
I HOR C-PVg/Rg(g.I)	NAT2	*	*	*	*	*	0.01060	0.01010	0.00893	0.00340	0.00826
I	INU	*	*	0.01950	0.01820	0.01820	0.01220	*	0.01150	0.00958	0.01490
I CARLOS T.F.-B-PVg	NAT	*	*	*	*	*	0.00522	0.00876	0.00669	0.00286	0.00588
I A.REB-C-PVg/Rg(g.I)	INU	*	*	*	*	0.00934	0.00818	0.00963	0.00896	0.00911	0.00904
I	VALORES MEDIOS	*	0.01510	0.01610	0.01340	0.01430	0.01170	0.00872	0.00714	0.00377	0.00113

OBS: NAT - ensaio no teor de umidade PS - amostra coletada em periodo seco \* - parametro nao identificado  
 INU - ensaio inundado PC - amostra coletada em periodo chuvoso

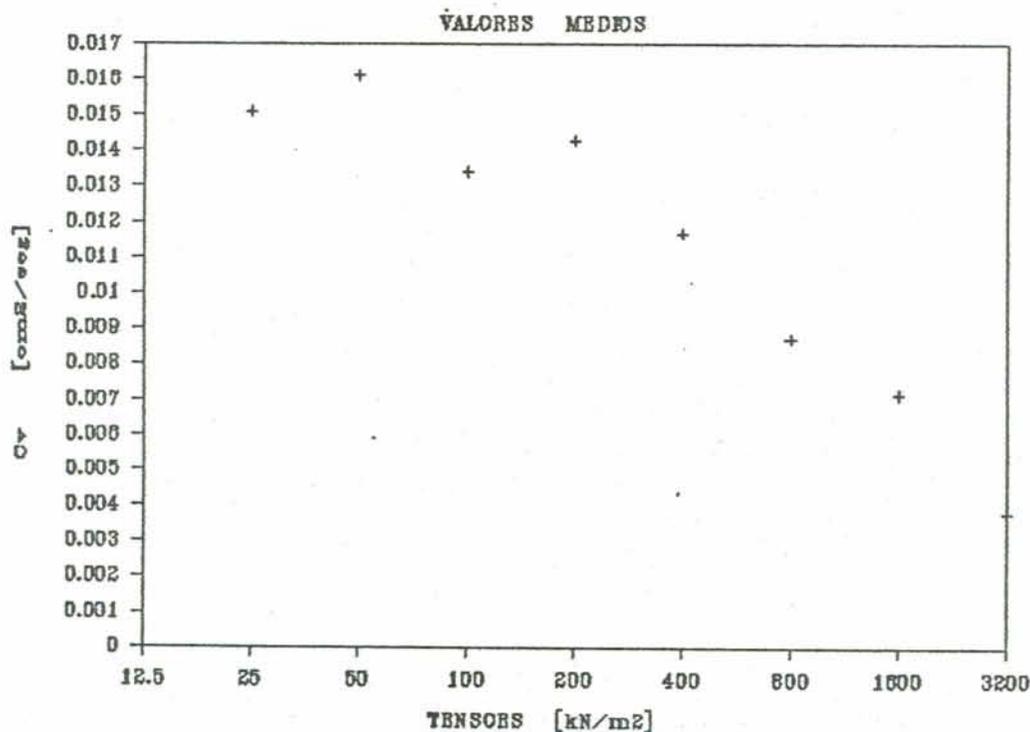


FIGURA 6.4.4 - Variação dos valores médios de Cv com o nível de tensões

TABELA 6.4.5 - Valores do coeficiente de permeabilidade para o adensamento primário ( $K_{ap}$ ) em cm/seg para os diferentes estágios de carga

PUNTO/ UNIDADE	CONDICAO ENSAIO	NIVEIS DE TENSÕES (kN/m <sup>2</sup> )								VALORES	
		12.5	25	50	100	200	400	800	1600	3200	MEDIOS
I	PS-NAT	*	*	*	*	*	*	*	*	1.82E-06	11.82E-06
I JARDIM ITU	PS-INU1	*	*	9.47E-04	8.50E-04	7.56E-04	2.20E-04	1.16E-04	1.84E-05	2.69E-06	14.16E-04
I HOR B - PVpf(AST)	PS-INU2	*	1.02E-03	1.54E-03	1.55E-03				1.35E-05	1.98E-06	18.26E-04
I	PC-NAT	*	*	1.14E-03	8.41E-04	5.21E-04	3.50E-04	7.60E-05	1.90E-05	2.68E-06	14.22E-04
I	PC-INU	*	9.06E-04	1.22E-03	7.10E-04	5.46E-04	2.64E-04	1.10E-04	1.49E-05	3.24E-06	14.72E-04
I IUPAHAROTI-B-PVpf	PC-NAT	*	*	7.75E-04	6.33E-04	5.46E-04	3.06E-04	1.08E-04	3.65E-05	1.13E-05	13.45E-04
I	PC-INU	*	1.39E-03	1.11E-03	6.05E-04	5.55E-04	2.47E-04	*	4.55E-05	1.17E-05	15.67E-04
I ICEEE-HOR B - PVm	NAT	*	*	*	*	2.66E-04	1.88E-04	9.95E-05	2.45E-05	5.52E-06	11.17E-04
I	INU1	*	*	*	*	2.50E-04	2.11E-04	1.14E-04	7.40E-05	4.14E-06	11.31E-04
I IAV. BAGE	NAT1	*	*	*	*	3.08E-04	2.10E-04	1.09E-04	5.60E-05	1.20E-05	11.39E-04
I HOR C-PVg/Rg(g.I)	NAT2	*	*	*	*	*	1.71E-04	1.17E-04	5.80E-05	1.09E-05	18.92E-05
I	INU	*	*	1.36E-03	7.53E-04	4.64E-04	2.00E-04	*	6.90E-05	3.07E-05	14.80E-04
I I CARLOS T.F.-B-PVg	NAT	*	*	*	*	*	3.92E-05	7.10E-05	3.75E-05	8.01E-06	13.89E-05
I I A.REB-C-PVg/Rg(gI)	INU	*	*	*	*	3.05E-04	1.44E-04	9.05E-05	4.48E-05	2.19E-05	11.21E-04
I	VALORES MEDIOS	*	1.11E-03	1.16E-03	7.40E-04	4.52E-04	2.13E-04	1.01E-04	3.94E-05	1.04E-05	14.78E-04

OBS: NAT - ensaio no teor de umidade PS - amostra coletada em periodo seco \* - parametro nao identificado  
 INU - ensaio inundado PC - amostra coletada em periodo chuvoso

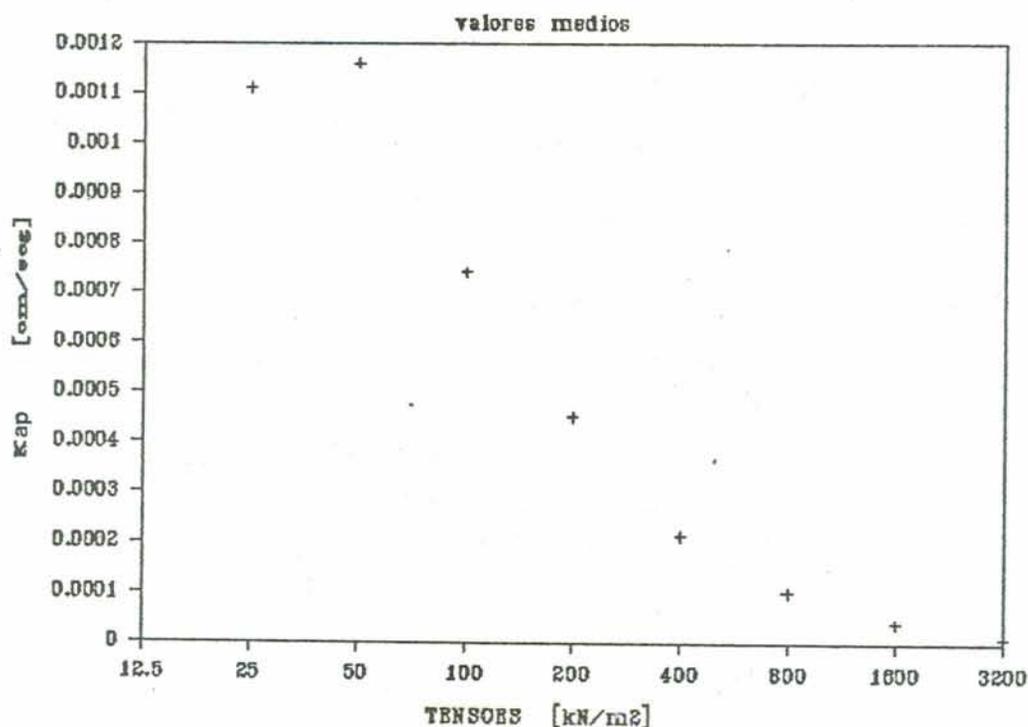


FIGURA 6.4.5 - Variação dos valores médios de  $K_{ap}$  com o nível de tensões

inundados), com tensões normais de 16 a 400 kN/m<sup>2</sup>.

A tabela 6.5.1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para os solos das diferentes unidades, em termos do intercepto de coesão (c) e do ângulo de atrito ( $\phi$ ).

Observam-se significativos valores do intercepto de coesão (ou, simplificado, coesão) para estes solos, por natureza bem drenados. Esta coesão "verdadeira" parece estar ligada a cimentações e a sucção. A inundação reduz muito a coesão.

Constatou-se que os responsáveis pelos maiores interceptos no eixo das tensões tangenciais são as relativamente altas tensões cisalhantes obtidas dos ensaios em baixas tensões normais (geralmente  $\leq 100$  kN/m<sup>2</sup>).

Contudo o papel e a importância relativa das cimentações e da sucção necessitam ser investigados por estudos específicos. No caso das cimentações, seria preferível a utilização de grandes amostras, onde as perturbações nessas manifestações estruturais são menores (IRFAN, 1988). A sucção deve ser avaliada por ensaios especiais e neste caso, uma formulação mais elaborada para a resistência ao cisalhamento ser empregada (FREDLUND et al., 1978).

Os valores de coesão são maiores para os solos do horizonte B, conforme esperado, pois nestes o teor de argila e o acúmulo de cimentantes é maior.

Os solos da unidade PVpf(AST) são aqueles que, no geral, apresentam destacados valores de coesão e, como já enfatizado, mostram fortes cimentações. No entanto, verifica-se que esta propriedade é muito susceptível a inundação.

Os valores para o ângulo de atrito são bastante variáveis. A explicação para este fato parece residir na grande variedade textural e mineralógica destes materiais. A inundação tende provocar pequenos decréscimos no atrito, pelo observado, devido a desarranjos estruturais provocados pela expansão ou decomposição de minerais sensíveis à água de inundação.

A relação da parcela de atrito com a textura, particularmente com a fração areia, é muito influenciada pela resistência dos grãos minerais que compõe o solo.

Uma importante característica verificada para estes

TABELA 6.5.1 - Síntese dos resultados dos parâmetros de resistência dos solos dos horizontes das diferentes unidades

UNIDADE GEOTEC.	HORIZ	c [kN/m <sup>2</sup> ]		Ø [graus]	
		natural	inundado	natural	inundado
PVg-Rg (g.PG)	HOR B	54.3-66.5	20.5-56.0	33-37	28-35
	HOR C	28.4-43.5	20.7-50.8	34-41	28-36
PVg-Rg (g.I)	HOR B	38.4-55.7	15.4-17.8	26-41	23-26
	HOR C	33.2-61.9	14.5-34.4	29-35	24-34
PVm-Rm	HOR B	22.4-93.9	15.7-49.9	26-39	24-26
	HOR C	27.0-107.5	10.4-45.0	28-39	21-34
PVpf (AST)	HOR B	78.0-101.3	12.2-71.5	32-35	24-28

solos, já comentada por outros autores para materiais semelhantes, é a curvatura na envoltória de resistência (SOWERS, 1963; CHEUNG et al., 1988 e MASSEY et al., 1989).

A figura 6.5.1 ilustra uma típica envoltória onde esta característica é evidente. Nota-se que em baixas tensões normais esta curvatura é pronunciada. Idênticas características verificaram CHEUNG et al.(1988) e MASSEY et al.(1989) para os solos de granito de Hong Kong; SANDRONI (1985) refere-se a um comportamento "errático" a baixas tensões. No caso estudado, as causas assemelham-se àquelas comentadas pelos autores: comportamento dilatante, cimentações e sucção.

O comportamento dilatante foi verificado para tensões de até  $200 \text{ kN/m}^2$ , para a grande maioria das amostras ensaiadas no teor de umidade natural. Conforme já comentado, a influência das cimentações e da sucção requer estudos específicos.

As curvas da deformação controlada pela tensão cisalhante revelaram "picos" de resistência, ou seja, ruptura frágil, em baixas tensões normais. O fato ocorre principalmente na condição de umidade natural, mas em alguns casos, também em amostras inundadas. O limite para as baixas tensões onde revelam-se os "picos" é muito variável, mas no geral, aproxima-se do limite ao comportamento dilatante.

Quanto a este típico comportamento "pré-adensado", existem referências de DAVISON DIAS (1987b e 1989), CAMPOS (1989) e LOHNES & DEMIREL (1973); este último chama de "pressão de colapso" a tensão vertical limite a este comportamento.

Adotando o termo "pressão limite" ao invés de pressão de colapso (para não confundir com o termo adotado na avaliação da colapsividade), pesquisou-se os valores para os pontos ensaiados na umidade natural. Procurou-se relacionar a pressão limite com a pressão de pré-adensamento virtual (obtida dos ensaios de compressão confinada) de cada ponto.

A figura 6.5.2 apresenta as curvas obtidas para um ponto amostrado. São ilustrados os "picos" de resistência para baixas tensões e a pressão limite aproximada. A pressão de pré-adensamento virtual é também indicada.

Um gráfico que relaciona a pressão limite e a pressão de pré-adensamento é mostrado na figura 6.5.3. A reta a 45 graus representa a igualdade entre as grandezas. Verifica-se

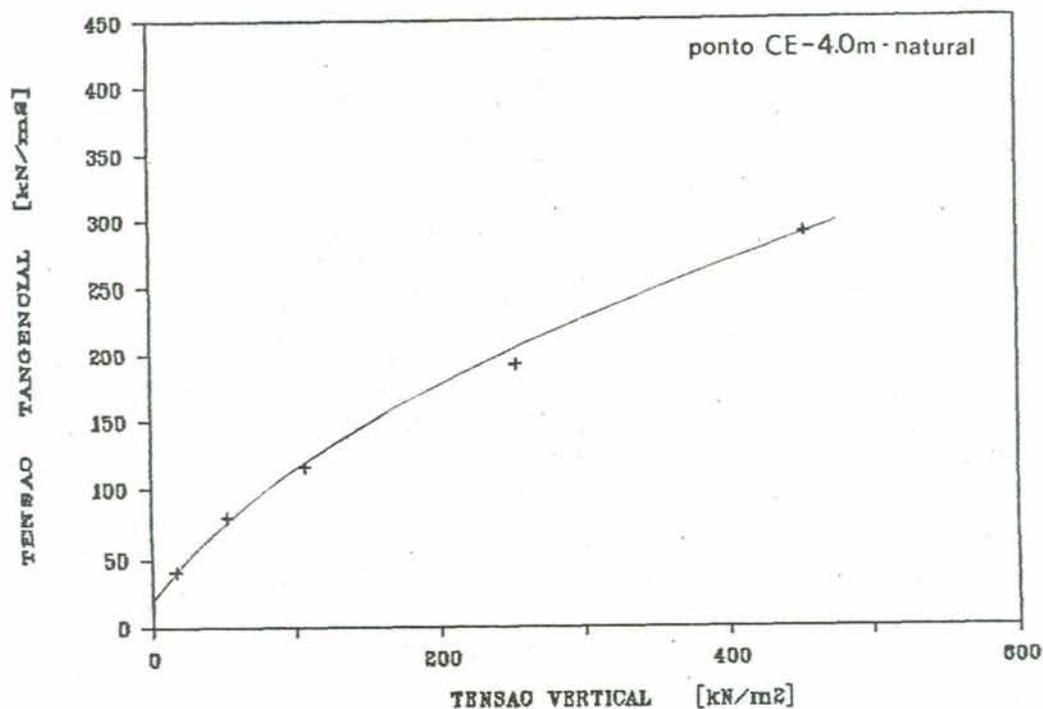


FIGURA 6.5.1 - Típica envoltória de resistência evidenciando a curvatura

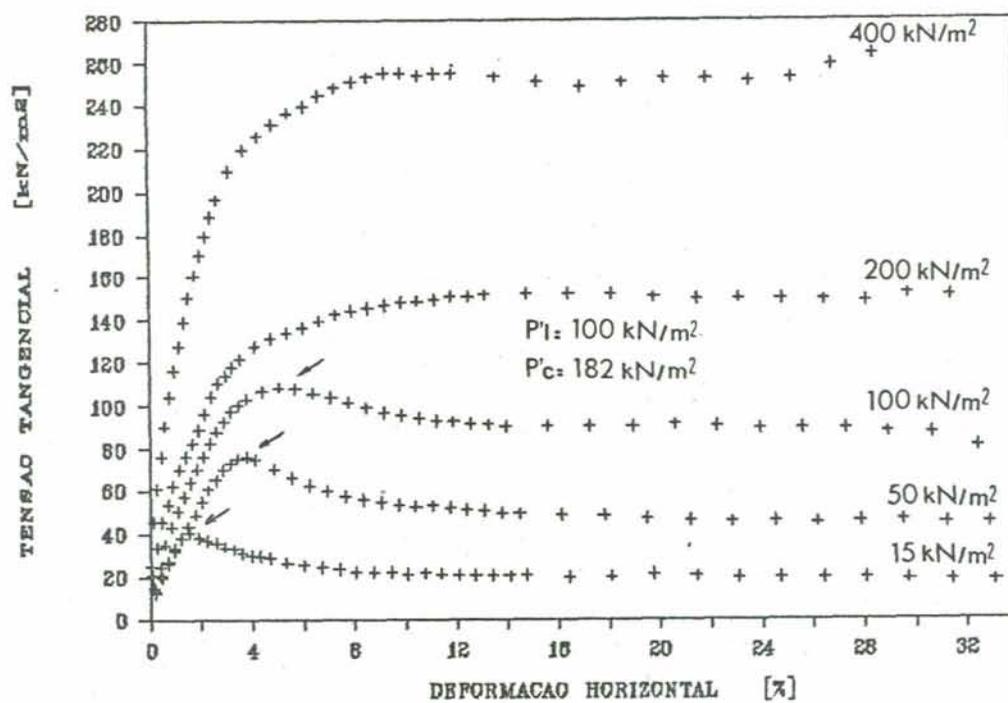


FIGURA 6.5.2 - Curvas da deformação horizontal x tensão tangencial para cisalhamento direto (ponto CE-4.0m natural) ilustrando "picos" de resistência

uma certa tendência dos pares de valores ao longo da reta, no entanto, a dispersão é muito grande. As causas a esta dispersão podem ser associadas à(o):

- Imprecisão na determinação da pressão de pré-adensamento;
- Valores aproximados da pressão limite pelo pequeno número de ensaios no entorno deste valor característico;
- Tipo de sollicitação diferente que identifica as duas grandezas e
- Grande heterogeneidade das amostras, pelos próprios fatores que parecem comandar estas grandezas: cimentações e sucção.

Em função destas resistências de "pico", partiu-se para uma tentativa de obter parâmetros residuais de resistência, ou melhor, parâmetros de resistência a grande deformação com o recisalhamento das amostras. Entretanto, na maioria das vezes, as tentativas foram mal sucedidas.

A retomada das amostras a posição inicial para o recisalhamento causava excessivas perturbações na superfície de ruptura das mesmas, principalmente para os solos com grãos grosseiros e nos ensaios na condição inundada. Em função disso, a análise em parâmetros residuais foi descartada, pois muitos resultados foram considerados errôneos ou "suspeitos".

A composição mineralógica mostrou influência sobre a resistência ao cisalhamento, principalmente dos solos saprolíticos do horizonte C. Ângulos de atrito inferiores a 25 graus (na condição inundada) referiam-se a solos com menor presença de quartzo (p.ex. solos das unidades com substratos migmatitos e Granito Independência). Estes materiais apresentam abundância em feldspatos friáveis e/ou consideráveis teores de mica.

Quanto a utilização de ensaios de cisalhamento direto nesta análise da resistência ao cisalhamento dos vários materiais, conclui-se por uma boa adequabilidade do método. O ensaio mostrou-se simples e repetitivo, facilitando a investigação de um grande número de amostras e pontos amostrados.

Na investigação de uma massa de solo heterogênea, como é o caso dos materiais originados do intemperismo subtropical de rochas granito-gnaissódicas, é bem mais representativo o emprego de um grande número de amostras de um mesmo ponto de amostragem. A heterogeneidade destes solos é verificada dentro de um mesmo bloco de amostra indeformada.

Um número médio de cinco amostras para cisalhamento direto foi suficiente no escopo da pesquisa, onde o reconhecimento das propriedades de resistência de uma grande variedade de materiais é o objetivo. Contudo, uma análise mais detalhada da resistência ao cisalhamento de um determinado ponto em particular exige um estudo específico, onde um número bem maior de amostras e um tratamento estatístico dos resultados é sugerido.

Esta análise por amostras indeformadas restringe-se a massa de solo "pseudo-homogênea". Na amostragem evitaram-se estruturas reliquias que, em geral, não são representáveis em pequenas amostras. No entanto, o trabalho de campo revelou que a resistência ao cisalhamento dos solos saprolíticos está muito condicionada a descontinuidades reliquias, que muitas vezes encontram-se preenchidas por materiais de menor atrito interno, principalmente argilas (comumente caolim), formando slickensides e estabelecendo superfícies de baixíssimo atrito.

#### 6.6 - COLAPSIVIDADE

O colapso estrutural com a inundação foi avaliado no equipamento de cisalhamento direto, nas operações que antecediam o cisalhamento das amostras inundadas.

O coeficiente de colapso estrutural (VARGAS, 1974) foi obtido desde os dados do índice de vazios inicial e da deformação sob tensões normais de 16 a 400  $\text{kN/m}^2$ , sem água e após a inundação.

Dos valores de  $i$  para os diferentes níveis de tensões de cada ponto ensaiado, as variações observadas nos máximos valores e nos níveis de tensões para este colapso máximo, em função dos horizontes das unidades geotécnicas, são apresentadas na tabela 6.6.1.

Verificam-se grandes variações nos valores máximos de

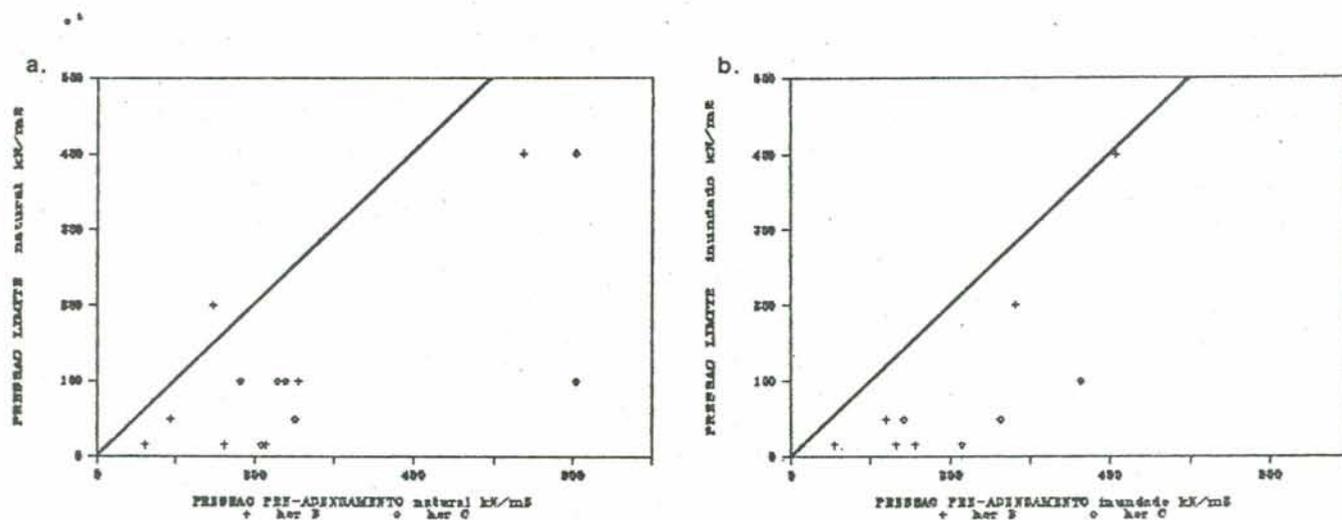


FIGURA 6.5.3 - Relação entre a pressão limite e a pressão de pré-adensamento  
 a. unidade natural  
 b. inundado

TABELA 6.6.1 - Variações dos valores do coeficiente de colapso máximo ( $i_{\max}$ ) e das tensões para o colapso máximo em função dos horizontes das unidades geotécnicas

UNIDADE GEOTEC.	HORIZ	$i_{\max}$ [%]	TENSÕES P/ COLAPSO MAX. [kN/m <sup>2</sup> ]
PVg-Rg (g.PG)	HOR B	6.0-8.5	100-400
	HOR C	5.6-7.2	150-300
PVg-Rg (g.I)	HOR B	6.3-7.6	100-200
	HOR C	4.1-4.8	200-400
PVm-Rm	HOR B	5.7-8.0	100-400
	HOR C	3.7-14.2	100-400
PVpf (AST)	HOR B	2.9-18.3	100-300

colapsividade.

Analisando os resultados pontuais, verificou-se que os valores máximos dos coeficientes de colapso encontrados, 10.5 %, 14.2 % e 18.3 %, correspondem respectivamente aos pontos UP-1.0m (hor B-PVpf), SF-3.5m (hor C-PVm) e JI-3.0m (hor B-PVpf), os quais, sob compressão confinada na condição de umidade natural, mostraram-se mais rígidos e com valores de pressão de pré-adensamento mais elevados. Isto indica que a rigidez demonstrada por estes solos está relacionada a fatores grandemente afetados pela inundação. As cimentações e a sucção retornam como fatores lembrados.

As tensões para o colapso máximo variaram, em geral, entre 100 e 400  $\text{kN/m}^2$ , na faixa de tensões adotadas. No entanto, uma avaliação pontual revelou que para o horizonte B os valores máximos de colapso distribuíram-se no referido intervalo, mas para o horizonte C, 80 % dos pontos verificaram valores máximos entre 200 e 400  $\text{kN/m}^2$ .

Segundo a classificação de severidade de Jennings e Knight (seção 2.3.2) observa-se que para os solos do horizonte B a colapsividade é considerada problemática, exceto para os solos da unidade PVpf, para os quais a colapsividade varia desde moderada a muito problemática. Quanto aos solos do horizonte C, a colapsividade varia de moderada a problemática, caso extremo SF-3.5m que é considerado muito problemático quanto a colapsividade. Se considerados os critérios de Vargas, todos os solos são considerados colapsíveis para determinado valor de tensão ( $i > 2\%$ ).

Contudo, acreditou-se ser estes critérios de severidade muito conservativos. Por outro lado, as investigações de campo revelaram que estes são solos bem drenados e portanto uma condição natural de inundação súbita não é própria da natureza destes materiais. No entanto, deve se ressaltar que interferências que comprometam a drenagem natural destes solos podem trazer conseqüências desfavoráveis.

Conforme comenta VARGAS (1974), parece ser a própria drenagem associada com lixiviação a responsável pela origem de uma estrutura aberta (metaestável, ou mesmo instável), sensível a uma condição adversa de inundação.

A análise dos resultados também mostrou que não existe relação consistente entre o parâmetro de colapsividade empregado e o índice de vazios e o grau de saturação, indicando que relações estruturais mais complexas comandam a colapsividade destes solos, como a dissolução dos cimentos naturais e perda da sucção.

## 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões decorrentes deste estudo geotécnico dos solos de Porto Alegre.

### 7.1 - CONCLUSÕES

- O meio físico de Porto Alegre destaca-se por contrastes geomorfológicos, com a ocorrência desde morros, pertencentes à parte leste do Escudo Cristalino Sul-Riograndense, até planícies aluviais, integrantes da Planície Costeira; sua geologia é constituída de sedimentos quaternários e do embasamento cristalino, este formado por uma complexa associação de granitos, gnaisses e migmatitos; os perfis pedológicos predominantes são podzólicos vermelho-amarelo e litólicos, oriundos das rochas cristalinas, e planossolos, gleis e solos aluviais, sobre os sedimentos do Quaternário.

- O método de investigação de unidades geotécnicas, baseado no estudo cartográfico sobre dados geológicos, pedológicos e topográficos e nos trabalhos de campo, mostrou-se adequado para Porto Alegre, permitindo a compartimentação em unidades de solos com origem e características físicas e morfológicas semelhantes.

- A carta de unidades geotécnicas mostra a ocorrência das unidades estimadas e algumas outras características estruturais de importância geotécnica; acompanhada da descrição dos solos e suas características, serve de forte subsídio ao mapeamento geotécnico do município, sendo que já fornece muitas informações úteis ao planejamento urbano (uso e ocupação do solo) e para anteprojetos de engenharia.

- A grande variedade de solos subtropicais originados do intemperismo das rochas cristalinas motivou um extenso programa de amostragens e ensaios de laboratório, com o objetivo de determinar parâmetros geotécnicos para identificação das características e propriedades de engenharia

destes materiais. Foram investigados e amostrados dezoito perfis, totalizando 42 pontos e 390 amostras para os diferentes ensaios.

- Quanto as características físico-morfológicas dos perfis, determinadas nos trabalhos de campo, pode-se destacar que, no geral, são solos pouco evoluídos pedologicamente, não raramente aflorando solos saprolíticos do horizonte C e material rochoso; o horizonte B geralmente apresenta características de transporte eluvionar e coluvionar e processos de podzolização e laterização; o horizonte A, pelo caráter arenoso, é facilmente erodido, deixando muitas vezes a descoberto os horizontes inferiores. Particularmente, observa-se para as unidades com substrato Granito Ponta Grossa, Granito Cantagalo e Granito Santana a presença predominante de solos saprolíticos de textura granular grosseira e a ocorrência de matacões, para o último, o forte diaclasamento condiciona perfis de solos saprolíticos mais ou menos profundos; nas unidades com substrato Granito Independência destacam-se perfis mais espessos e também a ocorrência de matacões; para as unidades com substrato migmatitos ocorrem perfis mais evoluídos em relevo suave, com solos saprolíticos muito variados; por último, para a unidade sobre o Alterito Serra de Tapes, verifica-se um fortemente laterizado horizonte B, estruturalmente heterogêneo, com a presença de concreções ferruginosas que fornecem, no geral, rigidez e perceptível cimentação para este material.

- Desde os trabalhos de campo e análises de laboratório, verifica-se que a mineralogia do horizonte B dos solos das diferentes unidades é dada basicamente por argila do tipo caolinita, sesquióxidos de ferro e alumínio e grãos de quartzo de tamanhos variados; já os solos saprolíticos são, em geral, formados por grãos de quartzo e de feldspato em decomposição e argila do tipo caolinita e também illita (associada a ocorrência de mica). Destaca-se, principalmente nas unidades com substrato Granito Independência e migmatitos, a ocorrência de solos micáceos. A complexidade litológica descrita para os migmatitos reflete-se em solos saprolíticos de mineralogia muito variável para a unidade com este substrato.

- Os resultados de noventa ensaios granulométricos revelaram uma variedade textural acentuada para os solos estudados. Os solos do horizonte B são mais argilosos que os solos do horizonte C, decorrência do maior intemperismo e do processo de iluviação de argila. A textura dos solos saprolíticos é relacionada com aquela da rocha de origem, mas apresenta grandes variações resultantes da heterogeneidade no intemperismo e na própria granulação das rochas de uma mesma unidade; para os solos do horizonte B verifica-se que a granulometria é afetada pelas características de transporte dos materiais, com a presença de grãos grosseiros "discordantes" em meio a matriz fina. Os ensaios apresentaram alguns aspectos discutíveis quanto ao destorroamento de agregações cimentadas e de minerais friáveis e ao emprego de ensaios de sedimentação para os solos micáceos. O uso de defloculante mostra-se necessário para a dispersão da argila.

- Quanto a plasticidade, baseado em 45 ensaios de limites de Atterberg, verificam-se limites de liquidez inferiores a 60%, limites de plasticidade maiores que o teor de umidade natural e índices de plasticidade não superiores a 20%, caracterizando os solos como de baixa plasticidade. No Gráfico de Plasticidade de Casagrande, a grande maioria dos materiais situam-se abaixo da linha A e à esquerda da linha B, zona de solos arenosos e siltosos de baixa plasticidade e também de solos argilosos caoliníticos e ilíticos. O parâmetro de atividade de Skempton classifica os solos do horizonte B como predominantemente inativos; para os solos saprolíticos (com teor de argila geralmente < 10%) tal parâmetro não mostra-se próprio. Quanto aos ensaios de limites de Atterberg, além do destorroamento, a pseudoplasticidade caracteriza-se como fator considerável, principalmente para os solos micáceos.

- A cimentação e as estruturas reliquias constituem manifestações estruturais de grande importância geotécnica para os solos estudados e caracterizam-se por variantes dificilmente quantificáveis. As cimentações ocorrem devido ao acúmulo de sequióxidos de ferro e alumínio e a processos de argilização, sendo que nos solos saprolíticos são acompanhadas das tensões residuais da rocha. As estruturas reliquias são principalmente descontinuidades residuais do material rochoso,

alertam para o fato de que no estudo de solos saprolíticos deve se ter em mente dois universos: a massa "homogênea" de solo e o maciço no sentido global onde são incluídas estas estruturas que em muitos dos casos governam o comportamento geomecânico destes materiais.

- Dos índices físicos, analisadas cerca de 280 determinações, verificou-se que particularmente os valores de teor de umidade, grau de saturação e índice de vazios mostram muita dispersão; as grandezas muitas vezes apresentam-se tão variáveis em um mesmo horizonte quanto entre as diferentes unidades. São solos parcialmente saturados ( grau de saturação entre 50 e 70%), com valores médios de peso específico natural de 16.0 a 17.6  $\text{kN/m}^3$  e seco de 13.6 a 15.1  $\text{kN/m}^3$  e com índices de vazios, na maioria das amostras, menores que 1.0.

- Quanto a compressibilidade, realizados 55 ensaios de compressão confinada, foi revelada a ocorrência de pressões de pré-adensamento "virtuais", de valores muito variáveis ( de 46 a 603  $\text{kN/m}^2$  no teor de umidade natural), e susceptíveis a inundação, esta característica é associada aos complexos fatores que muito influenciam o comportamento geomecânico destes solos, são eles: cimentações, sucção, macroestrutura e tensões residuais. Os parâmetros de compressibilidade mostram muita dispersão, em termos dos tradicionais  $C_r$ ,  $C_c$  e  $C_d$  foram obtidos valores de 0.01 a 0.10, 0.17 a 0.50 e 0.01 a 0.07 respectivamente. Variações desta ordem ocorrem para amostras até de mesmo local, sendo este fato atribuído a heterogeneidades estruturais das mesmas, contudo, os resultados mostram um aumento do índice de compressão com o limite de liquidez e índice de vazios dos solos. As deformações máximas sob compressão confinada foram da ordem de 30% para tensões máximas de até 3200  $\text{kN/m}^2$ . Os solos micáceos são aqueles que mostram maior recuperação sob descarregamento. Os recalques são rápidos, sendo que em média 60% das deformações ocorrem instantaneamente à aplicação das cargas e 90% num período de 4 horas; o recalque primário, diferido no tempo, apresenta-se numa configuração pouco aproximada às curvas teóricas; estes fatos dificultam a determinação da velocidade dos recalques em função do coeficiente de adensamento de ensaios oedométricos.

- Na resistência ao cisalhamento destes solos, os 46 ensaios de cisalhamento direto realizados destacaram a significativa parcela de coesão "verdadeira" (com valores de 22.4 a 107.5 kN/m<sup>2</sup> no teor de umidade natural), maior para os solos do horizonte B, mais argilosos e cimentados; os altos interceptos ocorrem devido às tensões cisalhantes relativamente altas obtidas em baixas tensões normais ( $\leq 100$  kN/m<sup>2</sup>), contudo são grandemente reduzidos com inundação (valores de coesão de 10.4 a 71.5 kN/m<sup>2</sup> na condição inundada). Os solos do horizonte B da unidade PVpf (AST) são aqueles com maiores valores de coesão e também os mais cimentados. A parcela de atrito é dependente da variedade textural dos materiais; valores do ângulo de atrito de 26 a 41 graus e de 21 a 36 graus foram encontrados na umidade natural e na condição inundada respectivamente, ângulos mais baixos são relacionados a solos micáceos com menor teor de quartzo. Tanto a coesão como o atrito parecem muito influenciados pela cimentação e sucção, o que justifica a redução nas características de resistência com a inundação. As envoltórias de resistência são tipicamente curvas. Em baixas tensões verticais são verificados comportamento dilatante e "picos" de resistência nas curvas tensão x deformação sob cisalhamento direto; as pressões limites a este comportamento tendem a crescer com o pré-adensamento, mas não apresentam relação direta. Os ensaios de cisalhamento direto mostraram-se adequados nesta investigação destes materiais estruturalmente muito variáveis, pois são repetitivos e utilizam um maior número de amostras.

- Quanto a colapsividade, baseado em cerca de cem ensaios, estes solos são considerados em média problemáticos (segundo critérios de Jennings e Knight), com valores de coeficiente de colapso estrutural de 2.9 a 18.3 %, apesar disso, por apresentarem boa drenagem natural, são estáveis na sua forma de ocorrência. Os maiores valores de colapso ocorrem sob tensões verticais acima de 100 kN/m<sup>2</sup>, sendo que os solos mais colapsíveis (com coeficiente de colapso superior a 10%) coincidem com aqueles mais rígidos e pré-adensados sob compressão confinada no teor de umidade natural.

## 7.2 - SUGESTÕES

- Ampliação do estudo das unidades geotécnicas de Porto Alegre, através de um maior trabalho de campo e amostragens das unidades de solos subtropicais e, principalmente, por uma investigação dirigida à unidade HID (solos hidromórficos), obtendo para esta, divisões em função das diferentes formações sedimentares e perfis pedológicos. Deve ser observado que, devido as diferentes características físicas e de ocorrência destes materiais de origem sedimentar, são necessárias modificações no método de investigação; neste sentido, um maior emprego de informações de sondagens de simples reconhecimento é uma alternativa .

- A construção do mapa geotécnico para Porto Alegre a partir das unidades geotécnicas propostas, com a execução de cartas de aptidões dos solos para diferentes fins na engenharia, utilizando-se das propriedades geotécnicas estimadas e de trabalhos complementares nas áreas de geologia estrutural, geomorfologia, hidrogeologia e controle ambiental.

- Atualização do mapa geológico da região a luz de conceitos mais recentes, com detalhe tanto a nível litológico como estrutural das rochas cristalinas; seria fundamental para trabalhos geotécnicos mais detalhados no município.

- Promoção de um estudo voltado ao intemperismo das rochas da região e à evolução deste no perfil de solos formados. Sugere-se uma investigação nas modificações mineralógicas desde o material rochoso até os solos superficiais e a partir daí buscar a quantificação do intemperismo para relacioná-lo com as propriedades de engenharia destes solos.

- Execução de um estudo mais específico sobre o comportamento geomecânico dos solos subtropicais de Porto Alegre, levando em conta as variáveis que carecem de investigação por métodos e ensaios especiais, tais como as cimentações, com a utilização de maiores amostras, e a sucção, com o emprego de ensaios de sucção. Entretanto, deve ter-se em mente a variedade dos materiais, logo, a necessidade em se estabelecer universos bem definidos, utilizando para tal este estudo por unidades geotécnicas; com a adoção de um espectro

mais restrito e coerente de solos, torna-se justificável o emprego de ensaios mais sofisticados.

- Investigação das propriedades de compactação e resilientes destes solos, visto o tradicional emprego de solos saprolíticos desta natureza (os chamados "saibros") em obras rodoviárias. Adotando universos definidos pelas unidades geotécnicas, a determinação de parâmetros básicos de compactação (umidade ótima e peso específico máximo) assim como a utilização de ensaios CBR (California Bearing Ratio) e de resiliência são importantes no estudo de aptidões para o mapeamento geotécnico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AB'SABER, D. O sitio urbano de Porto Alegre: estudo geográfico. **Boletim Paulista de Geografia**, n.42, p.3-30, 1965.
2. ANTUNES, F.S. O uso da pedologia na engenharia. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 1989, Porto Alegre. **Anais ... Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.25-33.**
3. AZAMBUJA, M.A.E. **Intemperismo, origem e formação dos solos.** Porto Alegre: CEUE, 1970. 95p.
4. AZEVEDO, S.L. **Sistematização de sondagens de simples reconhecimento dos solos de Porto Alegre.** Porto Alegre: CPGEC, 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
5. BARDEN, L., MCGOWN, A., COLLINS, K. The collapse mechanism in partly saturated soil. **Engineering Geology**, v.7, n.1, p.49-60, 1973.
6. BLIGHT, G.E. Design assessment of saprolites and laterites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12, 1989, Rio de Janeiro. **Preprints of invited lectures and panelists' discussions.** [S.l.] ISSMFE Technical Committee on Tropical Soils, 1989. p.17-24.
7. BRAND, E.W. Analysis and design in residual soils. In: SPECIALTY CONFERENCE ON ENGINEERING AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, 1982, Honolulu, Hawaii. **Proceedings ... New York: ASCE, 1982. p.89-143.**
8. BRAND, E.W., PHILLIPSON, H.B. Review of international practice for the sampling and testing of residual soils. In: \_\_\_\_\_. (Eds.). **Sampling and testing of residual soils: a review of international practice.** Hong Kong: Scorpion Press, 1985. p.7-21.
9. BRASIL. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul.** Recife, 1973. 431p. (Boletim técnico, 30)
10. BRINK, A.B.A., KANTEY, B.A. Collapsible grain structure in residual granite soils in Southern Africa. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5, 1961, Paris. v.1, p.611-614.
11. CAMPOS, T.M.P. Considerações sobre o comportamento de engenharia de solos saprolíticos de gnaiss. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 1989, Porto Alegre. **Anais ... Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.147-165.**
12. CARROL, S. **Rock weathering.** New York: Plenum, 1970.
13. CARVALHO, J.B.G. Study of the plasticity of lateritic soils: methodology and effect of drying on liquid and plastic limits. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1, 1985, Brasília. **Proceedings ... São Paulo: ABMS, 1985. v.1, p.63-76.**

14. CASTRO, G.T. **Caracterização geotécnica de solos residuais gnaissicos.** Rio de Janeiro: PUC, 1974. Dissertação de Mestrado.
15. CHEUNG, C.K., GREENWAY, D.R., MASSEY, J.B. Direct shear testing of a completely decomposed granite. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.109-118.
16. CRUZ, A.L.G. da. **Solo-cimento para habitações populares.** Porto Alegre: CPGEC, 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
17. CRUZ, P.T. da. Raciocínios de mecânica das rochas aplicados a saprólitos e solos saprolíticos. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 1989, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.121-146.
18. \_\_\_\_\_. Solos residuais: algumas hipóteses de formulações teóricas de comportamento. In: SEMINARIO EM GEOTECNIA DE SOLOS TROPICAIS, 1987, Brasília. **Anais ...** Brasília: ABMS, 1987. p.79-111.
19. DAVISON DIAS, R. Investigação de solos utilizando levantamentos pedológicos. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA, 1985, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1985. p.17-36.
20. \_\_\_\_\_. **Aplicação de pedologia e geotecnia no projeto de fundações de linhas de transmissão.** Rio de Janeiro: COPPE, 1987. 349p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - UFRJ.
21. \_\_\_\_\_. **Comportamento de perfis de solos situados na Grande Porto Alegre.** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1987(b). Relatório técnico.
22. \_\_\_\_\_. Considerações sobre a resistência ao cisalhamento em solos superficiais parcialmente saturados baseados na pedologia. In: SIMPOSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E LABORATORIO EM GEOTECNIA, 1988, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: COPPE/ABMS/ABGE, 1988. v.1, p.213-226.
23. \_\_\_\_\_. Geomecânica dos solos lateríticos do sul do Brasil. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 1989, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.96-120
24. DAVISON DIAS, R., GEHLING, W.Y.Y., GOLBERT, R. Proposição de um método de obtenção de características geotécnicas de solos superficiais utilizando levantamentos pedológicos, topográficos e geológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, 1984, Belo Horizonte. **Anais ...** Belo Horizonte: ABGE, 1984. v.2, p.367-386.
25. DAVISON DIAS, R., GASPARIN, P. Estudo da macroestrutura dos solos lateríticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDACÕES, 8, 1986, Porto Alegre. **Anais ...** São Paulo: ABMS, 1986. v.1, p.231-240.
26. DEARMAN, W.R., BAYNES, F.J., IRFAN, T.Y. Engineering grading of weathered granite. **Engineering Geology**, v.12, n.4, p.345-374, 1978.
27. DEERE, D.U., PATTON, F.D. Slope stability in residual soils. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4, 1971, San Juan, Puerto Rico. **Proceedings ...** New York: ASCE, 1971. v.1, p.87-170.

28. DESAI, M.D. Geotechnical aspects of residual soils of India. In: BRAND, E.W., PHILLIPSON, H.B. (Eds.). **Sampling and testing of residual soils: a review of international practice.** Hong Kong: Scorpion Press, 1985. p.83-98.
29. FRAGOSO CESAR, A.R.S. et al. O Batólito Pelotas (proterozóico superior/paleozóico) no escudo do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, 1986, Goiânia. **Anais ...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1986. v.3, p.1322-1343.
30. FREDLUND, D.G., MORGENSTERN, N.R., WIDGER, R.A. The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v.15, n.3, p.313-321, 1978.
31. FUNDAÇÃO METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO - METROPLAN. **Estudo da destinação do uso do solo rural na Região Metropolitana de Porto Alegre.** Porto Alegre, 1978.
32. GANDOLFI, N., ZUQUETTE, L.V., OLIVEIRA, J.B. Pedologia como fonte de dados para o mapeamento geotécnico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, 1986, Goiânia. **Anais ...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1986. v.1, p.525-529.
33. GIDIGASU, M.D. Mode of formation and geotechnical characteristics of laterite materials of Ghana in relation to soil forming factors. **Engineering Geology**, v.6, p.79-150, 1972.
34. ———. Degree of weathering in the identification of laterite materials for engineering purposes - a review. **Engineering Geology**, v.8, n.3, p.213-266, 1974.
35. ———. Potential application of engineering pedology in shallow foundation engineering on tropical residual soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.17-24.
36. GONI, J.C., GOSO, H., ISSLER, R.S. Estratigrafia e geologia do pré-cambriano e eopaleozóico uruguaio e sul-riograndense. **Avulso da Escola de Geologia**, Porto Alegre, n.3, p.1-105, 1962.
37. HAMROL, A. A quantitative classification of the weatherability of rocks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5, 1961, Paris. v.2, p.771-774.
38. HO, D.Y.F., FREDLUND, D.G. Increase in strength due to suction for two Hong Kong soils. In: SPECIALTY CONFERENCE ON ENGINEERING AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, 1982, Honolulu, Hawaii. **Proceedings ...** New York: ASCE, 1982. p.263-276.
39. IRFAN, T.Y. Fabric variability and index testing of a granitic saprolite. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.25-35.
40. IRFAN, T.Y., DEARMAN, W.R. Engineering classification and index properties of a weathered granite. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, n.17, p.79-90, 1978.
41. IRFAN, T.Y., WOODS, N.W. The influence of relict discontinuities on slope stability in saprolitic soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.267-276.
42. JOST, H., VILLWOCK, J.A. Contribuição à estratigrafia do pré-cambriano do Rio Grande do Sul. **Notas e Estudos da Escola de Geologia**, Porto Alegre, v.1, p.13-26, 1966.

43. KLAMT, E. Relevancia da pedologia na avaliação do comportamento dos solos. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 1989, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.13-24.
44. LEMOS, R.C., SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solos no campo.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1982. 45p.
45. LITTLE, A.L. The engineering classification of residual tropical soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7, 1969, México. **Specialty session engineering properties of lateritic soils.** México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1969. v.1, p.1-10.
46. LOHNES, R.A., DEMIREL, T. Strength and structure of laterites and lateritic soils. **Engineering Geology**, v.7, n.1, p.13-33, 1973.
47. LUMB, P. The properties of decomposed granite. **Geotechnique**, v.12, n.3, p.226-243, 1962.
48. MACCARINI, M. Estudo da quebra de cimentações de um solo artificial - uma tentativa de modelo para solos residuais. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 1989, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.82-95.
49. MASSEY, J.B., IRFAN, T.Y., CIPULLO, A. The characterization of granitic saprolitic soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12, 1989, Rio de Janeiro. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1989. v.1, p.533-542.
50. MEDINA, J. A importância do estudo de solos tropicais e subtropicais. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 1989, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.1-12.
51. MILITITSKY, J. Solos tropicais e suas aplicações em fundações. In: COLOQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL, 1, 1985, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1985. p.67-113.
52. MITCHELL, J.K., SITAR, N. Engineering properties of tropical residual soils. In: SPECIALTY CONFERENCE ON ENGINEERING AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, 1982, Honolulu, Hawaii. **Proceedings ...** New York: ASCE, 1982. p.30-57.
53. NOGAMI, J.S. Classificação e terminologia para macroestruturas naturais dos solos. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 2, 1970, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: Associação Paulista de Geologia Aplicada, 1970. v.1, p.55-66.
54. \_\_\_\_\_. **Conceituação e ocorrência de solos.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, 1976.
55. NOVAIS-FERREIRA, H., VIANA DA FONSECA, A. Engineering properties of a saprolitic soil from granite. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.181-188.
56. NUDELMANN, T.A. **Caracterização e estudo do comportamento de um solo residual de migmatito para fins de estimativa de recalques de fundações.** Porto Alegre: CPGEC, 1980. 126p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.

57. OLIVEIRA, C.A.A. Um lago chamado Guaíba. **Boletim Gaúcho de Geografia**, n.9, p.33-39, 1981.
58. ORLANDINI, R. **Estimativa das unidades geotécnicas dos municípios de Novo Hamburgo e Campo Bom - RS e caracterização geomecânica de perfis típicos de solos de arenito.** Porto Alegre: CPGEC, 1991. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
59. PINHEIRO, R.J.B. **Estudo do comportamento geotécnico de solos e rochas brandas da Formação Rosário do Sul.** Porto Alegre: CPGEC, 1991. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS. (a ser apresentada).
60. PREZZI, M. **Ensaio de penetração tipo cone (CPT) na região metropolitana de Porto Alegre.** Porto Alegre: CPGEC, 1990. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
61. PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim.** Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796p. (Levantamento de Recursos Naturais, 33)
62. RADWAN, A.M. Properties of granitic soil in Aswan, Egypt. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.43-48.
63. RAO, S.M., SRIDHARAN, A., CHANDRAKARAN, S. The role of ironoxide in tropical soil properties. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.43-48.
64. REICHE, P. A survey of weathering processes and products. **Geology**, n.3, 95p., 1950.
65. RUDDOCK, E.C. Residual soils of the Kumasi district in Ghana. **Geotechnique**, v.17, n.4, p.359-377, 1967.
66. RUXTON, B.P., BERRY, L. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. **Bulletin of the Geological Society of America**, n.68, p.1263-1292, 1957.
67. SANDRONI, S.S. Sampling and testing of residual soils in Brazil. In: BRAND, E.W., PHILLIPSON, H.B. (Eds.). **Sampling and testing of residual soils: a review of international practice.** Hong Kong: Scorpion Press, 1985. p.31-50.
68. SCHNEIDER, A.W. **Contribuição ao estudo do subsolo de Porto Alegre.** Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, 1959. 44p.
69. SCHNEIDER, A.W., LOSS, E.L., PINTO, J.F. **Mapa geológico da Folha de Porto Alegre - RS.** Porto Alegre: Instituto de Geociências-UFRGS/CNPq, 1974. Escala 1:50.000.
70. SOWERS, G.F. Engineering properties of residual soils derived from igneous and metamorphic rocks. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDACOES, 2, 1963, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABMS, 1963. v.1, p.39-62
71. SUEOKA, T. Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering index. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.55-61.
72. TOWNSEND, F.C. Geotechnical characteristics of residual soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v.111, n.1, p.77-94, 1985.

73. TOWNSEND, F.C., MANKE, P.G., PARCHER, J.V. The influence of sesquioxides on lateritic soil properties. **Highway Research Record**, n.374, p.80-92, 1971.
74. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Departamento de Solos. **Levantamentos detalhados dos solos da Região Sul do Município de Porto Alegre-RS.** Porto Alegre, 1976/1977. Escalas 1:20.000 e 1:100.000. [Trabalhos de acadêmicos não publicados]
75. VARGAS, M. **Resistência e compressibilidade de argilas residuais.** São Paulo: IPSIS, 1951. Tese (Cadeira de Mecânica dos Solos e Fundações) - Escola Politécnica, USP.
76. \_\_\_\_\_. Some engineering properties of residual clay soils occurring in southern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3, 1953, Zurich. **Proceedings ... Zurich, 1953.** v.1, p.67-71.
77. \_\_\_\_\_. **Origem, propriedades e natureza dos solos residuais indeformados.** Rio de Janeiro: COPPE, 1970. Publicação 2/70.
78. \_\_\_\_\_. Engineering properties of residual soils from south-central region of Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, 1974, São Paulo. **Proceedings ... São Paulo: ABGE, 1974.** v.1, p.IV-pc-5.1/5.25.
79. \_\_\_\_\_. Characterization, identification and classification of tropical soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ... Rotterdam: A.A. Balkema, 1988.** v.1, p.71-75.
80. VAUGHAN, P.R., MACCARINI, M., MOKHTAR, S.M. Indexing the engineering properties of residual soils. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v.21, p.69-84, 1988.
81. WESLEY, L.D. Engineering classification of residual soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ... Rotterdam: A.A. Balkema, 1988.** v.1, p.77-84.
82. YONG, R.N. et al. Composition effect on suction of residual soil. In: SPECIALTY CONFERENCE ON ENGINEERING AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, 1982, Honolulu, Hawaii. **Proceedings ... New York: ASCE, 1982.** p.296-313.
83. YUDHBIR, B.C.R., SAHU, B.K. Identification and classification of tropical soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2, 1988, Singapore. **Proceedings ... Rotterdam: A.A. Balkema, 1988.** v.1, p.85-88.

**A N E X O**

CARTA DE UNIDADES GEOTECNICAS DO MUNICIPIO DE PORTO ALEGRE