



Elisangela do Prado Oliveira

**Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e
micromorfológica de um perfil de alteração de granito-
gnaisse de Curitiba, PR**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos
Co-orientadores: Franklin dos Santos Antunes
Denise Maria Mano Pessoa

Rio de Janeiro
Março de 2006



Elisangela do Prado Oliveira

**Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e
micromorfológica de um perfil de alteração de granito-
gnaisse de Curitiba, PR**

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

Tácio Mauro Pereira de Campos

Presidente/Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Franklin do Santos Antunes

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Denise Maria Mano Pessoa

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Cláudio Palmeiro do Amaral

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

George de Paula Bernardes

UNESP-Guaratinguetá

Sérgio Tibana

UENF

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de março de 2006

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

Elisangela do Prado Oliveira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná - UFPR em 2003. Realizou estágio de pesquisa no LAME/LACTEC atuando no Laboratório de Mecânica dos Solos e auxiliando em projetos de pesquisa de geotecnia, em 2002/2003. Ingressou no Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia no início de 2004.

Ficha Catalográfica

Oliveira, Elisangela do Prado

Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR / Elisangela do Prado Oliveira ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos ; co-orientadores: Franklin dos Santos Antunes, Denise Maria Mano Pessoa.– Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

197 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Perfil de intemperismo. 3. Solo residual. 4. Granito-gnaiss. 5. Propriedades bio-físico-químicas. 6. Mineralogia e micromorfologia. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Antunes, Franklin dos Santos. III. Pessoa, Denise Maria Mano. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

CDD: 624

A Helio e Angela cujos exemplos são a base deste caminho. Pelo apoio incondicional de ontem, hoje e sempre dedico esta dissertação.
Ao Helinho, por acreditar, torcer e incentivar.

Agradecimentos

Ao Professor Tácio Mauro Pereira de Campos pela dedicação, disponibilidade, atenção e paciência, a quem sempre terei como referência de amor ao trabalho.

Ao Professor Franklin dos Santos Antunes pelos conselhos, estímulo, exemplo e por acreditar no meu potencial.

À Professora Denise Maria Mano Pessoa pela orientação, companheirismo e cumplicidade.

Ao Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, unidade integrante do Instituto para Tecnologia e Desenvolvimento – LACTEC, pelo suporte fundamental dado ao estudo. Na pessoa do Professor Paulo Roberto Chamecki, por quem tenho uma admiração e carinho especiais, estendo meu agradecimento a todos os integrantes do LAME.

Aos estagiários do LAME/LACTEC, em especial a Pedro Thá, Marcelo Miqueletto, Carla Alessi, Hylltonn Bazan, Liz Mara Penido, Guilherme Slongo, Carolina Pavan e Talita Scussiato, que participaram ativamente da execução do programa experimental, juntamente com os técnicos Celso Amarante e Valdevan Santos.

À Roberta Boszczowski e Laryssa Ligocki, imprescindíveis para a realização deste trabalho, pela acolhida, amizade e principalmente, pela confiança.

À Alessandro Kormam, que primeiramente foi meu professor e que hoje considero como um grande amigo, por me introduzir no ramo da Geotecnia e por sempre me incentivar a “correr atrás” dos meus ideais.

À geógrafa Ana Valéria Freire Allemão Bertolino e ao geólogo Luiz Carlos Bertolino, ambos do Departamento de Geografia da Faculdade de Formação de Professores – UERJ, por disponibilizarem seu tempo para auxiliar em toda a parte de micromorfologia.

Ao geólogo Rubem Porto Jr., do Departamento de Geociências da UFRRJ, pela confecção das lâminas petrográficas e auxílio em toda a parte da petrografia.

À geóloga Joedy Patrícia Cruz Queiroz, doutoranda do Departamento de Metalurgia da PUC-Rio, pela ajuda na descrição das lâminas de solo.

Ao Laboratório de Difractometria de raios-X, do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, em especial ao Ronaldo Silva pela colaboração neste ensaio.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio: “Seu” José, Engenheiro William, Josué e Amaury, por estarem sempre dispostos a ajudar. Em especial às “meninas da micro”: Anna Carolina Magdaleno, Lyana Guerra e Ana Luiza Ramos, pelo esforço e empenho na execução das análises microbiológicas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pelo profissionalismo. Em especial a Rita de Cássia e Ana Roxo.

Aos meus amigos da PUC-Rio, pela ajuda e motivação. Em especial a: Maria Bernadete Lopes, Ana Carolina Campos, Tânia Pessoa, Viviana Torralba, Mônica Moncada e Alexandre Saré.

Um agradecimento especial a Luciana Vieira, Taíse Carvalho, Vinícius Aguiar e Andréa Cynthia, com quem convivi de forma ainda mais intensa nestes dois anos, e a quem tenho um carinho especial. Pela convivência, pelo aprendizado e pela oportunidade de descobrir como podemos ser pessoas melhores.

À Deus pelo dom da vida.

Ao PRONEX-Rio/CNPq/FAPERJ pelo apoio financeiro.

Resumo

Oliveira, Elisangela do Prado; Campos, Tácio Mauro Pereira de; Antunes, Franklin dos Santos; Pessoa, Denise Maria Mano. **Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR.** Rio de Janeiro, 2006. 197p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desde o século passado estuda-se no Brasil a seqüência de camadas resultante da decomposição de uma rocha. Estes perfis de alteração são desde então objetos de estudo de vários autores pela grande importância que apresentam na Engenharia Geotécnica, principalmente em países de clima tropical, como o Brasil. Os diferentes tipos e graus de intemperismo que ocorrem em um perfil de solo residual afetam o comportamento geotécnico dos materiais resultantes. O conhecimento detalhado de sua gênese pode contribuir para um melhor entendimento do seu comportamento geomecânico. A presente dissertação visa contribuir para uma definição de características bio-físico-químico-mineralógicas e microestruturais que possam servir como indicadoras da evolução do grau de intemperismo de um dado perfil de solo residual. Tal tipo de estudo compreende parte de investigações requeridas para o desenvolvimento de um modelo de comportamento de solos residuais onde seja possível incluir efeitos de grau de intemperização. Investigações neste sentido estão sendo efetuadas dentro do projeto PRONEX-Rio intitulado “Geotecnia Aplicada à Avaliação, Prevenção e Remediação de Problemas Ambientais”, em desenvolvimento junto ao Núcleo de Geotecnia Ambiental do DEC/PUC-Rio e que se enquadra na linha de pesquisa Geotecnia Ambiental do Setor de Geotecnia do DEC/PUC-Rio.

Palavras-chave

Perfil de intemperismo; solo residual; granito-gnaiss; propriedades bio-físico-químicas; mineralogia e micromorfologia.

Abstract

Oliveira, Elisangela do Prado; Campos, Tácio Mauro Pereira de; Antunes, Franklin dos Santos; Pessoa, Denise Maria Mano. **Bio-physical-chemical-mineralogical and micromorphological characterization of a granite-gneiss weathering profile from Curitiba, PR.** Rio de Janeiro, 2006. 197p. MSc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Since the last century, the resultant layers sequence of rock decomposition is studied in Brazil. For the great importance that present in Geotechnical Engineering, these alteration profiles are objects of study of some authors, since then, mainly in countries of tropical climate, as Brazil. The different weathering types and degrees that occur in a residual soil profile affect the geotechnical behavior of the resultant materials. The knowledge detailed of its gênesis can contribute for the better agreement of its geomechanical behavior. The present dissertation aims at to contribute for a definition of bio-physical-chemical-mineralogical and micromorphological characterization that can serve as indicating of the evolution of weathering degree of a residual soil profile. This study is a part of required inquiries for development of a residual soil behavior model where it is possible to include effect of weathering degree. This investigation are being effected in the project PRONEX-Rio intituled "Geotechnic Applied to the Evaluation, Prevention and Remediation of Ambient Problems", in development in the Nucleus of Environmental Geotechnic of DEC/PUC-Rio and it is in the research line of Environmental Geotechnic of the Sector DEC/PUC-Rio.

Keywords

Weathering profile, residual soil, granite-gneiss, bio-physical-chemical properties, mineralogy and micromorphology.

Sumário

1	Introdução	24
2	Perfis de intemperismo	27
2.1.	Fatores que influenciam o intemperismo	32
2.2.	Índices de avaliação do grau de intemperismo	33
3	Área de estudo e amostragem	36
3.1.	Meio Físico	36
3.1.1.	Localização	36
3.1.2.	Aspectos climáticos e vegetação	38
3.1.3.	Geologia e geomorfologia	39
3.2.	Amostragem	40
3.2.1.	Localização, coleta e denominação das amostras de solo	40
3.2.2.	Sondagem	44
3.2.3.	Descrição morfológica dos solos	47
3.2.4.	Descrição macroscópica dos testemunhos de sondagem	50
4	Investigações de laboratório	56
4.1.	Caracterização física	64
4.1.1.	Propriedades índice	64
4.1.2.	Porosimetria de mercúrio	65
4.2.	Caracterização química	68
4.2.1.	Análise química total	68
4.2.2.	Análise química parcial	69
4.2.3.	pH e matéria orgânica	70
4.3.	Análises mineralógicas	71
4.3.1.	Observação em lupa binocular	71
4.3.2.	Difração de raios-X	72

4.3.3. Petrografia	73
4.3.4. Micromorfologia dos solos	74
4.4. Análises microbiológicas	75
4.4.1. Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis	78
4.4.2. Atividade microbiana degradadora total	80
4.5. Ensaio de desagregabilidade	81
4.6. Ensaio de cisalhamento direto	82
5 Apresentação e análise dos resultados	87
5.1. Caracterização física	87
5.1.1. Propriedades índice	87
5.1.2. Porosimetria de mercúrio	101
5.2. Caracterização química	106
5.2.1. Análise química total	106
5.2.2. Análise química parcial	110
5.2.3. pH e matéria orgânica	113
5.3. Análises mineralógicas e microestruturais	116
5.3.1. Observação em lupa binocular	116
5.3.2. Difração de raios-X	117
5.3.3. Petrografia	125
5.3.4. Micromorfologia dos solos	138
5.3.5. Evolução microestrutural do perfil	150
5.4. Análises microbiológicas	152
5.5. Ensaio de desagregabilidade	155
5.6. Ensaio de cisalhamento direto	161
6 Discussão dos resultados	170
6.1. Relação entre propriedades físicas e propriedades químicas	170
6.2. Relação entre propriedades físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas	174
6.3. Relação entre propriedade físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas e a resistência ao cisalhamento	177

6.4. Relação entre propriedade físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas e as análises microbiológicas	182
7 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	184
7.1. Conclusões	184
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	187
Referências bibliográficas	188
APÊNDICE I Classificação dos poros	192
I.1. Dimensão dos Poros (Castro, 2002)	192
I.2. Forma dos poros (Castro, 2002)	193
APÊNDICE II Pedalidade	194
II.1. Grau de pedalidade (Castro, 2002)	194
II.2. Forma dos pedes (Castro, 2002)	195
II.3. Textura dos pedes (Castro, 2002)	195
II.4. Distribuição relativa dos pedes (Castro, 2002)	196
ANEXO I Boletim de sondagem	197

Lista de figuras

Figura 2.1 – Perfil de alteração proposto por Deere e Patton (1971)	28
Figura 2.2 - Perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de relevo suave (Pastore, 1995)	29
Figura 2.3 – Perfil de solo proposto na presente dissertação	29
Figura 2.4 – Perfil de intemperismo típico de solo residual segundo Little (1969)	31
Figura 3.1 – Localização do talude estudado	37
Figura 3.2 – Vista geral do talude	37
Figura 3.3 – Talude estudado	38
Figura 3.4 – Mapa geológico da área estudada (COMEC, 1985)	40
Figura 3.5 – Andaime para coleta de amostras de solo	41
Figura 3.6 – Coleta de amostras indeformadas para ensaios de laboratório	42
Figura 3.7 – Poço para coleta de blocos indeformados	43
Figura 3.8 – Perfil estudado dividido em cinco camadas a partir de suas características tátil-visuais	44
Figura 3.9 – Procedimento de sondagem para coleta de amostras de rocha	45
Figura 3.10 – Testemunhos de rocha recuperados	46
Figura 3.11 – Testemunho de rocha obtido a partir da sondagem	46
Figura 3.12 – Solo Marrom	47
Figura 3.13 – Solo Vermelho	48
Figura 3.14 – Solo Laranja	49
Figura 3.15 – Solo Amarelo	49
Figura 3.16 – Solo Branco	50
Figura 3.17 – Testemunho de sondagem R 01	52
Figura 3.18 – Testemunho de sondagem R 02	53
Figura 3.19 – Testemunho de sondagem R 03	54

Figura 3.20 – Testemunho de sondagem R 04	55
Figura 4.1 – Princípio da porosimetria por intrusão de mercúrio	67
Figura 4.2 – Porosizer 9320 Micromeritics	67
Figura 4.3 – Bloco de solo sendo moldado para impregnação	74
Figura 4.4 – Impregnação do bloco e preparação da lâmina	75
Figura 4.5 – Esquema geral da técnica de Pour Plate (Magdaleno, 2005)	79
Figura 4.6 – Técnica de derramamento em profundidade ou Pour Plate	79
Figura 4.7 – Moldagem dos corpos-de-prova a partir das amostras indeformadas retiradas do talude com auxílio do tubo de PVC	81
Figura 4.8 – Prensa Shear Trac II utilizada nos ensaios – LAME/LACTEC – Laboratório de Materiais e Estruturas, Centro Politécnico da UFPR	84
Figura 4.9 – Detalhe da caixa de cisalhamento da Prensa Shear Trac II	85
Figura 5.1 – Curvas granulométricas	94
Figura 5.2 – Propriedades índice ao longo do perfil	96
Figura 5.3 – Atividade dos solos	98
Figura 5.4 – Variação de α_d com o índice de vazios	99
Figura 5.5 – Variação do grau de saturação com o teor de umidade para os 5 diferentes solos com suas respectivas tendências lineares	100
Figura 5.6 – Proposta de uma nova divisão das camadas com base na variação linear do grau de saturação com o teor de umidade	100
Figura 5.7 - Distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros (a) para os solos; (b) para as rochas	101
Figura 5.8 - Distribuição incremental dos diâmetros dos poros (a) para os solos; (b) para as rochas (as faixas de micro, meso e macroporos apresentadas no gráfico se referem a classificação da IUPAC)	104
Figura 5.9 – Variação dos principais índices químicos do perfil estudado ao longo da profundidade	108
Figura 5.10 – Teor de argila x índice de intemperismo ba_1 ao longo do perfil	109

Figura 5.11 – Variação do índice de perda ao fogo ao longo da profundidade	109
Figura 5.12 – Variação da fração fina do solo ao longo da profundidade	110
Figura 5.13 – Variação de K_i e K_r com a profundidade	113
Figura 5.14 – Variação do pH dos solos com a profundidade	115
Figura 5.15 – Variação da porcentagem de matéria orgânica com a profundidade	116
Figura 5.16 - Difratoograma do solo Marrom (fração silte - amostra 2.4108.05) sem tratamento	119
Figura 5.17 – Difratoograma do solo Vermelho (fração argila - amostra 2.4523.05) sem tratamento	119
Figura 5.18 – Difratoograma do solo Laranja (fração silte - amostra 2.4528.05) sem tratamento	120
Figura 5.19 – Difratoograma do solo Amarelo (fração silte - amostra 2.4521.05) sem tratamento	120
Figura 5.20 – Difratoograma do solo Branco (fração silte - amostra 2.4524.05) com tratamento	121
Figura 5.21 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 01) sem tratamento	122
Figura 5.22 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 02) sem tratamento	122
Figura 5.23 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 03) sem tratamento	123
Figura 5.24 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 04) sem tratamento	123
Figura 5.25 – Fotomicrografia da rocha R01. Minerais. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	127
Figura 5.26 - Fotomicrografia da rocha R01. Palagioclásio mais preservado. Aumento de 100 vezes. <i>Luz plana</i>	127
Figura 5.27 – Fotomicrografia da rocha R01. Alteração inter-grãos. Aumento de 100 vezes. <i>Luz plana</i>	128
Figura 5.28 – Fotomicrografia da rocha R01. Alteração inter-grãos. Aumento de 100 vezes. <i>Nicóis cruzados</i>	128

Figura 5.29 - Fotomicrografia da rocha R01. Microclina mais preservada. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	129
Figura 5.30 - Fotomicrografia da rocha R02. Profundidade 24,4m. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	130
Figura 5.31 - Fotomicrografia da rocha R02. Zircão. Aumento de 100 vezes. <i>Luz plana</i>	130
Figura 5.32 - Fotomicrografia da rocha R02. Indicação de alteração hidrotermal, intemperismo atuando de dentro para fora do grão de plagioclásio. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	131
Figura 5.33 - Fotomicrografia da rocha R02. Microclina se alterando por hidrotermalismo. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	131
Figura 5.34 - Fotomicrografia da rocha R02. Plagioclásio mais alterado que a microclina. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	132
Figura 5.35 - Fotomicrografia da rocha R03. É a amostra mais alterada. Aumento de 100 vezes. <i>Luz plana</i>	133
Figura 5.36 - Fotomicrografia da rocha R03. Zircão e feldspatos muito transformados. Grande quantidade de epidoto. Aumento de 100 vezes. <i>Luz plana</i>	133
Figura 5.37 - Fotomicrografia da rocha R03. Titanita. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	134
Figura 5.38 - Fotomicrografia da rocha R04. Biotita dando origem a epidoto e clorita. Aumento de 200 vezes. <i>Luz plana</i>	135
Figura 5.39 - Fotomicrografia da rocha R04. Biotita dando origem a epidoto e clorita. Aumento de 200 vezes. <i>Nicóis cruzados</i>	135
Figura 5.40 - Fotomicrografia da rocha R04. Profundidade 25,8m. Muscovita dentro do plagioclásio e presença de epidoto. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	136
Figura 5.41 – Fotomicrografia do solo Marrom. Macroporo (1mm) em forma de canal. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	140
Figura 5.42 – Fotomicrografia do solo Marrom. Óxidos precipitados. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	141
Figura 5.43 – Fotomicrografia do solo Marrom. Freqüência alta de plasma. Aumento de 50 vezes. <i>Luz plana</i>	141

Figura 5.44 – Fotomicrografia do solo Laranja. Presença de microporos. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	142
Figura 5.45 – Fotomicrografia do solo Laranja. Alta porosidade do solo. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	143
Figura 5.46 – Fotomicrografia do solo Laranja. Pedotúbulo. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	143
Figura 5.47 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Plagioclásio. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	144
Figura 5.48 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Plagioclásio. Aumento de 200 vezes. <i>Luz plana</i>	145
Figura 5.49 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Epidoto. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	145
Figura 5.50 – Fotomicrografia do solo Branco. Quartzo. Aumento de 25 vezes. <i>Nicóis cruzados</i>	146
Figura 5.51 – Fotomicrografia do solo Branco. Mineral se alterando. Aumento de 25 vezes. <i>Nicóis cruzados</i>	147
Figura 5.52 – Fotomicrografia do solo Branco. Porosidade. Aumento de 25 vezes. <i>Luz plana</i>	147
Figura 5.53 – Evolução microestrutural do perfil estudado	151
Figura 5.54 – Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis no meio TSA 10% - valores médios	153
Figura 5.55 - Atividade microbiana degradadora total determinada pelo método do FDA – valores médios	154
Figura 5.56 – Desagregabilidade - corpos-de-prova colocados sobre pedra porosa no início do ensaio por imersão progressiva - água na altura da base	156
Figura 5.57 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 30 minutos - nível d'água a 1/3 da altura total do corpo	156
Figura 5.58 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 45 minutos do início do ensaio - nível d'água a 2/3 da altura total do corpo	156
Figura 5.59 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 60 minutos do início do ensaio - totalmente submersos	157

Figura 5.60 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 24 horas do início do ensaio - totalmente submersos	157
Figura 5.61 – Desagregabilidade - corpos-de-prova logo após a inundação no início do ensaio por imersão total desde o início	158
Figura 5.62 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 15 minutos	158
Figura 5.63 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 30 minutos	158
Figura 5.64 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 45 minutos	159
Figura 5.65 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 1 hora	159
Figura 5.66 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 24 horas	159
Figura 5.67 – Solo Branco: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios	162
Figura 5.68 – Solo Amarelo: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios	163
Figura 5.69 – Solo Laranja: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios	164
Figura 5.70 – Solo Vermelho: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios	165
Figura 5.71 - Solo Marrom: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios	166
Figura 5.72 – Corpo-de-prova após o cisalhamento	167
Figura 5.73 – Envoltória de resistência assumindo como válido o critério de Mohr-Coulomb	167
Figura 5.74 – Ensaio de cisalhamento direto – curvas tensão cisalhante x deslocamento	168
Figura 5.75 – Variação das alturas dos corpos-de-prova ao longo dos ensaios	169

Figura 6.1 – Correlação polinomial entre as frações dos solos e o índice de intemperismo ba_1	171
Figura 6.2 – Correlação hiperbólica entre o pH em água dos solos e rochas e o índice de intemperismo químico ba_1	172
Figura 6.3 – Correlação logarítmica entre o índice de Perda ao fogo dos solos e rochas e o índice de intemperismo químico ba_1	173
Figura 6.4 – Frequência de plasma (%) x Índice de vazios médio	175
Figura 6.5 – Correlação polinomial entre as frações argila e argila+silte e a capacidade de troca catiônica dos solos	176
Figura 6.6 – Porosidade dos solos obtida por diferentes métodos	177
Figura 6.7 – Envoltórias de resistência na forma potencial	178
Figura 6.8 – Correlações lineares entre os parâmetros c' e ϕ' e alguns índices propostos de quantificação do intemperismo	180
Figura 6.9 - Correlações lineares entre os parâmetros a e b e alguns índices propostos de quantificação do intemperismo	181
Figura 6.10 – (a) Atividade microbiana degradadora total (FDA); (b) Teor de matéria orgânica – valores médios	183

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Ensaio realizados	57
Tabela 4.2 – Resumo do programa de ensaios de cisalhamento direto	83
Tabela 4.3 – Dados dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto	86
Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física	88
Tabela 5.2 – Valores médios dos ensaios de caracterização física	93
Tabela 5.3 - Índices físicos médios obtidos por correlação	93
Tabela 5.4 – Porosidade por injeção de mercúrio	102
Tabela 5.5 – Classificação dos espaços porosos.	103
Tabela 5.6 - Distribuição de poros em porcentagem	105
Tabela 5.7 – Análise química total por fluorescência de raios-X	107
Tabela 5.8 – Análise química parcial – complexo sortivo e ataque sulfúrico	1
Tabela 5.9 – pH e matéria orgânica	114
Tabela 5.10 – Caracterização mineralógica do material retido na peneira n° 200 (frações pedregulho e areia)	117
Tabela 5.11 – Minerais identificados por difratometria de raios-X	124
Tabela 5.12 – Descrição petrográfica das lâminas de rocha	137
Tabela 5.13 – Resumo da descrição micromorfológica	149
Tabela 5.14 - Microrganismos viáveis e cultiváveis no meio TSA 10%	152
Tabela 5.15 – Atividade microbiana degradadora total	154
Tabela 5.16 – Resumo dos ensaios de cisalhamento direto	168
Tabela 6.1 – Correlações físico químicas propostas	173
Tabela 6.2 – Porcentagem de plasma observada na microscopia óptica, porcentagem de fração fina obtida nos ensaios granulométricos e índice de vazios médio dos solos	174
Tabela 6.3 - Valores médios de capacidade de troca catiônica para cada solo	175

Tabela 6.4 – Porosidade dos solos obtida por diferentes métodos	176
Tabela 6.5 – Equações potenciais propostas para os ensaios de cisalhamento direto	179
Tabela 6.6 – Resumo dos parâmetros dos ensaios de cisalhamento direto	179
Tabela 6.7 – Comparação entre os coeficientes de correlação (R^2)	180

Lista de símbolos e abreviações

= diâmetro da abertura da malha da peneira

% = porcentagem

° = graus

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al = alumínio

Al^{+3} = cátion de Alumínio

ASTM = American Society for Testing and Materials

ba_1 = índice de intemperismo químico

c', ϕ' = parâmetros efetivos de resistência no cisalhamento direto

Ca^{+2} = cátion de cálcio

CNPS = Centro Nacional de Pesquisa de Solos

CTC = capacidade de troca catiônica

DCMM = Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia

DEC = Departamento de Engenharia Civil

e = índice de vazios

e_m = índice de vazios médio

EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisas Agrárias

FDA = Diacetato de Fluoresceína

F.f. = Fração fina do solo (argila + silte)

Gs = densidade relativa dos grãos

H^+ = cátion de hidrogênio

h = hora

Hg = mercúrio

Ia = índice de atividade de Skempton

IP = índice de Plasticidade

K^+ = cátion de potássio

kg = quilograma

km = quilômetro

kPa = kilopascal

L = litro

LL = limite de liquidez

log = logaritmo

LP = limite de plasticidade;

m= metro

Mg^{+2} = cátion de magnésio

mL= mililitro

mm= milímetro

n = porosidade

P.F. = índice de perda ao fogo

pH = potencial de hidrogenização

S = grau de saturação

s = segundo

T = capacidade de troca catiônica

TSA = *Tryptone Soya Agar*

UFC = Unidade Formadora de Colônia

w_{nat} = umidade natural

β = parâmetro de quantificação do intemperismo químico

δh = deslocamento horizontal

δv = deslocamento vertical

γ = peso específico

γ_d = peso específico seco

γ_n = peso específico natural

γ_w = peso específico da água

θ = teor de umidade volumétrico

ρ_s = massa específica dos grãos de solo

ρ_w = densidade da água

σ = tensão normal

τ = tensão cisalhante

“Apliquei-me a conhecer a sabedoria e a considerar a fadiga que se realiza sobre a terra, pois o homem não conhece repouso, nem de dia, nem de noite. Observei o conjunto da obra de Deus e percebi que o homem não consegue descobrir tudo o que acontece debaixo do sol. Por mais que o homem se afadigue em pesquisar, não chega a compreendê-la. E mesmo que o sábio diga que a conhece, nem por isso é capaz de entendê-la.”

1 Introdução

No Brasil, o clima tropical, quente e úmido, favorece a formação de solos *in situ*, os chamados solos residuais, responsáveis pela cobertura de grandes áreas do país. Tal tipo de solo se diferencia daqueles predominantes ou estudados em zonas temperadas ou frias, principalmente por serem potencialmente mais susceptíveis, em sua formação e desenvolvimento, a processos de intemperismo bio-físico-químicos.

A base da Mecânica dos Solos utilizada na prática da Engenharia Geotécnica advém, hoje, de conhecimentos oriundos de observações sobre o comportamento de solos sedimentares. Assim, é natural que a caracterização e classificação de solos, presentemente utilizada na prática da engenharia geotécnica, se baseiem em informações relevantes a tal tipo de solo. Tais informações não são, entretanto, necessariamente relevantes no contexto de solos residuais onde, dentre outros aspectos, o tipo de rocha de origem pode constituir fator importante em uma previsão do comportamento de engenharia do solo formado *in situ*. Mais ainda, é previsível que o grau de intemperismo destes solos deve afetar seu comportamento de engenharia.

Assim, a presente dissertação visa contribuir para uma definição de características bio-físico-químico-mineralógicas e microestruturais que possam servir como indicadores da evolução do grau de intemperismo de um dado perfil de solo residual. Tal tipo de estudo compreende parte de investigações requeridas para o desenvolvimento de um modelo de comportamento de solos residuais onde seja possível incluir efeitos de grau de intemperização. Investigações neste sentido estão sendo efetuadas dentro do projeto PRONEX-Rio intitulado “Geotecnia Aplicada à Avaliação, Prevenção e Remediação de Problemas Ambientais”, em desenvolvimento junto ao Núcleo de Geotecnia Ambiental do DEC/PUC-Rio e que se enquadra na linha de pesquisa Geotecnia Ambiental do Setor de Geotecnia do DEC/PUC-Rio.

No presente trabalho são descritos estudos de laboratório para caracterizar o grau de intemperismo de um perfil de solo residual de granito-gnaiss a partir de sua microestrutura, propriedades físicas, químicas, microbiológicas e mineralógicas, bem como de observações de campo, especialmente das feições

reliquiaries. Procura-se, também, correlacionar os dados obtidos com a resistência ao cisalhamento dos solos, medida através do ensaio de cisalhamento direto.

O trabalho se inicia com uma abordagem sucinta dos diversos tipos de intemperismo, dos índices usados para quantificá-los e dos fatores que afetam a ocorrência destes em maior ou menor grau (Capítulo 2).

No Capítulo 3 são reunidos e discutidos os dados existentes sobre o meio em que se encontra o solo estudado, relativos à localização, clima, vegetação, geologia e geomorfologia. Ênfase é dada ao papel que o clima da região e a estrutura do solo residual podem exercer no seu comportamento. Ainda no Capítulo 3 são apresentadas as técnicas de amostragem utilizadas tanto na obtenção de solo quanto de rocha do talude estudado. Também é apresentada uma descrição de todo o perfil, a qual possibilitou dividi-lo em camadas para simplificar o entendimento das variações das diversas propriedades estudadas ao longo do mesmo. A área está localizada no município de Campo Magro, próxima à divisa com o município de Curitiba, PR, saindo pelo bairro de Santa Felicidade.

Contempla-se no Capítulo 4 todas as técnicas de ensaios de laboratório que foram realizados no material do talude. No programa de ensaios de laboratório, a composição e a estrutura do solo são analisadas com técnicas de difratometria de raios-X, microscopia óptica, análise química total por fluorescência e análise química por ataque sulfúrico. Ensaio de caracterização geotécnica convencionais permitem delinear as propriedades índice dos solos, ao longo da profundidade do perfil. Outras características físicas do solo são obtidas a partir de correlações. Também são apresentadas as metodologias dos ensaios de cisalhamento direto, desagregabilidade e porosimetria de mercúrio bem como as metodologias utilizadas para avaliação de algumas propriedades microbiológicas dos solos estudados.

No Capítulo 5, as informações obtidas experimentalmente são apresentadas, analisadas e discutidas.

Já no Capítulo 6, o trabalho correlaciona os dados obtidos entre si, em particular considerando efeitos do intemperismo químico, comportamento físico, mineralógico e microestrutural dos materiais, bem como a resistência ao cisalhamento dos diferentes materiais do perfil estudado.

No Capítulo 7 são incluídas as principais conclusões, que permitem avançar no entendimento de alguns aspectos do comportamento físico, químico,

microestrutural e microbiológico do tipo de solo estudado em relação ao grau de intemperismo do perfil de alteração considerado.

Finalizando, o trabalho conduzido evidencia a necessidade da continuidade das pesquisas, abrindo-se uma ampla gama de possibilidades para novos estudos.

Deve-se destacar aqui que, devido à diversidade e quantidade de ensaios implementados na presente dissertação, optou-se por não procurar comparar de forma sistemática os resultados aqui obtidos com outros eventualmente disponíveis na literatura corrente. Também, não se procurou comparar de forma sistemática todos os dados obtidos, optando-se por efetuar comparações apenas entre aqueles que, se espera, propiciem melhores correlações. Assim sendo, conclusões adicionais às aqui apresentadas podem advir de posteriores análises dos dados obtidos.

2 Perfis de intemperismo

As rochas, quando expostas na superfície da Terra estão sujeitas à ação de processos naturais de aquecimento e resfriamento, decorrentes da alternância de dias e noites e da ação das águas, que se infiltram a partir das chuvas e percolam, tipicamente, através de fissuras ou fraturas nos materiais existentes. A estes processos, de ordem química, física ou biológica, que desintegram e/ou decompõem a rocha, dá-se o nome de intemperismo.

A ação do intemperismo sobre as rochas é gradual. Assim, as rochas não se decompõem ou se desintegram instantaneamente, em geral requerem um período de tempo relativamente longo para sofrerem alteração, variável em função do tipo de rocha e das condições climáticas locais. Dessa forma, as rochas podem se apresentar em diferentes estágios de alteração, também chamados de graus ou classes de alteração.

A formação do solo ocorre quando o intemperismo, além de provocar alterações químicas na rocha, começa a modificar sua microestrutura, de forma gradual, promovendo uma importante reorganização dos minerais neoformados. O intemperismo leva à formação de um perfil de solo.

Entende-se por perfil de solo a seção de um terreno constituída por uma seqüência de camadas distintas por suas características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas, biológicas e microestruturais. Para a Geotecnia, a camada superficial recebe o nome de solo maduro e a camada subsuperficial é denominada solo residual jovem ou solo saprolítico. Na seqüência encontra-se a camada de rocha alterada ou saprolito e, abaixo, a rocha sã.

Solos residuais jovens são materiais complexos e heterogêneos especialmente quando desenvolvidos de rochas metamórficas. Suas propriedades de engenharia são influenciadas à medida que o intemperismo evolui até a formação de uma nova microestrutura, dando origem ao solo residual maduro. Os solos residuais jovens vão desde aqueles que guardam características reliquias da rocha matriz e a maioria dos minerais primários ou parte significativa deles passando por aqueles em que o material já não guarda mais a estrutura da rocha mãe, no entanto mantém parte dos minerais primários intemperizados, contém quantidade significativa de argilominerais 2:1 e já

contém argilominerais 1:1. Já os solos residuais maduros praticamente não possuem minerais primários, a exceção de minerais muito resistentes ao intemperismo, como é o caso do quartzo; os minerais 2:1 já foram em sua totalidade transformados e parte significativa dos argilominerais 1:1 já se transformaram em óxidos e hidróxidos Segundo Camapum de Carvalho (2004), entre outros, estes solos são de difícil distinção dos solos transportados neste mesmo estágio de intemperização.

No campo da engenharia geotécnica existe uma grande diversidade de terminologias usadas para descrever e classificar os vários componentes de um perfil de intemperismo, sendo que os termos solo residual e solo saprolítico são algumas vezes mal empregados. Muitos autores propuseram sua própria terminologia para designar as diferentes camadas de um perfil de alteração. Irfan (1988) emprega o termo solo residual restritamente à camada superior do perfil de intemperismo, a qual não apresenta mais a estrutura da rocha matriz. Para o autor, o termo saprolito é usado como um termo geral para descrever a porção do perfil de intemperismo que conserva a estrutura da rocha original, mas que pode ser considerada um solo em termos de resistência e consistência. Deere e Patton (1971) propõem uma terminologia para perfis de alteração que tem sido muito utilizada (Figura 2.1).

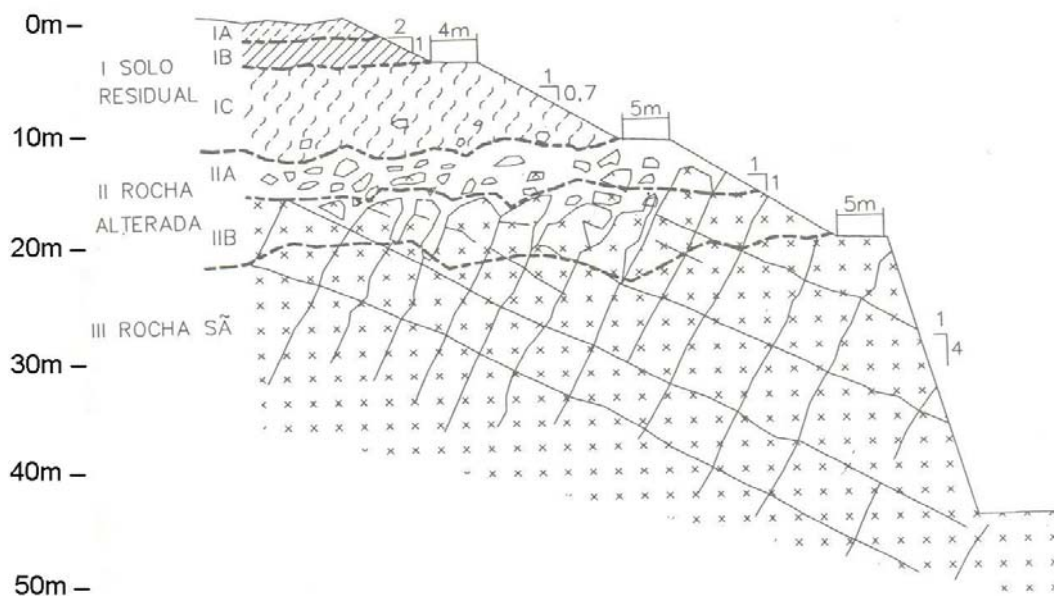


Figura 2.1 – Perfil de alteração proposto por Deere e Patton (1971)

Pastore (1995) propôs uma padronização da terminologia para descrição de perfis de alteração baseada, sobretudo, na análise das várias proposições existentes sobre o assunto e nos conceitos adotados em 1985 pelo Comitê de Solos Tropicais da ISSMGE. Esta proposição caracteriza sete horizontes num

perfil de alteração completo. A Figura 2.2 apresenta o perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de relevo suave proposto por Pastore (1995). O perfil de solo estudado no presente trabalho assemelha-se a este perfil e, portanto, se enquadra neste grupo.

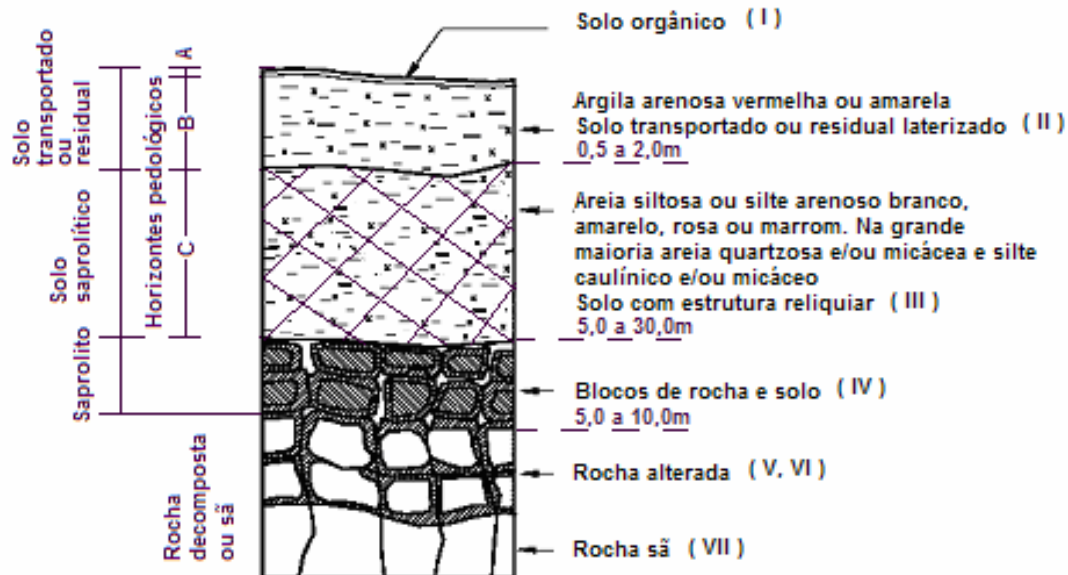


Figura 2.2 - Perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de relevo suave (Pastore, 1995)

O perfil estudado nesta dissertação foi dividido em cinco níveis distintos de alteração a partir de suas características morfológicas. Propõe-se neste trabalho o perfil da Figura 2.3. Foram estudadas apenas as camadas de solo residual jovem e rocha alterada deste perfil.

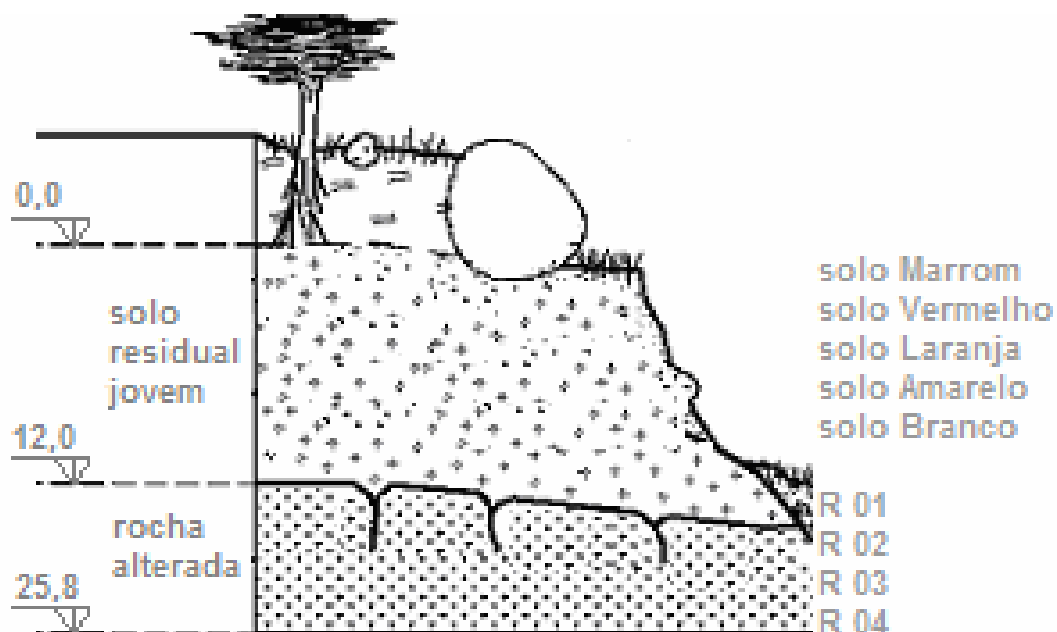


Figura 2.3 – Perfil de solo proposto na presente dissertação

Solos residuais formados a partir do intemperismo de rochas em ambientes tipicamente tropicais e subtropicais apresentam problemas na engenharia geotécnica devido a sua complexidade e heterogeneidade. Caracterizar e ensaiar estes solos é, conseqüentemente, difícil. Muitos dos métodos convencionais da Mecânica dos Solos e das correlações desenvolvidas para solos transportados em climas temperados não se aplicam a estes solos (e.g. Vaughan *et al.*, 1988). O comportamento de solos residuais jovens parece ser dominado pela microestrutura do solo, a qual está relacionada com a estrutura original da rocha e com a história do intemperismo.

Os solos transportados são comumente classificados por sua plasticidade e graduação o que resulta em boas correlações com suas propriedades geotécnicas. Isto não se aplica aos solos saprolíticos ou residuais jovens pela dificuldade que se tem em determinar o exato tamanho dos grãos nestes solos de estrutura reticulada e fracas ligações, ambas as características herdadas de sua rocha matriz ou geradas durante os processos de intemperismo. (e.g. Sueoka, 1989)

Alguns estudos de perfis de intemperismo desenvolvidos a partir de rochas gnáissicas já foram realizados no Rio de Janeiro tanto no Departamento de Geologia da UFRJ quanto no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Na década de 80, muitos estudos de caracterização geotécnica de perfis de intemperismo provenientes de gnaisses, inclusive envolvendo análises químicas e mineralógicas, foram desenvolvidos. Dentre eles cabe citar Brito (1981), Falcão (1984), Sertã (1986) e, já na década de 90, Munechica (1992), Menezes Filho (1993), Barroso (1993) e Polivanov (1998).

Rahardjo *et al.* (2004) estudaram solos residuais originados das duas maiores formações geológicas de Singapura. Os resultados mostraram que a variação nas propriedades índice, propriedades de engenharia e nas características microestruturais de solos residuais ao longo da profundidade pode ser correlacionada com o grau de intemperismo. O grau de intemperismo foi definido a partir das características morfológicas do solo e classificado segundo a proposta de Little (1969) mostrada na Figura 2.4 Um aumento no grau de alteração correspondeu a um aumento na quantidade de poros e a uma maior variedade no tamanho dos poros. Ainda segundo eles, a variação no volume dos poros e a distribuição do tamanho dos poros ao longo de um perfil de rocha intemperizada podem ser usadas como uma medida indicativa da variação do grau de intemperismo com a profundidade.

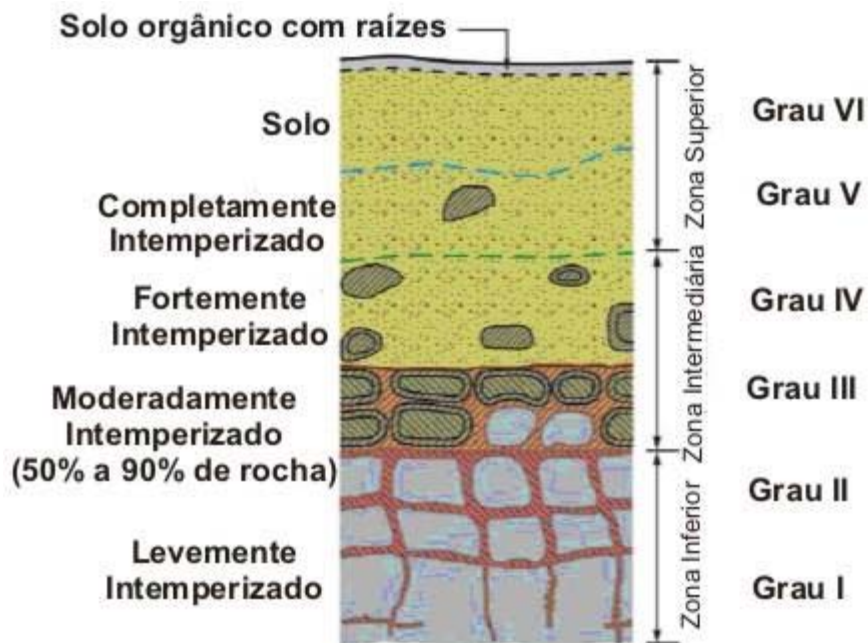


Figura 2.4 – Perfil de intemperismo típico de solo residual segundo Little (1969)

Rocha Filho *et al.* (1985) estudaram um perfil formado basicamente por quartzo e feldspato em diversos graus de alteração. A fração fina constituía-se basicamente de biotita e feldspato fortemente alterados. Observações de campo mostraram uma heterogeneidade do perfil, associada a descontinuidades litológicas e mineralógicas. Era esperado que estas descontinuidades, juntamente com o tipo e o grau de intemperismo diferencial, pudessem influenciar fortemente as propriedades mecânicas do solo. Assim, procuraram correlacionar o grau de intemperismo diretamente com as propriedades de engenharia. Para isto, fizeram uma revisão crítica e comparativa do uso de índices de intemperismo físico e químico na avaliação do grau de decomposição de solos residuais e tentaram correlacionar estes índices com as propriedades geotécnicas de um solo residual jovem de gnaiss. Correlações entre as propriedades mecânicas e fatores de lixiviação foram estabelecidas mostrando a influência qualitativa do grau de intemperismo nestes parâmetros.

Os autores mostraram que os índices mineralógicos de intemperismo, largamente empregados com sucesso para quantificar o grau de alteração de solos residuais de rochas graníticas (perfis de solo homogêneos), não podem ser usados com o mesmo grau de confiança para solos residuais resultantes da decomposição de rochas gnáissicas (perfis de solo heterogêneos). Já os índices de intemperismo químico, baseados no grau de lixiviação dos minerais, podem ser usados para indicar a influência qualitativa do grau de intemperismo nas propriedades de engenharia de um solo residual jovem de gnaiss.

Brito (1981) realizou análises químicas e mineralógicas em amostras tomadas de diferentes profundidades ao longo de um perfil. O perfil estudado era formado pela decomposição de uma rocha metamórfica, classificada como gnaiss migmatítico, cujos minerais primários eram: quartzo, feldspato potássico, feldspato calco-sódico e biotita. Os minerais secundários que compunham o perfil eram: epidoto, zircão, muscovita, turmalina e garnierita.

2.1. Fatores que influenciam o intemperismo

Os processos intempéricos modificam as propriedades físicas das rochas, tais como estrutura, resistência e textura, por mecanismos de desagregação bem como suas propriedades químicas como composição e microestrutura por mecanismos de decomposição. Em função do tipo de mecanismo são normalmente classificados em intemperismo físico e intemperismo químico. Pode ocorrer também no processo de alteração das rochas a ação de organismos vivos ou da matéria orgânica proveniente de sua decomposição. Nestes casos o intemperismo é chamado biofísico ou bioquímico (Teixeira *et al.*, 2000).

O clima exerce uma influência profunda no intemperismo, especialmente a umidade relativa, a precipitação e a temperatura. A velocidade com que as reações químicas ocorrem praticamente se duplica com um aumento de apenas 10°C na temperatura.

Climas quentes e úmidos favorecem as reações químicas e, conseqüentemente, os processos de intemperismo químico. Por esta razão, em regiões de clima tropical os processos de formação dos solos são diferenciados evidenciados pela grande espessura de solos residuais, em condições favoráveis de relevo, em contraste com as regiões de climas temperados, onde esses solos são pouco espessos.

Não apenas o clima controla a ação do intemperismo, mas também fatores como o relevo, a fauna e a flora, características da rocha parental e o tempo de exposição da rocha aos agentes intempéricos. Dessa forma, embora o perfil estudado nesta dissertação encontre-se em região de clima subtropical, com temperatura média do mês quente inferior a 22 °C e pluviosidade maior que 1000 mm anuais, ele é um perfil espesso e bem desenvolvido.

A principal contribuição da rocha matriz é a definição da composição mineralógica do solo resultante. Como essa composição é determinante para a

granulometria, para a plasticidade e para o tipo de argilomineral presente no solo, a rocha de origem define grande parte do comportamento geomecânico dos solos residuais. Num mesmo clima úmido e numa mesma topografia a espessura dos solos, que residem sobre a rocha que lhes deu origem por decomposição, é variável com o tipo de rocha. A resistência à decomposição dos minerais é um fator determinante da espessura dos solos residuais.

Descontinuidades litológicas e mineralógicas na rocha mãe são transferidas para o solo residual durante o processo de intemperismo. Estas descontinuidades irão impor à rocha sã um intemperismo diferencial que será dependente da trajetória da descontinuidade. Portanto, o processo de intemperização não implica, necessariamente, que o grau de intemperismo varie somente com a profundidade, mas também será função das fraturas herdadas da rocha matriz, podendo ocorrer lateralmente. Desse modo, espera-se que as propriedades de engenharia de um solo residual jovem estejam fortemente relacionadas ao tipo e grau de intemperismo ao qual foi submetido o perfil de solo.

2.2. Índices de avaliação do grau de intemperismo

Existem muitas tentativas de quantificar o grau de intemperismo através de métodos químicos, petrográficos, difração de raios-X e microscopia eletrônica, ou a partir de índices físicos. Muitos índices intempéricos têm sido propostos para quantificar o grau de intemperismo, mas pouca atenção se tem dado a correlacioná-los com as propriedades de engenharia.

Os índices químicos são relativamente precisos para obtenção do grau de alteração química. Entretanto as propriedades geotécnicas dos solos saprolíticos são também dependentes da estrutura de sua rocha matriz.

Com base no princípio de que os elementos químicos provenientes da decomposição dos minerais são removidos de forma diferencial, algumas relações moleculares, conhecidas como índices de intemperismo químicos, são estabelecidas entre os diversos elementos presentes nos solos e rochas para quantificar o grau de intemperismo de cada um deles. Estas relações foram propostas considerando-se a diferença na solubilidade e na mobilidade dos diversos componentes químicos do solo no ambiente em que se encontram.

A seguir são apresentados alguns dos índices químicos encontrados na literatura.

Harrassowitz (1926) citado por Vieira (1975), Moníz (1972) e Falcão (1984) propôs os índices K_i e K_r , que consideram a quantidade de sílica total.

$$K_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (I)$$

$$K_r = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)} \quad (II)$$

Também foi Harrassowitz (1926) quem propôs os índices ba , ba_1 , ba_2 , e K .

$$ba = \frac{(K_2O + Na_2O + CaO)}{Al_2O_3} \quad (III)$$

$$ba_1 = \frac{(K_2O + Na_2O)}{Al_2O_3} \quad (IV)$$

$$ba_2 = \frac{(CaO + MgO)}{Al_2O_3} \quad (V)$$

$$K = \frac{K_{i_{rocha_alterada}}}{K_{i_{rocha_sã}}} \quad (VI)$$

Jenny (1941) apud Brito (1984) propôs o índice de lixiviação β .

$$\beta = \frac{ba_{1_{rocha_alterada}}}{ba_{1_{rocha_sã}}} \quad (VII)$$

De acordo com Falcão (1984), os índices que consideram a quantidade de sílica total, se usados para avaliar o grau de intemperismo de rocha ácidas não fornecem bons resultados. Isso se deve ao fato de que com a evolução do intemperismo a sílica se concentra também sob a forma de quartzo, provocando um aumento nestes índices, quando na realidade eles são máximos no material de origem. Para a autora, o índice que melhor definiu a evolução e o intemperismo diferencial do perfil por ela estudado foi o fator de lixiviação β .

Para efeitos de correlações nesta dissertação, o índice de intemperismo utilizado foi o ba_1 (Equação IV). Isto porque o perfil de solo em questão provém de rochas ácidas e, portanto, suas quantidades de potássio e sódio são mais representativas que os teores de cálcio e magnésio. Além disso, o fator de lixiviação β (Equação VII) não pôde ser usado tendo em vista que, como será mencionado no Capítulo 3 não foi possível coletar amostras de rocha sã.

Com a análise mineralógica é possível estudar a gênese e a evolução do solo através das mudanças nos teores dos diversos minerais com a profundidade, uma vez que os constituintes minerais das rochas não se

decompõem com a mesma intensidade por apresentarem diferentes graus de estabilidade. Por esta razão é possível a obtenção de índices de intemperismo dos solos com base na relação entre os minerais primários remanescentes e de neoformação presentes nas diversas frações granulométricas dos solos.

Ruhe (1956) apud Falcão (1984) propõe os índices Wr_h e Wr_l (Equações VIII e IX) baseados na estimativa das espécies minerais presentes na fração areia fina.

$$Wr_h = \frac{(zircão + turmalina)}{(piroxênio + anfibólio)} \quad (VIII)$$

$$Wr_l = \frac{quartzo}{feldspato} \quad (IX)$$

Este índice é passível de crítica, pois se baseia em minerais que podem ou não existir no perfil de solo.

Os índices mineralógicos têm limitações quando citam um mineral instável como elemento de referência. Além disso, devem ser escolhidos em função do tipo de rocha e clima da região e são utilizados para avaliar, dentro de uma mesma formação, o grau de alterabilidade do solo, não devendo ser aplicados como referências comparativas entre duas formações distintas (e.g. Falcão, 1984).

Não foram encontradas na literatura referências sobre índices biológicos ou microbiológicos capazes de avaliar o grau de intemperismo de qualquer tipo de solo.

3 **Área de estudo e amostragem**

3.1. **Meio Físico**

Os aspectos discutidos no Capítulo 2 tornam clara a importância de um estudo experimental de um perfil de solo residual observando a evolução das diversas propriedades ao longo da profundidade e conseqüente variação do grau de intemperismo.

3.1.1. **Localização**

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi escolhido um perfil de solo residual jovem de aproximadamente 12 metros. O perfil se originou de uma rocha granito-gnáissica da qual foram extraídas amostras com vários níveis de alteração. A área em estudo está localizada no município paranaense de Campo Magro, próxima da divisa com Curitiba. A malha rodoviária local apresenta boas estradas e o acesso ao talude estudado é feito através da Avenida Manoel Ribas, principal rua do bairro Santa Felicidade em Curitiba.

O perfil escolhido encontra-se dentro de uma fábrica de embalagens, o que garantiu a segurança nos trabalhos desenvolvidos em campo. A Figura 3.1 mostra a implantação da Com Kraf – Embalagens e a localização do talude. A região da fábrica é plana.

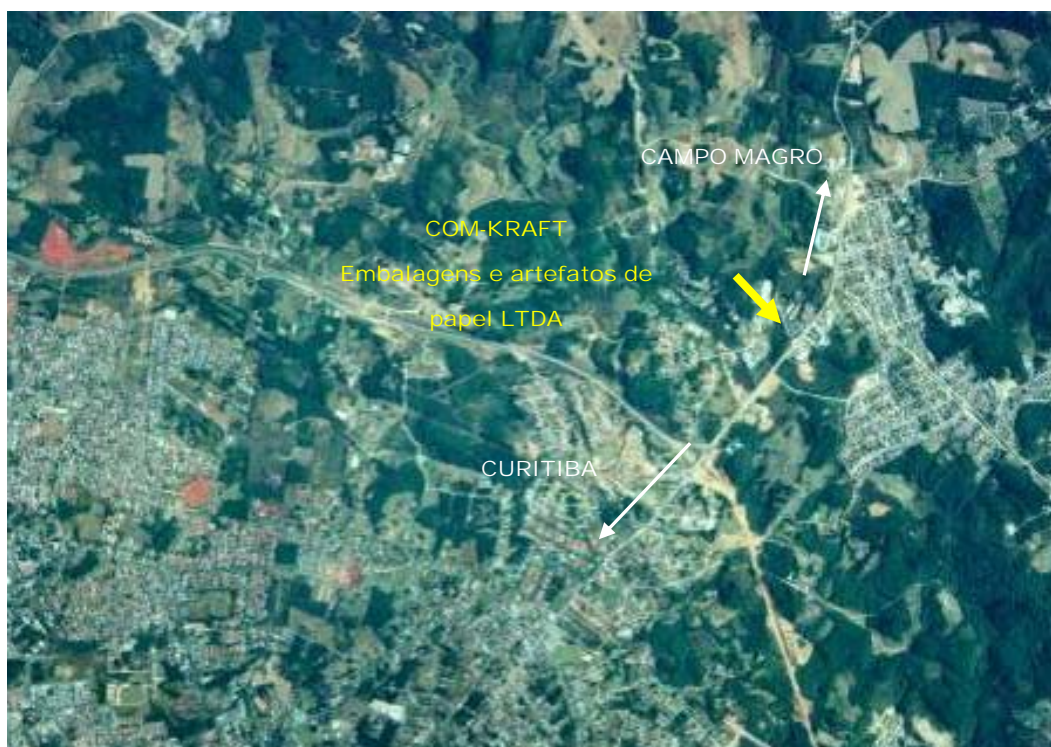


Figura 3.1 – Localização do talude estudado

A Figura 3.2 apresenta uma vista superior da área da fábrica e, a Figura 3.3, mostra o perfil estudado.



Figura 3.2 – Vista geral do talude



Figura 3.3 – Talude estudado

Observações de campo mostraram duas descontinuidades principais (fraturas herdadas) no perfil. A primeira tem direção de 30°NE e mergulho de 88° na direção da formação enquanto, a segunda, possui uma direção de 330°NE e mergulho 72° na direção oposta à formação.

Conforme será discutido adiante, o perfil de intemperismo apresenta camadas com distintos graus de alteração.

3.1.2. Aspectos climáticos e vegetação

O clima da área estudada, pelo sistema de Köppen, é do tipo Cfb, descrito como caracteristicamente úmido, sem estação seca. A temperatura média do mês quente é inferior a 22°C . São esperadas mais de dez geadas noturnas anuais. A pluviosidade não segue gradientes bem definidos, mas sempre atinge mais de 1000 mm anuais (Maack, 1968).

Segundo Maack (1968), na região específica de Campo Magro, tem-se uma zona de culturas, onde se dá o completo desaparecimento das associações florísticas naturais do mato e do campo. Corresponde à zona de cultura de Curitiba, onde podem se desenvolver também áreas de pastagens.

3.1.3. Geologia e geomorfologia

Segundo Batolla Jr *et al.* (1977) na área da folha Curitiba aflora uma gama variada de rochas sendo bem representadas as de natureza metamórfica.

A área estudada, segundo Maack (1947), está toda enquadrada na unidade geomorfológica denominada Primeiro Planalto Paranaense.

O Primeiro Planalto Paranaense situa-se entre a Serra do Mar e a Escarpa Devoniana formada por sedimentos da Bacia do Paraná a oeste. Dentro deste planalto identificam-se alguns compartimentos paisagísticos formados em função de existirem conjuntos litológicos distintos que respondem diferentemente aos agentes modeladores do relevo. Assim, cada um destes conjuntos pode ser descrito separadamente.

A região de Campo Magro, mais especificamente o perfil em questão, encontra-se no domínio das rochas do complexo Gnáissico-Migmatítico (Figura 3.4).

Segundo o mapa geológico da Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba COMEC, o Complexo Gnáissico Migmatítico engloba migmatitos bandados, com paleossoma de gnaisses anfíbolíticos, metamáficas (magnesianas) metaultramáficas; neossoma de composição quartzo-feldspática em bandas ou injeções pegmatóides.

Neste domínio o relevo é dissecado e formado por inúmeros morros subarredondados que denotam uma grande uniformidade para a área de ocorrência. Praticamente não existe o relevo de cristas. Os divisores de água, ou interflúvios, são de pequenas dimensões, pois se apresentam muito recortados embora menos dissecados do que as rochas graníticas. Os vales são relativamente profundos, mas não têm qualquer orientação preferencial. A ação da tectônica rígida na modelagem do relevo resume-se ao aprisionamento de alguns cursos d'água em linhas de falhas e fraturas. A drenagem exhibe um padrão nitidamente dentrítico (Batolla Jr *et al.* 1977).

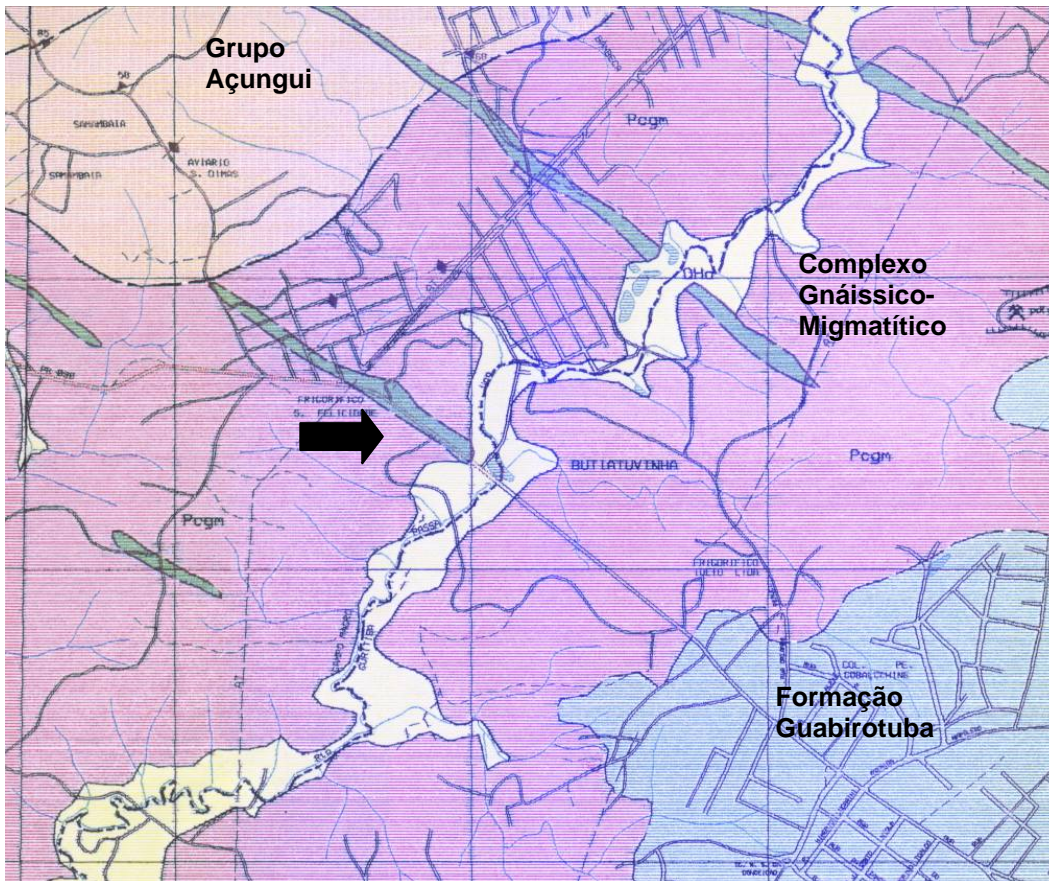


Figura 3.4 – Mapa geológico da área estudada (COMEC, 1985)

3.2. Amostragem

Ao longo de todo o talude que constitui o perfil, cuja altura varia de 6 a 12 metros e cuja extensão é de aproximadamente 50 metros, escolheu-se uma vertical para realização dos trabalhos. Na vertical escolhida, com altura de 12 metros, o perfil foi dividido em cinco camadas com base em suas características morfológicas para a amostragem. Na base do perfil executou-se uma sondagem rotativa que perfurou 13,8 metros para coleta de amostras de rocha. No topo do talude, foi aberto um poço de 4 metros de profundidade.

3.2.1. Localização, coleta e denominação das amostras de solo

Após a limpeza da vertical escolhida, recolheram-se amostras de solo indeformadas e deformadas.

Os trabalhos desenvolvidos podem ser divididos em dois grupos:

- Montagem de um andaime de 10 metros à frente da faixa escolhida para realização das coletas,
- Abertura de um poço de 4 metros de profundidade no topo do perfil para a retirada de blocos indeformados.

Com o auxílio do andaime (Figura 3.5) foram coletados blocos indeformados utilizando-se tubos de PVC de diâmetro igual a 20 centímetros e altura igual a 10 centímetros, em cinco diferentes profundidades. As amostras foram coletadas na posição vertical ao longo do perfil (Figura 3.6). Foram também coletadas amostras deformadas nas cinco diferentes profundidades.



Figura 3.5 – Andaime para coleta de amostras de solo



Figura 3.6 – Coleta de amostras indeformadas para ensaios de laboratório

A abertura de um poço pôde, além de atender à finalidade de prover material para ensaios de laboratório, que serão descritos no Capítulo 4, proporcionar uma ótima oportunidade para a observação direta das feições morfológicas do perfil.

A escavação do poço foi manual e se deu no mês de agosto de 2005. Primeiramente foram escavados 2 metros e retirados dois blocos. Na seqüência, foram escavados mais 2 metros e retirados outros dois blocos (Figura 3.7). O trabalho manual durou quatro dias consecutivos. No terceiro destes dias ocorreu uma precipitação que pode ter alterado a umidade dos últimos blocos.



Figura 3.7 – Poço para coleta de blocos indeformados

A divisão em cinco camadas foi baseada em algumas características morfológicas tátil-visuais tais como cor, foliações, fraturas, textura, estrutura, heterogeneidades mineralógicas, espessura das camadas e feições reliquias. A Figura 3.8 mostra os locais de coleta das amostras ao longo do perfil e as denominações que receberam para efeito de análise. Cabe ressaltar que todo o período de coletas foi muitas vezes interrompido por chuvas, o que levava o material da camada superior a colorir todo o talude com seu tom avermelhado. Isso obrigava uma nova limpeza do perfil cada vez que se reiniciavam os trabalhos de coleta.

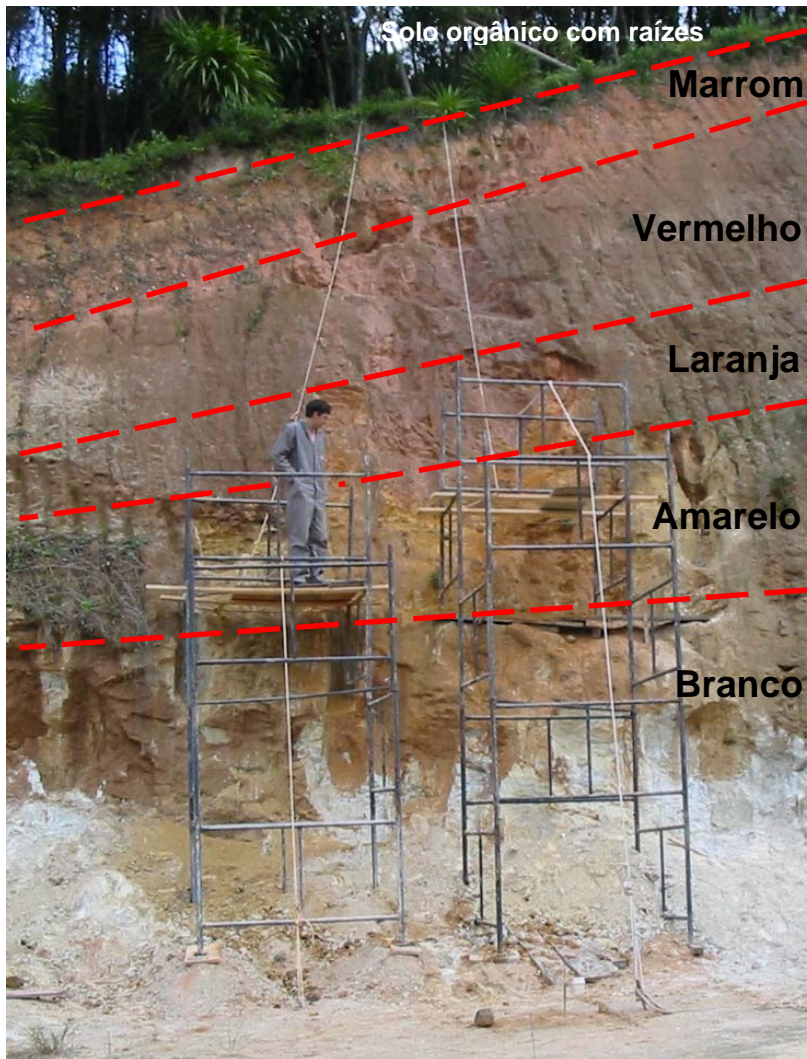


Figura 3.8 – Perfil estudado dividido em cinco camadas a partir de suas características tátil-visuais

3.2.2. Sondagem

Como método direto de investigação e também com a finalidade de coletar amostras de rocha do perfil foi realizada uma sondagem mista na base do talude estudado (Figura 3.9). As sondagens mistas são aquelas executadas à percussão na porção do terreno penetrável por este processo e por meio de sonda rotativa nos materiais impenetráveis pelo método percussivo. No caso deste trabalho a sondagem foi executada à percussão nos níveis de solo e por sondagem rotativa na rocha.



Figura 3.9 – Procedimento de sondagem para coleta de amostras de rocha

A sondagem rotativa executada utilizou coroa diamantada de diâmetro Ax (diâmetro interno de 34,9 mm). As amostras recuperadas se apresentaram muito fraturadas. O objetivo inicial da sondagem era retirar testemunhos de rocha de diferentes profundidades até se atingir a rocha sã. No entanto, após perfurados 13,8 metros e, tendo-se observado que o material se apresentava ainda muito fraturado, optou-se por encerrar os trabalhos de sondagem e utilizar apenas o material recuperado até esta profundidade. Assim, vale ressaltar que embora se procurasse analisar um perfil de solo residual, este trabalho não apresenta dados a respeito da rocha intacta que originou o perfil. O material coletado foi colocado em caixas de madeira obedecendo-se rigorosamente à seqüência de profundidade dos materiais retirados em cada manobra de sondagem (Figura 3.10). O boletim desta sondagem está apresentado no Anexo I.



Figura 3.10 – Testemunhos de rocha recuperados

Face ao grau de fraturamento da rocha, poucos foram os testemunhos de rocha recuperados com mais de 10 centímetros de comprimento, nos quais se pôde observar algumas características macroscópicas tais como foliações, fraturas e heterogeneidades mineralógicas (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Testemunho de rocha obtido a partir da sondagem

3.2.3. Descrição morfológica dos solos

Os solos coletados foram denominados, segundo suas características tátil-visuais, solo Branco, solo Amarelo, solo Laranja, solo Vermelho e solo Marrom.

A descrição morfológica dos solos foi feita em campo e complementada em laboratório. A variação da coloração das diferentes camadas foi a característica que mais influenciou na denominação que receberam.

Solo Marrom

O solo Marrom (Figura 3.12) é o de coloração mais homogênea. Apresenta-se vermelho escuro com tendência para o marrom e alguns pontos pretos. Sua textura é silto argilosa. Quando úmido é levemente plástico e um pouco pegajoso. É o menos friável dos cinco solos. Não se observam foliações reliquiares.



Figura 3.12 – Solo Marrom

Solo Vermelho

O solo Vermelho (Figura 3.13) é menos homogêneo que o anterior por apresentar pontos pretos localizados. Sua textura é silto arenosa. Apresenta consistência ligeiramente plástica quando úmido, mas não pegajosa. Observam-se eventuais fraturas reliquiares impregnadas por óxido de ferro.



Figura 3.13 – Solo Vermelho

Solo Laranja

O solo Laranja (Figura 3.14) tem coloração predominantemente alaranjada, com muitos veios pretos. Os veios são orientados e no manuseio mancham a mão de preto sugerindo a presença de manganês, que foi confirmada com ensaio químico em laboratório. As amostras de solo muitas vezes ao serem coletadas se rompiam preferencialmente na interface dos veios pretos. Apresenta textura siltosa e é friável.



Figura 3.14 – Solo Laranja

Solo Amarelo

O solo Amarelo (Figura 3.15) tem coloração de amarelo claro a escuro. Nas partes claras observam-se regiões brancas e, nas partes escuras, observa-se presença acentuada de pontos pretos. O material é siltoso e mais friável que o Laranja.



Figura 3.15 – Solo Amarelo

Solo Branco

O solo Branco (Figura 3.16) tem coloração clara, predominantemente branca com partes amareladas e alguns pontos marrons, pretos e esverdeados. O material é o mais friável de todo o perfil, se desmanchando facilmente quando se tenta retirar um bloco do campo. Principalmente por esta razão, as amostras indeformadas tiveram que ser coletadas encamisadas em tubos de PVC. O solo Branco é granular e tem textura arenosa. Material essencialmente quartzofeldspático.



Figura 3.16 – Solo Branco

3.2.4.

Descrição macroscópica dos testemunhos de sondagem

As descrições macroscópicas dos testemunhos de sondagem obtidos na sondagem rotativa foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. A descrição foi realizada em ambiente claro utilizando-se lupa de mão. Observou-se o grau de alteração e fraturamento dos materiais bem como sua mineralogia à vista desarmada. Os testemunhos foram descritos morfológicamente e os resultados estão listados a seguir. Toda a parte de

petrografia constante desta dissertação contou com o apoio do Professor Rubem Porto Jr. do Departamento de Geociências da UFRRJ.

R 01 (19,9m)

A rocha é holocristalina¹, fanerítica², de tons esbranquiçados. Apresenta contato entre uma porção mais clara (leucocrática³) e outra mais escura (mesocrática⁴).

A composição mineralógica é dada por: microclina, plagioclásio, quartzo e biotita como minerais essenciais. A microclina apresenta-se em grãos médios⁵, hipidiomórficos⁶ de cor rosa, com alteração observável e hábito equidimensional.

O plagioclásio apresenta-se em grãos médios, hipidiomórficos de cor esbranquiçada, decorrente de alteração, eventualmente amarelados, fruto da presença de óxido de ferro secundário.

O quartzo é granular, em grãos médios, xenomórficos⁷, translúcidos, de brilho vítreo.

A biotita tem hábito planar, cor preta e encontra-se concentrada em alguns planos preferenciais na rocha. Tons esverdeados nos grãos apontam para eventual presença de clorita por substituição.

A amostra apresenta-se bastante alterada. A cor esbranquiçada é dada fundamentalmente pela alteração dos feldspatos (Figura 3.17).

¹ Rocha constituída exclusivamente de minerais cristalizados, sem amorfos.

² Textura de rochas eruptivas em que todos ou quase todos os cristais, pelas dimensões, são visíveis a olho nu.

³ Predominância de minerais claros e menos de 30-37% de minerais escuros.

⁴ Minerais claros e escuros aproximadamente em quantidades iguais sendo composta por mais de 30-37% e menos de 60-67% de minerais escuros.

⁵ Muito fino < 0,1 mm; fino 0,1-1,0 mm; médio 1,0-5,0 mm; grosso 5,0-15,0 mm; muito grosso > 15 mm.

⁶ Mineral de forma parcialmente desenvolvida, limitada em até duas faces cristalinas.

⁷ Mineral de forma pouco desenvolvida, não limitada por faces cristalinas.



Figura 3.17 – Testemunho de sondagem R 01

R 02 (24,4m)

A rocha é anisotrópica apresentando foliação plano-paralela marcada pela presença de grãos de quartzo fitados (grãos recristalizados) que passam a subordinar a presença dos feldspatos (principalmente a microclina). A biotita também tem presença marcante.

A rocha tem granulometria média, é holocristalina, fanerítica de tons esbranquiçados.

Os feldspatos (microclina e plagioclásio) se apresentam mais preservados que na amostra R 01. A microclina apresenta uma alteração não tão observável quanto na amostra anterior.

O plagioclásio apresenta-se em cor branca leitosa, menos alterado que na amostra anterior.

O quartzo é granular, em grãos finos e alinhados formando fitas.

A biotita encontra-se em quantidade menor que na amostra R 01, grãos marrons e finos.

A amostra é leucocrática e apresenta-se menos alterada que a anterior (Figura 3.18).



Figura 3.18 – Testemunho de sondagem R 02

R 03 (25,5m)

A rocha é anisotrópica, holocristalina, fanerítica, hololeococrática de granulometria média.

A microclina apresenta-se em poucos grãos, médios, hipidiomórficos, de cor rosa, pouco alterados.

O ortoclásio apresenta-se em grãos médios, hipidiomórficos, cinza escuro distribuídos de forma alongada ao longo de um plano (formando fitas).

O quartzo é granular, em grãos médios, xenomórficos, translúcidos e de brilho vítreo.

A amostra se encontra mais preservada que as demais (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Testemunho de sondagem R 03

R 04 (25,8m)

A rocha é anisotrópica, holocristalina e fanerítica. Apresenta uma descontinuidade marcada pela presença de uma parte leucocrática⁸ (quartzo + feldspato) e uma mesocrática⁹ (biotita).

Na parte leucocrática observa-se grande quantidade de plagioclásio branco leitoso, em grãos médios, hipidiomórficos, medianamente alterados.

O quartzo é granular, com brilho vítreo, acinzentado e xenomórfico.

O ortoclásio apresenta-se em grãos médios, hipidiomórficos, cinza escuro.

Já na parte mesocrática observa-se biotita de cor preta a esverdeada, hipidiomórfica de grãos médios, microclina rosa pouco alterada, plagioclásio branco leitoso e quartzo. O quartzo se apresenta em menor quantidade que na feição leucocrática.

As análises macroscópicas das amostras indicam uma diminuição do grau de intemperismo com o aumento da profundidade (Figura 3.20).

⁸ Predominância de minerais claros e menos de 30-37% de minerais escuros.

⁹ Tons cinza médio com minerais claros e escuros aproximadamente em quantidades iguais sendo composta por mais de 30-37% e menos de 60-67% de minerais escuros.



Figura 3.20 – Testemunho de sondagem R 04

4 Investigações de laboratório

A composição químico-mineralógica e a micromorfologia dos solos tropicais impõem a eles condições diferenciadas de comportamento. Assim, visando contribuir para o entendimento de aspectos geotécnicos do comportamento do solo residual de granito-gnaiss da região de Campo Magro, um amplo programa de ensaios de laboratório foi implementado no decorrer do presente estudo. Os trabalhos de escavação, coleta de amostras e sondagem estão descritos no Capítulo 3.

A Tabela 4.1 traz um resumo dos ensaios realizados. As amostras de solo foram agrupadas em cinco camadas conforme descrito no Capítulo 3. Todas as amostras foram estudadas dentro de um programa que envolveu ensaios de caracterização física, porosimetria de mercúrio, análises químicas, difratometria de raios-X, microscopia óptica, análises microbiológicas, cisalhamento direto e erodibilidade. Os ensaios foram escolhidos focando-se obter parâmetros que pudessem ser correlacionados entre si e com o grau de intemperismo. A quantidade de ensaios foi definida a partir de observações de campo nas quais pôde se constatar visualmente a divisão do perfil em cinco camadas de solo distintas. Foram ensaiadas amostras de rocha de quatro diferentes profundidades.

Tabela 4.1 – Ensaios realizados

Solo Marrom																
Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou muflo	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade	
2.4101.05	1,5	I	sim		sim											
2.4102.05	1,3	I		sim	sim											
2.4115.05	1,1	I	sim	sim	sim											
2.4118.05	1,6	I	sim	sim	sim											
2.4105.05	1,5	I	sim	sim												
2.4117.05	1,5	I			sim											
2.4116.05	1,5	I					parcial	sim	Embrapa					sim		
2.4495.05	2,0	I		sim	sim				muflo					sim		
2.4240.05	2,2	I												sim		
2.4438.05	2,6	I				sim										
2.4113.05	1,1	I					total					sim				
2.4108.05	1,3	I									sim					
2.4518.05	1,7												sim			
2.4112.05	1,8	I														sim

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalramento direto	Desagregabilidade	Solo Vermelho	
																continuação	
2.4523.05	2,0	D	sim		sim		ambas	sim	ambas	sim	sim						
2.4522.05	2,5	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim							
2.4353.05	2,8	I	sim	sim													
2.4237.05	2,5	I	sim	sim	sim												
2.4239.05	2,5	I	sim	sim	sim												
2.4355.05	3,1	I			sim												
2.4241.05	3,2	I				sim								sim			
2.4400.05	3,5	I												sim			
2.4234.05	2,2	I												sim			
2.4233.05	2,2	I												sim			
2.4517.05	2,5	I											sim				

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

continuação

Solo Laranja																
Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade	
2.4528.05	6,8	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim	sim					
2.4043.05	7,3	I		sim												sim
2.4017.05	6,9	I	sim	sim												
2.4069.05	6,8	I	sim													
2.4090.05	6,7	I	sim	sim	sim											
2.4040.05	7,3	I	sim	sim	sim											
2.4093.05	6,8	I		sim												
2.4094.05	7,2	I		sim	sim									sim		
2.4005.05	6,8	I														
2.4018.05	7,0	I												sim		
2.4516.05	6,8	I											sim			
2.4352.05	6,2	I				sim										
2.4042.05	7,2	I										sim				

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

continuação

Solo Amarelo															
Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade
2.4527.05	7,2	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim					
2.4526.05	7,5	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim					
2.4521.05	9,0	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim	sim				
2.4072.05	8,7	I	sim	sim	sim										
2.4049.05	9,2	I	sim	sim								sim			
2.4077.05	6,9	I	sim	sim											
2.4097.05	7,0	I	sim	sim											
2.4021.05	8,9	I	sim	sim	sim										
2.4025.05	9,1	I													
2.4342.05	6,4	I												sim	
2.4211.05	7,5	I				sim								sim	
2.4343.05	6,9	I												sim	
2.4024.05	9,0	I												sim	sim
2.4095.05	7,2	I													
2.4515.05	7,8	I											sim		

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

continuação

Solo Branco

Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade
2.4525.05	9,5	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim					
2.4520.05	10,0	D	sim	sim			ambas	sim	ambas	sim					
2.4524.05	11,0	D	sim				ambas	sim	ambas	sim	sim				
2.4002.05	8,9	I	sim	sim											
2.4011.05	11,1	I	sim	sim											
2.4016.05	11,1	I	sim	sim											
2.4055.05	11,2	I	sim												
2.4006.05	11,0	I	sim	sim	sim										
2.4030.05	11,1	I	sim	sim	sim										
2.4033.05	10,9	I	sim	sim	sim										
2.4035.05	11,1	I		sim											
2.4338.05	10,7	I				sim									
2.4038.05	7,0	I												sim	
2.4088.05	10,8	I												sim	
2.4037.05	8,9	I												sim	
2.4013.05	11,2	I												sim	sim
2.4026.05	11,3	I										sim			
2.4514.05	10,1	I											sim		

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/ Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade	conclusão
R 01	19,9					sim	total	sim			sim	sim				
R 02	24,4					sim	total	sim			sim	sim				
R 03	25,5					sim	total	sim			sim	sim				
R 04	25,8					sim	total	sim			sim	sim				

O trabalho de coleta das amostras foi realizado pelo LAME/LACTEC – Laboratório de Materiais e Estruturas, Centro Politécnico da UFPR. Os blocos indeformados, devidamente protegidos com parafina, bem como as amostras deformadas envoltas em sacos plásticos foram armazenados em câmara úmida.

A numeração das amostras de solo relacionadas na Tabela 4.1 refere-se ao cadastro utilizado no sistema de qualidade do LAME/LACTEC. À exceção dos dois últimos algarismos, que indicam o ano em que a amostra foi registrada, os demais códigos não acrescentam informações específicas. No presente trabalho optou-se por manter o registro original de modo a facilitar o cruzamento futuro de dados, na continuidade das pesquisas.

Os testemunhos obtidos na sondagem rotativa foram numerados em ordem crescente com a profundidade e precedidos pela letra “R”, indicando tratar-se de rocha.

Nos itens a seguir o estudo desenvolvido em laboratório será apresentado, descrevendo-se as amostras, equipamentos e procedimentos utilizados.

Desta forma optou-se pela avaliação de sete parâmetros para a caracterização do perfil em grupos de ensaios: físicos, químicos, mineralógicos, micromorfológicos, microbiológicos, de resistência e de erodibilidade.

Visando um melhor conhecimento das propriedades físicas do perfil estudado determinou-se:

- Propriedades índice (limites de Atterberg, granulometria e peso específico dos grãos);
- Porosimetria de mercúrio.

Para determinar as propriedades químicas do perfil optou-se pela realização dos seguintes ensaios:

- Análise química total;
- Análise química parcial;
- Determinação de pH e matéria orgânica.

Estes ensaios foram realizados no LAMIR - Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR, na EMBRAPA-Solos e no LAME/LACTEC.

Para determinar as propriedades mineralógicas e micromorfológicas de todo o perfil optou-se pela realização de:

- Microscopia óptica (lupa binocular) na fração areia;
- Difração por raios-X em amostras de solo e amostras de rocha;
- Microscopia óptica em lâminas de rocha (petrografia) e solo (micromorfologia).

Os ensaios acima foram realizados em parte no LAME/LACTEC e em parte no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Para avaliação das propriedades microbiológicas do solo do perfil, foram utilizados dois parâmetros:

- Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis;
- Atividade microbiana degradadora total.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Como ensaio de resistência foi realizado o ensaio de cisalhamento direto e para caracterizar a variação no grau de erodibilidade dos solos do perfil, foi realizado o ensaio de desagregabilidade. Estes ensaios também foram conduzidos no LAME/LACTEC.

4.1. Caracterização física

4.1.1. Propriedades índice

Para avaliar as propriedades índice básicas do solo residual estudado, um programa de ensaios de caracterização contemplou boa parte do material coletado nas diferentes profundidades. As amostras utilizadas nesses ensaios estão relacionadas na Tabela 4.1. Além de se ter estudado amostras de solo deformadas provenientes das cinco diferentes profundidades do perfil, procedeu-se também à análise de material restante dos blocos indeformados que foram utilizados em outros ensaios.

O trabalho foi desenvolvido no LAME/LACTEC. Esta instituição possui um sistema de qualidade e ensaios geotécnicos credenciados pelo INMETRO, bem como a certificação ISO 9002/94. A maioria dos equipamentos (extensômetros, transdutores, vidraria, balanças e outros dispositivos) conta com certificados de calibração que são renovados periodicamente. As instalações do laboratório incluem sistemas de controle de temperatura e umidade.

Os procedimentos para os ensaios de caracterização foram desenvolvidos segundo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização;

- NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural;
- NBR 6508/1984 – Massa Específica Real dos Grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica.

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

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

$$I_a = \frac{IP}{\% < 2\mu m}$$

$\% < 2 \mu m$ = fração argila

Classificação segundo a fração argila presente no solo:

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

Com as amostras indeformadas, obteve-se:

- Peso específico real dos grãos $\gamma_s = \rho_s \times g$, sendo ρ_s a massa específica real dos grãos e g a aceleração da gravidade ($9,81m/s^2$);
- Peso específico natural $\gamma_{nat} = \rho_{nat} \times g$, sendo ρ_{nat} a massa específica natural e g a aceleração da gravidade ($9,81m/s^2$);
- Peso específico seco $\gamma_d = \gamma_{nat}/(1+w_{nat})$ sendo w_{nat} a umidade natural do solo;
- Índice de vazios (e), determinado pela equação: $e = (\gamma_s/\gamma_d) - 1$;
- Porosidade (n , %), determinada a partir da equação: $n = e / (1 + e)$;
- Grau da saturação (S ,%), obtida através da equação: $S = (\rho_s \cdot w_{nat}) / (e \cdot \rho_w)$, sendo w_{nat} a umidade natural do solo e ρ_w a massa específica da água a $4^\circ C$ ($1 g/cm^3$).

4.1.2. Porosimetria de mercúrio

O uso da técnica de injeção de mercúrio constitui uma importante ferramenta no estudo da microestrutura do solo e tem sido utilizada como uma

técnica experimental para se caracterizar vários aspectos dos materiais porosos e dos pós. Estes ensaios fornecem a distribuição dos diversos tamanhos de poros e suas porcentagens relativas ao volume de vazios do solo.

Assim, este trabalho abrangeu também ensaios de injeção de mercúrio tanto em amostras de solo quanto de rocha com o objetivo de se obter a distribuição das dimensões dos poros nos diversos horizontes estudados. Tal estudo envolveu amostras moldadas de blocos indeformados coletados ao longo do perfil bem como amostras moldadas a partir dos testemunhos de sondagem obtidos da perfuração da rocha matriz. As amostras utilizadas nesses ensaios estão relacionadas na Tabela 4.1. Todos os ensaios de injeção de mercúrio foram realizados no Laboratório da Fundação de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos.

A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Por conseqüência, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

Se uma amostra de um sólido poroso é encerrada num recipiente dotado de um capilar, sendo feito o vácuo sobre a mesma e sendo preenchido o recipiente e o capilar com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar (Figura 4.1).

Registrando-se a redução do nível de mercúrio no capilar (h) juntamente com a pressão aplicada (p_2), uma curva de porosimetria é obtida informando qual volume de poros do material foi penetrado pelo mercúrio a uma dada pressão. Os ensaios de porosimetria fornecem basicamente duas curvas, a curva de volume acumulado e um histograma de freqüência contínuo dos diversos diâmetros de poros constituintes da estrutura do solo. Com a primeira é possível obter-se, para um determinado diâmetro de poro, as porcentagens, em relação ao volume de vazios total da amostra, dos poros de diâmetro maior ou menor do que o considerado. Já a segunda curva, curva de $dv/d(\log d)$, uma espécie de derivada da curva anterior, fornece os intervalos de diâmetros de poros por classe.

Em equipamentos comerciais, como o porosímetro *Micromeritics PoreSizer 9320* disponível no Laboratório da Fundação de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos, poros de diâmetro a partir de 0,7 mm podem ser investigados, a uma pressão de aproximadamente 0,0017 MPa (0,17 atm) até poros de 0,000006 mm ou 60 ângstrons de diâmetro, que correspondem a uma pressão de 212 MPa (2000 atm).

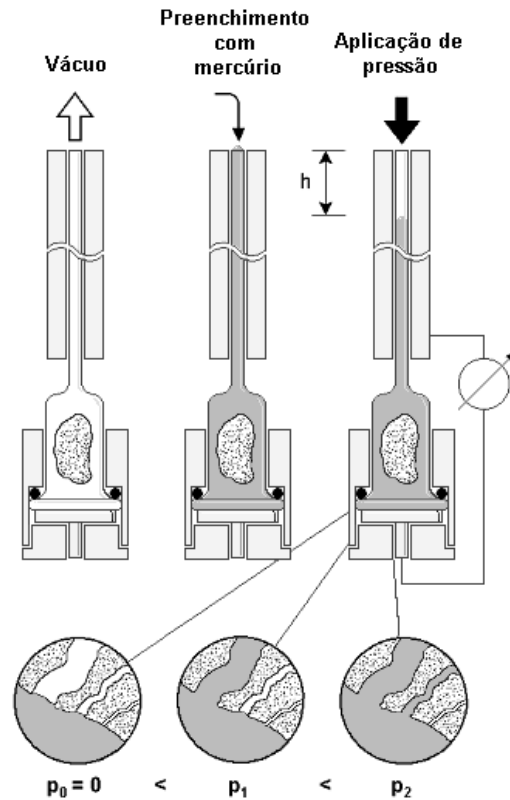


Figura 4.1 – Princípio da porosimetria por intrusão de mercúrio

A preparação das amostras foi realizada de forma que sua microestrutura não fosse alterada. As de solo foram cortadas em formato cilíndrico com serra de aço em dimensões de aproximadamente 15 milímetros de diâmetro e 24 milímetros de comprimento. Os corpos cilíndricos foram colocados para secar em fornos tipo mufla, a 40°C, por 24 horas para se eliminar o excesso de água. Após a secagem as amostras foram ensaiadas no equipamento *Porosizer 9320 Micromeritics* (Figura 4.2). Para as amostras de rocha, corpos cilíndricos cortados com serra de diamante de dimensões similares foram ensaiados. Não foi preciso nestes casos fazer a etapa de secagem.



Figura 4.2 – Porosizer 9320 Micromeritics

Após sua preparação e pesagem, cada amostra foi colocada em um porta-amostra e o conjunto foi pesado (porta-amostra + amostra). O porta-amostra foi levado para a câmara de baixa pressão, onde foi aplicado vácuo para que o mercúrio ocupasse todo o espaço vazio do porta amostra. Após esta etapa, aplicaram-se manualmente pressões pneumáticas de 0,5 psi a 25 psi.

O porta-amostra foi novamente pesado (porta-amostra + amostra + mercúrio) e levado para a câmara hidráulica e automática de alta pressão onde foram aplicadas pressões de 25 psi a 30.000 psi. Esta etapa é chamada de intrusão. Depois, o equipamento reduziu, também de forma automática, a pressão para 25 psi, etapa esta denominada extrusão.

4.2. Caracterização química

Das formas de intemperismo que propiciam a formação e evolução dos solos, o químico assume papel de destaque em regiões intertropicais, dadas as condições climáticas favoráveis. Por esta razão, foram realizadas neste trabalho análises químicas totais e determinação de pH em amostras de solos e de rochas de todo o perfil, bem como análises químicas parciais e determinação de matéria orgânica apenas em amostras de solo.

4.2.1. Análise química total

Com o objetivo de quantificar a evolução do intemperismo químico e assim estabelecer correlações entre ele e as demais propriedades investigadas, foram realizadas análises químicas totais em amostras de solo e de rocha. As amostras de solo e de rocha utilizadas nesses ensaios estão relacionadas na Tabela 4.1. As análises químicas totais foram realizadas no LAMIR. Nas amostras de solo os elementos foram determinados por fluorescência de raios-X a partir da confecção de pastilhas prensadas de material pulverizado. Já nas amostras de rocha foi utilizada a técnica de fluorescência de raios-X em amostras fundidas com tetraborato de lítio. Através destas análises foi possível determinar os teores de Sílica (SiO_2), Alumínio (Al_2O_3), Titânio (TiO_2), Ferro (Fe_2O_3), Cálcio (CaO), Magnésio (MgO), Sódio (Na_2O) e Potássio (K_2O) nas amostras de solo inicialmente propostas e também nas amostras de rocha. Estes resultados foram utilizados para o cálculo dos seguintes índices químicos de intemperismo que são calculados em porcentagem de óxidos:

$$ba = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$$

$$ba_1 = \frac{K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$$

$$ba_2 = \frac{CaO + MgO}{Al_2O_3}$$

Para efeitos de correlações o índice utilizado foi o **ba₁**. Isto porque o perfil de solo em questão provém de rochas ácidas e, portanto, suas quantidades de potássio e sódio são mais representativas que os teores de cálcio e magnésio.

Na análise química total foi também determinado o índice de perda ao fogo (P.F.). Para análise de perda ao fogo uma pequena quantidade de material (solo ou rocha pulverizada) foi seca a 100°C por 12 horas. Depois, foi levada ao dessecador por cerca de 45 minutos para esfriar. Na seqüência, aproximadamente 2 g do material foi levado à mufla e submetido a uma temperatura de 1000 °C, por 3 horas, em um cadinho de porcelana, com descrição de seu peso. Novamente o material foi esfriado no dessecador e, na seqüência, pesado, calculando-se assim a perda de massa. Essa perda é denominada perda ao fogo.

O índice de perda ao fogo está diretamente relacionado ao grau de alteração dos minerais e à formação dos argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio. Assim, este índice pode ser usado para correlacionar outras propriedades dos solos do perfil estudado com o seu grau de alteração.

4.2.2. Análise química parcial

As análises químicas parciais (ataque sulfúrico e complexo sortivo) foram executadas pela EMBRAPA - Solos segundo o que consta no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997). As amostras de solo utilizadas para estas análises constam da Tabela 4.1. O ataque por ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1:1 foi utilizado para as seguintes determinações:

- SiO₂,
- Fe₂O₃,
- Al₂O₃,
- TiO₂,

O ensaio de complexo sortivo, que forneceu as quantidades de Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Al.⁺⁺⁺, K⁺ e Na⁺ permutáveis e o valor T (ou CTC) de capacidade de troca

catiônica. Com este dado, foi possível obter a superfície específica (S.E.) dos materiais. A superfície específica é determinada a partir do volume do azul de metileno absorvido pelos minerais argilosos. O fator que converte o valor T para S.E. é 7,8043. Este fator está relacionado às dimensões da molécula de azul de metileno.

A capacidade de troca de cátions é a soma das cargas elétricas negativas. Quando o número de cargas elétricas negativas é alto, tem-se uma argila de atividade alta. Os óxidos de ferro têm o poder de colorir o solo tornando-o avermelhado (hematita) ou amarelado (goethita). A ocorrência do ferro na sua forma mais solúvel (Fe^{2+}) está associada a condições anaeróbicas, que são aquelas em que há falta de oxigênio no meio ambiente, normalmente verificada em áreas próximas a rios e drenagens. Quando a condição é aeróbica, a alta concentração de oxigênio favorece a presença do ferro menos solúvel (Fe^{3+}). O nível do lençol freático também influencia no tipo de ferro presente no solo, pois está diretamente relacionado às condições aeróbicas ou anaeróbicas.

Baseado no fato de que o processo inicial de intemperismo causa a lixiviação dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos, a concentração de sílica, alumínio e sesquióxido de ferro, os resultados do ataque sulfúrico foram utilizados para o cálculo das relações moleculares K_i e K_r , conforme segue. Estas relações são comumente usadas para indicar o grau de alteração dos solos.

$$K_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$
$$K_r = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$$

4.2.3. pH e matéria orgânica

O pH do solo foi determinado em água e também em KCl normal pela EMBRAPA - Solos segundo o que consta no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997).

Para as amostras de rocha foi determinado no LAME/LACTEC apenas o pH em água. Esta determinação foi feita a partir de amostras de rocha pulverizadas submetidas ao método de determinação de pH em água constante do Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997).

Determinou-se o teor de carbono orgânico por oxidação da matéria orgânica com bicromato de potássio 0,4N. Multiplicando o valor obtido por 1,7, foi calculada a quantidade de matéria orgânica, em g/kg. Estas determinações foram obtidas pela EMBRAPA - Solos segundo o que consta no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997).

A porcentagem de matéria orgânica presente em cada solo foi também determinada no LAME/LACTEC a partir da diferença de massa das amostras de solo antes e depois de aquecidas a 400° em uma mufla, por 4 horas.

4.3. Análises mineralógicas e microestruturais

Atualmente, as classificações de solos existentes em Geotecnia e áreas afins correspondem ao comportamento geral de diferentes grupos de solos. Estas classificações muitas vezes são superficiais e podem conduzir a ambigüidades devido às formas empíricas utilizadas para obtenção dos parâmetros usados na classificação. A caracterização mineralógica das diversas frações do solo pode contribuir para melhor definir seus parâmetros de classificação. Certamente, sem uma análise mineralógica, uma mesma classificação pode ser atribuída a solos com demais características similares, mas com diferentes índices mineralógicos. Se isto ocorrer, diferenças de comportamento oriundas da mineralogia serão dificilmente detectadas pela classificação dos solos. Em razão disto, a metodologia desta pesquisa fez uso da lupa binocular, da técnica de difração de raios-X e da microscopia óptica/petrografia para identificar os minerais presentes em todo o perfil.

4.3.1. Observação em lupa binocular

Foi realizada em lupa binocular a caracterização mineralógica das frações pedregulho e areia, ou seja, do material retido na peneira nº 200 (0,074mm), de amostras de solo coletadas em diferentes profundidades ao longo do perfil. De acordo com a classificação do MIT o material retido na peneira nº 200 inclui a fração pedregulho, areia grossa, areia média e areia fina. A análise foi realizada no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. As amostras de solo utilizadas para estas identificações estão listadas na Tabela 4.1.

4.3.2. Difração de raios-X

A difratometria de raios-X é um método comumente utilizado na identificação dos minerais presentes em solos e rochas. O princípio desta técnica consiste em se registrar os ângulos associados à reflexão de um feixe de elétrons incidente em uma amostra. Cada mineral gera um conjunto característico de reflexões segundo ângulos θ , que podem ser convertidos nos espaços interplanares formados por seus planos cristalinos.

Neste trabalho, foram estudadas amostras de solo e de rocha de diferentes graus de intemperismo utilizando-se a técnica de difratometria de raios-X em uma série de ensaios conduzidos no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e no LAMIR. Foram analisadas as frações silte e argila dos solos bem como amostras de rocha pulverizadas. As amostras de solo e de rocha utilizadas estão identificadas na Tabela 4.1.

O preparo das amostras de solo envolveu a técnica do “esfregaço”. Nesta técnica as frações silte e argila foram espalhadas com a ajuda dos dedos sobre lâminas de vidro, de modo que se obtivesse uma fina camada de material. Já com o material a lâmina foi posta para secar ao ar. A lâmina não foi totalmente coberta com material para que houvesse um espaço para manuseio e etiquetagem.

A análise mineralógica foi então realizada com o difratômetro do DCMM - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, que apresenta as seguintes características:

- Marca Philips;
- Tubo de raios-X de alvo de cobre;
- Filtro de níquel para absorver as radiações branca e K-beta;
- Detector do tipo contador proporcional;
- Corrente elétrica de 10 mA;
- Diferença de potencial de 40 kV
- Velocidade de goniômetro de 2°/minuto;
- Velocidade do papel registrador de 1200 milímetros/hora;
- Fator de escala de amplificação de 1000 c.p.s. (contagens por segundo);
- Constante de tempo igual a 1.

As leituras dos difratogramas foram executadas abrangendo ângulos 2θ de 2 a 30°. Como alguns minerais apresentam seus picos apenas para ângulos maiores que 30°, foi necessário repetir as análises para a confirmação destes

minerais. Optou-se então por repeti-las para a fração silte. As leituras foram feitas para ângulos 2θ de 3 a 70° . Estas análises foram realizadas no LAMIR.

Analisando-se os difratogramas obtidos optou-se por realizar aquecimento e glicolagem na amostra 2.4524.05, de solo Branco. O aquecimento, num forno especial, foi feito em duas etapas: 350°C por 2 horas e 550°C por 2 horas. No caso de glicolagem a lâmina foi submetida a uma atmosfera de etileno-glicol por um período mínimo de 4 horas. A glicolagem e/ou aquecimento servem para diferenciar argilominerais que apresentam uma mesma distância interplanar basal numa montagem normal.

O preparo das amostras de rocha envolveu o “método do pó”. Nesta técnica os testemunhos de sondagem foram pulverizados e prensados manualmente sobre uma lâmina. Tanto a análise com tratamento quanto a análise mineralógica das amostras de rocha foram também realizadas com o difratômetro do LAMIR que apresenta as seguintes características:

- Marca Philips Analytical modelo PW-1830;
- Tubo de raios x de difração foco longo modelo PW 2273/20;
- Goniômetro vertical com geometria $\theta/2\theta$ modelo PW 3020/00.

As leituras dos difratogramas foram executadas abrangendo ângulos 2θ de 3 a 70° .

4.3.3. Petrografia

Para complementar a identificação dos minerais presentes nos testemunhos de sondagem da rocha do perfil, foram preparadas lâminas delgadas de rocha para análise petrográfica. Foram estudadas amostras de rocha, identificadas na Tabela 4.1, de diferentes graus de alteração. As lâminas foram preparadas no Laboratório da UFRRJ pelo Professor Rubem Porto Jr. e as análises, também auxiliadas por ele, foram conduzidas no microscópio petrográfico do DCMM.

As lâminas foram confeccionadas a partir de fatias de rochas muito finas que foram inicialmente polidas com pó abrasivo grosso (nº 200), intermediário (nº 400) e fino (nº 600) e depois coladas numa lâmina de vidro previamente polida.

A lâmina, já com a rocha, foi novamente polida com abrasivo até que atingisse a espessura de $70\ \mu\text{m}$. Tentou-se então chegar a uma espessura de $40\ \mu\text{m}$ com uma nova fase de polimento, mas isso não foi possível, pois as

amostras são de rochas já muito intemperizadas e apresentavam descolamento de partículas nesta fase. Não foi colocada uma lamínula sobre a lâmina para que se pudesse fazer posteriormente a análise com o microscópio eletrônico de varredura.

4.3.4. Micromorfologia dos solos

O estudo da micromorfologia vem a cada dia se tornando mais importante dentro da ciência da pedologia, pois permite uma melhor interpretação dos mecanismos e processos de alteração dos solos.

A micromorfologia de solo corresponde à análise microscópica dos solos quanto ao tipo e arranjo de seus constituintes, em lâminas delgadas, com auxílio de equipamentos ópticos (estereomicroscópio, microscópio óptico e microscópio eletrônico). Com o advento da análise de imagem digital, esta ferramenta vem adquirindo cada vez mais espaço na análise qualitativa e quantitativa (micromorfometria) da estrutura e da porosidade do solo.

Com o intuito de obter uma análise do arranjo espacial dos constituintes e da porosidade do solo, de modo a complementar as análises físicas já disponíveis, e também de complementar o estudo da mineralogia dos solos, foram analisadas sob microscópio óptico amostras indeformadas de solo de 4 diferentes profundidades. As amostras de solo utilizadas estão identificadas na Tabela 4.1. As análises foram realizadas no microscópio petrográfico do DCMM.

Em laboratório, foram selecionadas as amostras utilizadas para tais ensaios. Depois de selecionadas, as amostras foram desencamisadas e a partir delas foram moldados blocos em dimensões apropriadas para a impregnação (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Bloco de solo sendo moldado para impregnação

Após a moldagem, os blocos de solo foram secos ao ar e impregnados a vácuo no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRJ.

Para impregnação utilizou-se uma mistura de resina do tipo epóxi, endurecedor e álcool etílico (solvente), na proporção de 5:2:1.

Para melhor caracterização e estimativa da porosidade tanto nas lâminas grandes, quanto nas seções delgadas, foi adicionado à mistura de impregnação um corante (azul de metileno). Quando necessário, efetuou-se a re-impregnação superficial de algumas amostras (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Impregnação do bloco e preparação da lâmina

A partir dos blocos impregnados foram confeccionadas lâminas delgadas pequenas (6 x 2,5cm), no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRJ, que foram utilizadas para exame micromorfológico sob microscópio petrográfico.

Com a finalidade de realizar uma quantificação da porosidade nos solos dos quatro horizontes do perfil estudado, foram realizadas contagens dos espaços porais por intermédio do microscópio petrográfico. A descrição dos constituintes do solo nas lâminas bem como as contagens dos espaços porais através de contagem de pontos foram realizadas com auxílio do microscópio petrográfico do DCMM. Toda a parte de micromorfologia constante desta dissertação contou com o apoio dos Professores Ana Valéria Freire Allemão Bertolino e Luiz Carlos Bertolino da UERJ.

4.4. Análises microbiológicas

Algumas análises microbiológicas foram realizadas neste trabalho objetivando perceber a variação de características microbiológicas com o grau de intemperismo do solo. Foram contabilizados os microrganismos viáveis e

cultiváveis e a atividade microbiana total dos solos do perfil estudado. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

As comunidades de organismos micro e macroscópicos que habitam o solo realizam atividades imprescindíveis para a manutenção e sobrevivência das comunidades vegetais e animais.

Com base em seu tamanho, a biota do solo pode ser dividida em micro, meso e macrorganismos. Os microrganismos mais conhecidos são representados pelos vírus, archaea, bactérias, fungos filamentosos e unicelulares, protoctistas (algas e protozoários). As bactérias representam o grupo mais numeroso nos solos (Maier *et al.*, 2000).

O microhabitat ou microsítio é um local particular onde células, populações ou comunidades microbianas são encontradas e cujo estado físico-químico (microambiente) influencia o comportamento destes, que, por sua vez, também influenciam o ambiente dentro deste espaço. Microambiente do solo é uma situação físico-química na qual a célula, populações ou comunidades microbianas em particular se encontram num dado momento. Diversos fatores físicos e químicos atuam, simultaneamente, determinando as condições ambientais que não são estáticas, mas dinâmicas (Moreira e Siqueira, 2002)

A presença de um microrganismo em determinado solo é função das condições ambientais dominantes e dos limites da sua bagagem genética. Além disso, o sucesso de um organismo em qualquer habitat é função da extensão e rapidez de suas respostas fisiológicas às condições ambientais extremas de salinidade, temperatura, pressão e pH sendo, portanto, encontrados em quase todos os ecossistemas terrestres, incluindo solos.

A atividade biológica do solo é uma denominação genérica para a ação dos organismos vivos do solo, tanto animais quanto vegetais. Esses organismos têm forte influência na gênese e manutenção da organização dos constituintes do solo, principalmente nos horizontes superficiais. As raízes das plantas, por exemplo, alteram o pH do solo ao seu redor e, ao morrer e se decompor, deixam canais.

No solo as principais atividades dos organismos são: a decomposição da matéria orgânica, produção de húmus, ciclagem de nutrientes e energia, fixação de nitrogênio atmosférico e produção de compostos complexos que causam agregação do solo, proporcionando assim, condições ideais para uma biodiversidade extremamente elevada. A biodiversidade microbiana presente nos solos proporciona, principalmente em solos maduros, tratados na área agrícola

ou agrônômica, um equilíbrio que possibilita uma melhor e maior atividade de vegetais e da meso e da macrofauna.

Geralmente a quantidade de microrganismos encontrada nos solos maduros e orgânicos é de 10 a 1000 vezes maior do que nos solos subsuperficiais que apresentam também, menor quantidade de matéria orgânica. No entanto esses microrganismos mesmo que em menor número, sobrevivem nesses ambientes, aparentemente mais inóspitos à vida, às custas de diferentes possibilidades metabólicas apresentadas por inúmeras espécies microbianas.

Os microrganismos participam da gênese do hábitat onde vivem. Nos estágios iniciais de formação do solo, carbono e nitrogênio são elementos deficientes, deste modo, espécies fotossintéticas, quimiossintéticas e fixadoras de nitrogênio são importantes colonizadoras primárias de rochas. Também estão envolvidos no intemperismo através de participação em reações que liberam prótons, nutrientes inorgânicos e ácidos orgânicos (Moreira e Siqueira, 2002).

Muitos deles são capazes de oxidar sais inorgânicos, utilizando-os como fonte de poder redutor, e também de reduzir outros durante seu processo de respiração e transferência de energia, fazendo-os aceptores finais de elétrons já com baixo potencial redox. Durante esse processo esses indivíduos podem usar minerais já solubilizados e disponibilizados, através de processos físico-químicos ou, pela sua própria atividade metabólica, solubilizar minerais fixados sob forma estável em rochas, contribuindo de forma contínua e decisiva para o processo de intemperismo.

Os principais fatores que afetam os microrganismos do solo são: água, substratos e fontes de energia, fatores de crescimento, nutrientes minerais, composição e força iônica da solução do solo, pH, composição e pressão atmosférica, umidade, potencial redox, temperatura e radiação solar, profundidade e cobertura vegetal, interações entre organismos e impactos antropogênicos.

Solos superficiais podem diferir de solos de subsuperfície no que diz respeito ao fluxo de nutrientes. Ambientes subsuperficiais podem apresentar baixo teor de alguns nutrientes não facilmente carregados que podem ser essenciais a determinadas atividades, limitando, assim, a sobrevivência da microflora do solo. A limitação de nutrientes resulta geralmente em uma diminuição de 2 a 6 ordens de magnitude da biomassa em relação aos solos superficiais e de 4 até mais de 10 ordens de magnitude em relação a atividades enzimáticas (Kieft e Phelps, 1997)

Alguns trabalhos da última década apontam a importância do conhecimento do perfil de distribuição das populações microbianas dos solos de subsuperfície e a variação espacial das propriedades microbiológicas (Brockman, 1997; Parkin, 1993). Outros autores apontam a contribuição de um intemperismo biológico (Viles, 1995). Segundo Brockman (1997) devem existir correlações entre a distribuição das propriedades físicas e químicas e a distribuição das propriedades microbiológicas já que os microrganismos dependem de diversos elementos químicos para sua sobrevivência. Não foram encontrados, no entanto, na literatura, informações sobre possíveis correlações entre a presença de microrganismos no solo e o grau de intemperismo do mesmo. Deste modo, pretende-se com esta dissertação dar o primeiro passo em busca da possibilidade de existência destas correlações.

4.4.1.

Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis

A contagem do número de microrganismos viáveis e cultiváveis (bactérias e fungos) foi feita através da técnica de derramamento em profundidade ou “*Pour Plate*”, ilustrada na Figura 4.5 (Brock *et al.*, 1994). Uma amostra de solo (1g) foi suspensa em água estéril e diluída sucessivamente (diluições de 10 vezes) até uma diluição de 10^{-2} à 10^{-4} dependendo do solo. Uma alíquota de 0,1 mL de cada diluição foi colocada em uma placa de Petri estéril e vazia, e sobre ela foram derramados e homogeneizados aproximadamente 20 mL de meio sólido *Tryptone Soya Agar* (TSA 10%) previamente fundido e mantido a uma temperatura de aproximadamente 56°C. O TSA, que em português quer dizer Agar Triptona Soja, é um meio de cultura utilizado para cultura de microrganismos de solo. Foram feitas triplicatas para cada diluição (Figura 4.5 e 4.6).

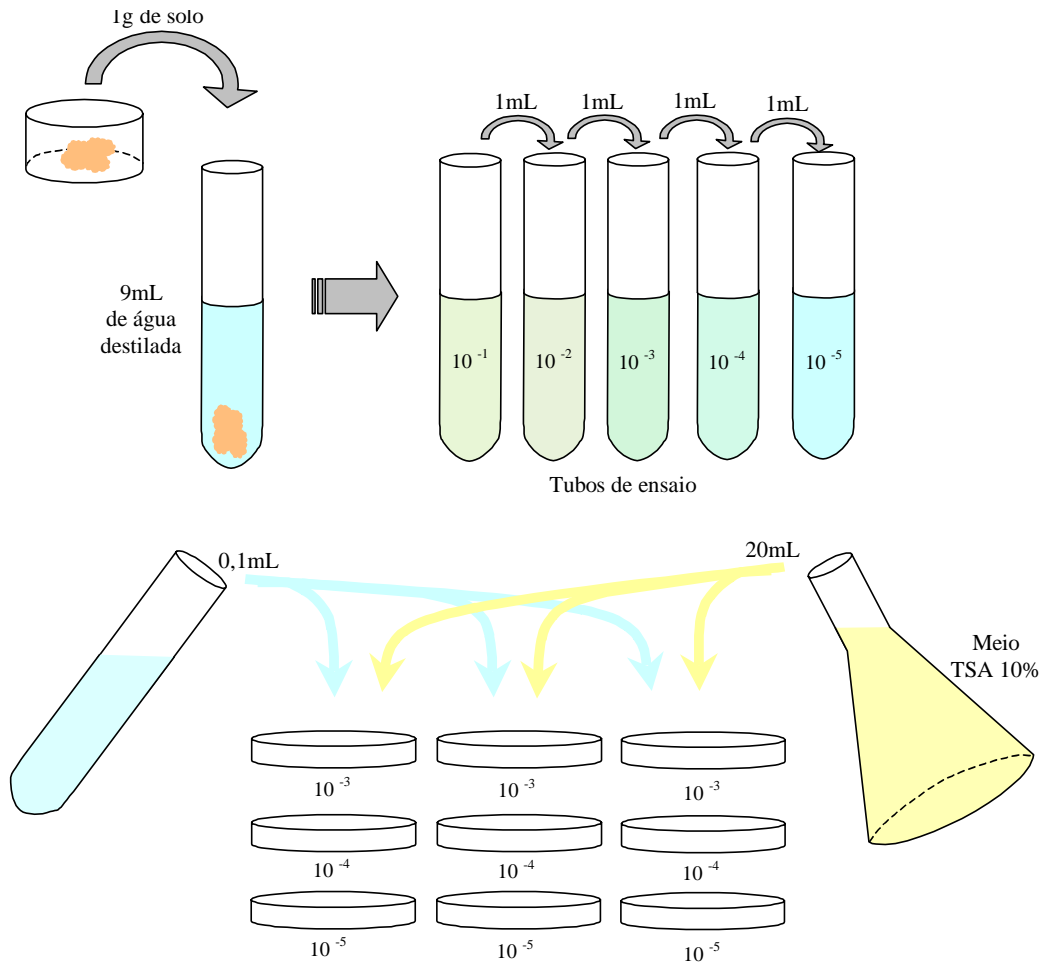


Figura 4.5 – Esquema geral da técnica de *Pour Plate* (Magdaleno, 2005)



Figura 4.6 – Técnica de derramamento em profundidade ou *Pour Plate*

Após uma semana de incubação a temperatura ambiente, as colônias de microrganismos foram contadas com auxílio de uma lupa acoplada a um transluminador e aproveitadas para o resultado somente as placas que continham entre 30 e 300 colônias. Como cada colônia deve ser oriunda da multiplicação de uma única célula, o número de colônias corresponde ao número original de microrganismos plaqueados no meio. Estes microrganismos são então denominados Unidades Formadoras de Colônias.

4.4.2.

Atividade microbiana degradadora total

A atividade microbiana total do solo foi determinada através da hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA) como proposto por Adam e Duncan (2001), com pequenas adaptações do método, em relação às quantidades de solo usadas e ao tempo de incubação.

Esse substrato é usado para avaliar a atividade de enzimas relacionadas à degradação de ligações di-éster, bastante comuns em lipídios. Portanto essas enzimas estão relacionadas à capacidade de degradação de matéria orgânica, preferencialmente lipídica e com a capacidade metabólica de microrganismos heterotróficos. Essa atividade foi escolhida como modelo somente para fins comparativos entre os diferentes horizontes do solo estudado e também entre outros solos de subsuperfície estudados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. O diacetato de fluoresceína possui 2 ligações éster e assim também é reconhecido pelas enzimas esterases como substrato. Quando hidrolisado por enzimas livres (exoenzimas) e de membrana, liberam a fluoresceína (colorido) como produto final que absorve fortemente um comprimento de onda visível (490nm) que pode ser medido através de espectrofotometria.

Foram pesados 2 a 5 g de solo úmido peneirado em erlenmeyers com capacidade de 50 mL. Foram acrescentados 15mL de solução tampão fosfato 60 nM e, exceto nos “brancos” das amostras, 200 µL de Solução Estoque de diacetato de fluoresceína (FDA) 1000 µg.mL⁻¹. O conjunto foi incubado em agitação orbital a 100 RPM, por 60 minutos a 30°C. Após a incubação foram acrescentados 15 mL de solução Clorofórmio/Metanol (2:1) a fim de interromper a reação, e, a seguir, as amostras foram centrifugadas a 2000 RPM por 3 minutos. O sobrenadante então foi filtrado em papel Whatmann nº2 e sua absorbância foi medida em espectrofotômetro a 490 nm. Para o cálculo da concentração de fluoresceína em

cada uma das amostras, foi feita uma curva padrão, através da diluição de uma solução estoque de fluoresceína $2000 \mu\text{g mL}^{-1}$ em solução tampão fosfato 60 nM .

4.5. Ensaio de desagregabilidade

O ensaio de desagregabilidade não é ainda um ensaio normalizado. Por essa razão, optou-se neste trabalho por utilizar a mesma metodologia utilizada por Ramidan (2003). Ela objetiva a observação do comportamento de amostras de solos sob a influência d'água. Para tal, foram utilizadas 5 amostras indeformadas de solo, encamisadas com tubo de PVC, retiradas em cinco diferentes níveis do talude estudado. As amostras utilizadas estão identificadas na Tabela 4.1. A partir destas amostras, foram moldados corpos-de-prova cúbicos com 5 cm de lado (Figura 4.7).

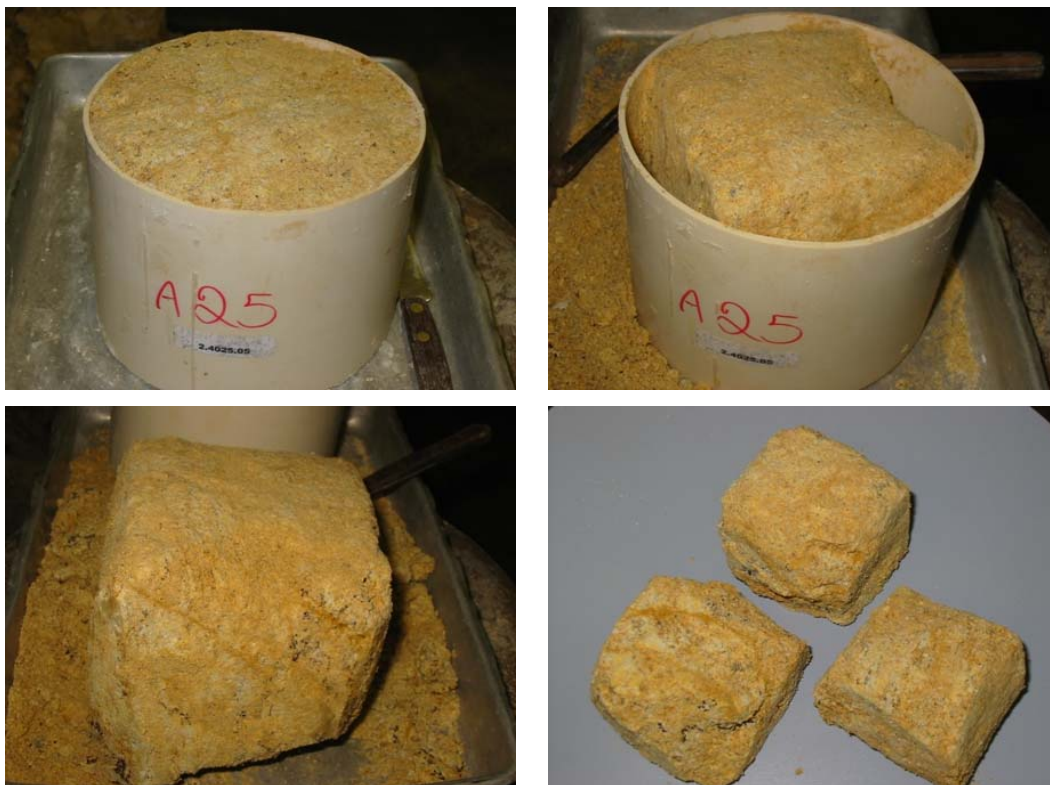


Figura 4.7 – Moldagem dos corpos-de-prova a partir das amostras indeformadas retiradas do talude com auxílio do tubo de PVC

Para a realização do ensaio de desagregabilidade, os corpos-de-prova, com 5 cm de lado, foram colocados dentro de duas bandejas metálicas e sobre pedras porosas saturadas cobertas com papel filtro. Em seguida, observaram-se suas reações ao processo de submersão.

Seguindo a metodologia adotada por Ramidan (2003), os corpos-de-prova foram colocados na primeira bandeja sobre as pedras porosas. Após esta etapa de preparação o nível d'água foi mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos. Passados os 30 minutos, a altura da água foi aumentada até atingir 1/3 da altura total da amostra. A seguir, os corpos foram mantidos com este nível d'água por mais 15 minutos e, na seqüência, o nível d'água foi elevado até 2/3 da altura total do corpo-de-prova. Os corpos-de-prova foram mantidos com o nível d'água a 2/3 da altura total do corpo por mais 15 minutos e em seguida o nível foi elevado a 3/3 da altura total do corpo ficando assim todos eles inteiramente submersos. Prosseguiu-se com o ensaio até que as amostras completassem um ciclo de 24 horas inteiramente submersas.

Na segunda bandeja, após colocados os corpos-de-prova sobre as pedras porosas, estes foram submetidos a imersão total desde o início do ensaio e mantiveram esta condição por 24 horas. Foram registrados os períodos de 15 minutos da primeira hora e o resultado final após as 24 horas.

4.6. Ensaio de cisalhamento direto

Com o intuito de obter parâmetros de resistência dos solos estudados, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo das cinco diferentes camadas. As amostras utilizadas e informações dos ensaios de cisalhamento direto podem ser encontradas na Tabela 4.2.. Os ensaios foram realizados no LAME/LACTEC. Foi obtida para cada solo uma envoltória de resistência formada por quatro pontos.

Todas as amostras utilizadas eram indeformadas. Todos os corpos-de-prova foram moldados nas dimensões 100 x 100 mm.

A velocidade média de deslocamento adotada foi de 0,06 mm/min. Esta velocidade foi definida a partir de ensaios realizados como testes. Taxas de deslocamento menores foram evitadas, no intuito de tornar mais operacional a execução do programa de ensaios. A velocidade de 0,06 mm/min atende o critério de Gibson e Henkel (1954), freqüentemente citado na literatura.

Tabela 4.2 – Resumo do programa de ensaios de cisalhamento direto

Registro da amostra	Solo	Profundidade (m)	Tensão normal aplicada no adensamento (kPa)
2.4495.05	Marrom	2,0	25/50
2.4240.05	Marrom	2,2	25/100/200
2.4400.05	Vermelho	3,5	25
2.4241.05	Vermelho	3,2	25
2.4234.05	Vermelho	2,25	50
2.4233.05	Vermelho	2,25	100/200
2.4005.05	Laranja	6,75	25/50
2.4018.05	Laranja	6,95	25/100/200
2.4095.05	Amarelo	7,15	25
2.4211.05	Amarelo	7,5	50
2.4342.05	Amarelo	6,4	50
2.4343.05	Amarelo	6,9	100/200
2.4038.05	Branco	6,95	25/50
2.4037.05	Branco	8,9	100
2.4088.05	Branco	10,8	200

Os corpos-de-prova indeformados foram cuidadosamente moldados a partir dos blocos encamisados. Para isto foram utilizados anéis metálicos quadrados, que possuíam 100 mm de lado e 25,4 mm de altura. Buscando-se evitar alterações no estado do material devido à perda de umidade, o trabalho foi sempre executado no interior de câmara úmida. A operação de moldagem não se mostrou uma tarefa fácil. O destacamento de fragmentos por fraturas do solo, em especial o branco, freqüentemente causava a perda dos corpos-de-prova. A presença esporádica de concreções de manganês, em especial nos solos alaranjados, foi problemática, pois as mesmas por vezes se constituíam um obstáculo à inserção do anel metálico de moldagem. Por outro lado, a incorporação de concreções no corpo-de-prova poderia provocar efeitos indesejáveis no comportamento do material ensaiado.

Ao final do trabalho, o corpo-de-prova foi “rasado” no topo e na base, utilizando-se as sobras de material para determinar sua umidade. As sobras de material de cada amostra foram embaladas em sacos plásticos e permaneceram na câmara úmida para eventuais ensaios futuros.

A prensa de cisalhamento direto empregada nos ensaios é a prensa Shear Trac II, fabricada pela Geocomp (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Prensa Shear Trac II utilizada nos ensaios – LAME/LACTEC – Laboratório de Materiais e Estruturas, Centro Politécnico da UFPR

A prensa Shear Trac II é um equipamento de ensaio totalmente automatizado. Ele executa as fases de adensamento e cisalhamento de modo inteiramente automático. A máquina faz o que foi projetado sem a necessidade de monitoração constante o que permite que se trabalhe em outras atividades enquanto um ensaio fica funcionando direto. É também possível deixar os ensaios funcionando durante a noite, fora do horário comercial. O software permite uma fácil recuperação e avaliação de dados.

A prensa possui um motor elétrico que desloca a base da célula de cisalhamento, de modo que sua metade superior reage contra uma célula de carga medindo-se a força tangencial. O deslocamento horizontal é medido por um extensômetro, na base da célula. Os deslocamentos verticais são monitorados também com um extensômetro, posicionado no topo do sistema de carregamento vertical.

Nas caixas de cisalhamento (Figura 4.9) foram usadas placas metálicas ranhuradas e pedras porosas, tanto no topo como na base das amostras.



Figura 4.9 – Detalhe da caixa de cisalhamento da Prensa Shear Trac II

Uma vez moldados, os corpos-de-prova eram transferidos para a caixa de cisalhamento. Em seguida, adensava-se o solo em dois estágios com duração de 24 h. No primeiro estágio aplicava-se, por 5 minutos, uma tensão de 2kPa, e no segundo estágio a tensão total normal desejada (25, 50, 100 ou 200 kPa)

Em todos os ensaios, procedeu-se à inundação do solo imediatamente após a aplicação do primeiro estágio de carregamento. Durante a fase de adensamento, o software que acompanha a prensa mediu os recalques dos corpos-de-prova.

A Tabela 4.3 traz dados dos 24 corpos-de-prova empregados nos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 4.3 – Dados dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto

Registro da Amostra	Solo	Tensão normal aplicada (kPa)	Umidade inicial (w_0 %)	Umidade final (w_f %)	Peso específico (γ_n kN/m ³)	Peso específico seco (γ_d kN/m ³)
2.4495.05	Marrom	25	25,43	42,10	18,54	14,78
2.4495.05	Marrom	50	21,03	44,21	18,36	15,17
2.4240.05	Marrom	25	22,65	35,03	18,79	15,32
2.4240.05	Marrom	100	22,65	31,86	19,69	16,06
2.4240.05	Marrom	200	22,65	30,80	18,50	15,09
2.4400.05	Vermelho	25	25,62	51,98	15,86	12,62
2.4241.05	Vermelho	25	29,71	54,66	14,83	11,43
2.4234.05	Vermelho	50	27,39	53,51	14,98	11,76
2.4233.05	Vermelho	100	28,41	48,22	23,64	18,41
2.4233.05	Vermelho	200	28,41	47,25	15,01	11,69
2.4005.05	Laranja	25	31,64	46,47	14,26	10,83
2.4005.05	Laranja	50	31,64	43,54	17,49	13,28
2.4018.05	Laranja	25	28,44	54,70	15,86	12,34
2.4018.05	Laranja	100	36,01	47,80	16,16	11,88
2.4018.05	Laranja	200	36,01	45,15	17,23	12,67
2.4095.05	Amarelo	25	26,90	40,19	16,83	13,26
2.4211.05	Amarelo	50	29,09	40,54	18,06	13,99
2.4342.05	Amarelo	50	15,03	37,12	18,30	15,91
2.4343.05	Amarelo	100	24,59	41,08	17,27	13,86
2.4343.05	Amarelo	200	24,59	36,66	17,32	13,90
2.4038.05	Branco	25	14,53	26,21	20,33	17,75
2.4038.05	Branco	50	14,28	25,41	18,68	16,34
2.4037.05	Branco	100	10,02	25,99	21,69	19,71
2.4088.05	Branco	200	18,47	33,45	20,64	17,43

5

Apresentação e análise dos resultados

5.1.

Caracterização física

5.1.1.

Propriedades índice

Na caracterização física foram realizados os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, peso específico dos grãos e granulometria por peneiramento e sedimentação.

Informações específicas sobre a execução dos ensaios, os quais seguiram as prescrições da ABNT, podem ser encontradas no Capítulo 4. As determinações de peso específico dos grãos foram realizadas tanto segundo a NBR 6508 (ABNT, 1984b) como segundo o procedimento DNER-ME 093/94 (DNER, 1994). O método do DNER possui como vantagem uma maior simplicidade – para a eliminação de ar, fervura é utilizada no lugar da aplicação de vácuo. Apesar de o solo ensaiado provir de peneiras distintas (4,8 mm na norma da ABNT e 2,0 mm no método do DNER), a pequena quantidade de pedregulho presente nos solos do perfil permite a comparação direta entre os pesos específicos obtidos com os dois procedimentos. Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física

Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DNER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
2.4101.05	1,5	26,7				41	26	15	0	34	54	12
2.4102.05	1,3	26,7		2,733		42	29	13				
2.4115.05	1,1	24,3	2,714	2,706	2,036	46	30	16	1	33	43	23
2.4118.05	1,6	17,1	2,692		1,693	37	33	4	0	35	40	25
2.4105.05	1,5	21,9	2,676		1,473				1	33	43	23
2.4117.05	1,5	31,4			1,846	38	26	12				
2.4117.05	1,5	24,6			1,644							
2.4106.05	1,6	23,6			1,505							
2.4354.05	1,3	23,1			1,792							
2.4110.05	1,7	26,3			1,864							
2.4116.05	1,5	24,8			1,914							
2.4109.05	1,7	15,1			1,458							
2.4495.05	2,0	25,4		2,694	1,890	59	39	19,5				
2.4495.05	2,0	21,0		2,694	1,872	59	39	19,5				
2.4240.05	2,2	22,7			1,916							
2.4240.05	2,2	22,7			2,007							
2.4240.05	2,2	22,7			1,886							

continua

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de caracterização física

continuação

Solo Vermelho

Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DNER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
2.4523.05	2,0					44	36	8	1	48	46	5
2.4522.05	2,5		2,789	2,790		46	33	13	0	37	52	11
2.4353.05	2,8		2,735						0	39	52	9
2.4353.05	2,8	28,4			1,616							
2.4236.05	2,0	24,2			1,786							
2.4237.05	2,5	30,8	2,717		1,519	43	35	8	0	23	69	8
2.4114.05	1,8	38,1			1,623							
2.4232.05	2,0	26,8			1,482							
2.4239.05	2,5	29,4	2,713		1,417	45	34	11	0	29	62	9
2.4355.05	3,1	30,6			1,444	41	38	3				
2.4241.05	3,2	29,7			1,512							
2.4400.05	3,5	25,6			1,616							
2.4234.05	2,2	27,4			1,527							
2.4233.05	2,2	28,4			1,530							
2.4235.05	2,5	23,2			1,550							

continua

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de caracterização física

continuação

Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DINER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Solo Laranja												
2.4528.05	6,8		2,793	2,791		34	np	np	2	49	41	8													
2.4043.05	7,3			2,782																					
2.4017.05	6,9	36,6	2,747		1,583				0	58	35	7													
2.4069.05	6,8	31,9			1,495				0	57	35	8													
2.4090.05	6,7	30,3	2,736		1,424	37	np	np	0	52	42	6													
2.4092.05	6,8	26,9			1,368																				
2.4040.05	7,3	36,6	2,740		1,765	39	np	np	3	28	62	7													
2.4091.05	6,7	35,6			1,543																				
2.4093.05	6,8	31,6	2,699		1,845																				
2.4094.05	7,2	26,9	2,723		1,774	31	np	np																	
2.4345.05	6,8	31,5			1,558																				
2.4005.05	6,8	31,6			1,454																				
2.4005.05	6,8	31,6			1,783																				
2.4018.05	7,0	36,0			1,648																				
2.4017.05	6,9	36,4	2,747		1,613																				
2.4069.05	6,8	31,9			1,495																				
2.4227.05	6,4	29,4			1,687																				
2.4018.05	7,0	36,0			1,757																				
2.4220.05	5,7	32,3			1,570																				

continua

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de caracterização física

Continuação

Solo Amarelo												
Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DNER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
2.4527.05	7,2		2,776	2,792		34	33	1	1	50	44	5
2.4526.05	7,5		2,715	2,750		36	22	14	0	45	47	8
2.4521.05	9,0			2,620		32	27	5	2	56	40	2
2.4072.05	8,7	18,9	2,700			36	34	2	0	59	34	7
2.4049.05	9,2			2,682					0	48	47	5
2.4077.05	6,9		2,753						0	51	42	7
2.4097.05	7,0	29,8	2,738						0	51	42	7
2.4021.05	8,9	20,2	2,677		1,922	36	33	3	2	54	37	7
2.4025.05	9,1	20,9			2,127							
2.4075.05	8,8	23,8			1,702							
2.4078.05	7,0	23,9			1,746							
2.4342.05	6,4	15,0			1,866							
2.4211.05	7,5	29,1			1,841							
2.4343.05	6,9	24,6			1,761							
2.4021.05	8,9	17,3			1,683							
2.4343.05	6,9	24,6			1,766							
2.4095.05	7,2	29,7			1,927							
2.4100.05	6,9	30,0			1,716							

continua

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de caracterização física

Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DNER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Conclusão
2.4525.05	9,5		2,647	2,674		34	27	7	1	47	44	8	
2.4520.05	10,0		2,736	2,637					2	58	40	0	
2.4524.05	11,0								8	77	15	0	
2.4002.05	8,9		2,693						5	53	36	6	
2.4011.05	11,1			2,744					1	51	43	5	
2.4016.05	11,1		2,735						1	64	28	7	
2.4055.05	11,2								1	53	40	6	
2.4006.05	11,0	14,4	2,713		1,917	34	30	4	1	60	32	7	
2.4030.05	11,1	20,9	2,737		1,931	33	29	4	1	60	32	7	
2.4033.05	10,9	13,1	2,738		2,255	31	22	9	2	61	30	7	
2.4038.05	7,0	14,5			2,073								
2.4038.05	7,0	14,3			1,904								
2.4088.05	10,8	18,5			2,104								
2.4202.05	10,5	10,7			2,141								
2.4071.05	11,2	16,6			1,940								
2.4037.05	8,9	10,0			2,211								
2.4035.05	11,1	12,3	2,747		2,050				1	57	35	7	

Valores médios dos resultados dos ensaios de caracterização obtidos com os solos das diferentes camadas podem ser encontrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores médios dos ensaios de caracterização física

Solo	Prof. (m)	w_{nat} (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_n (g/cm ³)	LL	LP	IP	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Marrom	1,7	23,5	2,700	1,786	46	32	14	1	34	45	21
Vermelho	2,5	28,6	2,764	1,552	44	35	9	0	35	56	8
Laranja	6,8	32,4	2,764	1,627	35	np	np	1	49	43	7
Amarelo	7,8	23,2	2,719	1,813	35	30	5	1	52	42	6
Branco	10,1	14,5	2,702	2,053	33	27	6	2	58	34	5

O peso específico dos grãos (γ_s) das amostras ao longo do perfil variou pouco. Por isso, os valores médios desta propriedade de cada camada foram utilizados para o cálculo dos demais índices físicos.

Os valores de limite de liquidez (LL) variaram de 33 a 46% ao longo de todo o talude. O limite de plasticidade (LP) situa-se na faixa de 27 a 35% para os solos Branco, Amarelo, Vermelho e Marrom. Os valores de limites de liquidez (LL) são maiores próximo à superfície e vão diminuindo a medida que a profundidade aumenta. O solo Laranja não apresenta limite de plasticidade. Com os resultados de limites de consistência e granulometria foi possível o cálculo do índice de atividade de Skempton da parcela fina dos solos.

Os índices físicos calculados conforme descrito no Capítulo 4 estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Índices físicos médios obtidos por correlação

Solo	Prof. (m)	G_s	γ_d (kN/m ³) ABNT	Índice de atividade de Skempton (I _a)	Índice de vazios (e)	Porosidade (n)	Grau de saturação (S)
Marrom	1,7	2,70	14,23	0,64	0,88	0,46	73,94
Vermelho	2,5	2,76	11,86	1,08	1,30	0,56	60,06
Laranja	6,6	2,76	12,06	np	1,27	0,56	71,04
Amarelo	7,8	2,72	14,49	1,03	0,85	0,46	73,54
Branco	10,6	2,70	17,61	0,83	0,51	0,34	76,05

Na Figura 5.1 estão superpostas as curvas granulométricas de cada um dos cinco solos estudados.

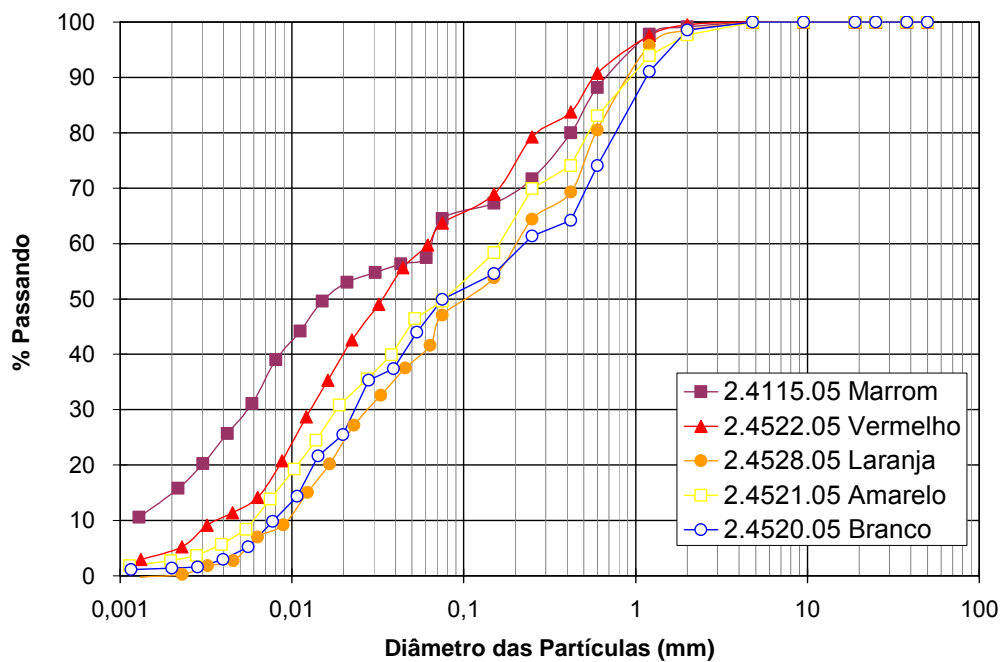
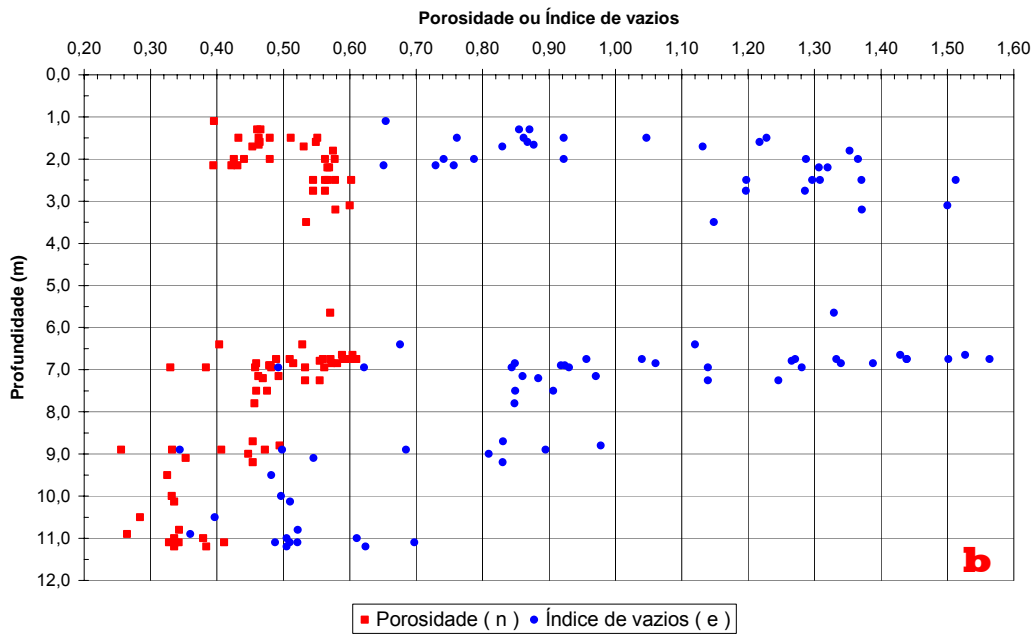
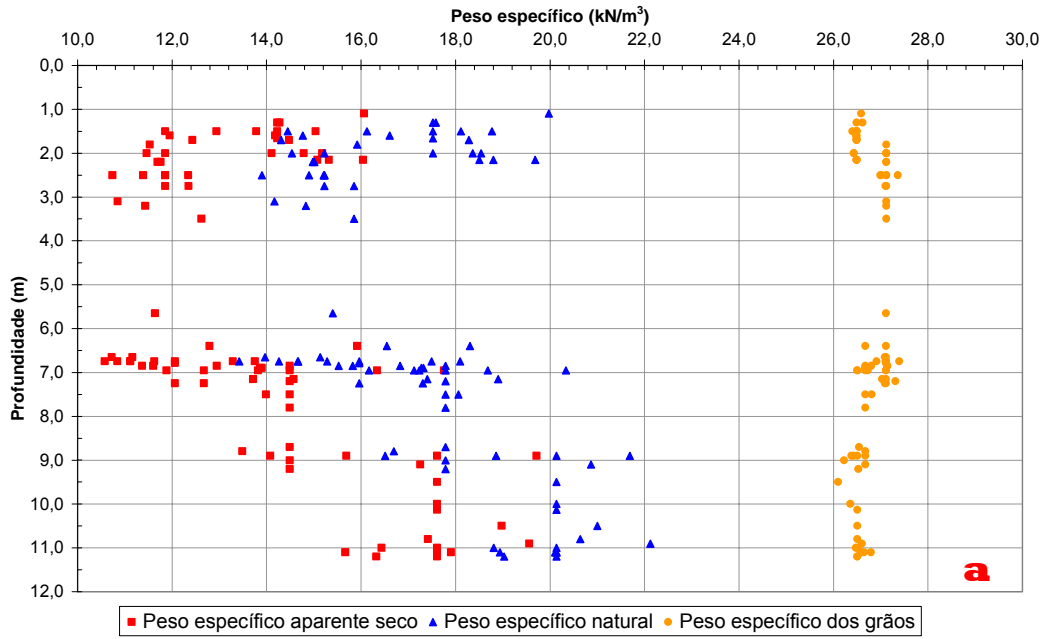


Figura 5.1 – Curvas granulométricas

Analisando-se a Figura 5.1, pode-se verificar que dentre os materiais ensaiados, os mais superficiais, Marrom e Vermelho, consistem em silte arenoso, enquanto os subsuperficiais, Laranja, Amarelo e Branco, são areias siltosas. É interessante observar que o solo Marrom é o único que apresenta quantidade significativa de argila e que a distribuição granulométrica dos solos Branco, Amarelo e Laranja é muito próxima.

Os dados dos ensaios de caracterização e os índices físicos das amostras indeformadas foram utilizados para estudar as propriedades dos solos do perfil ao longo de sua profundidade.

A Figura 5.2 mostra a variação dos diferentes parâmetros ao longo do perfil. Para tanto, foram considerados os dados da Tabela 5.1.



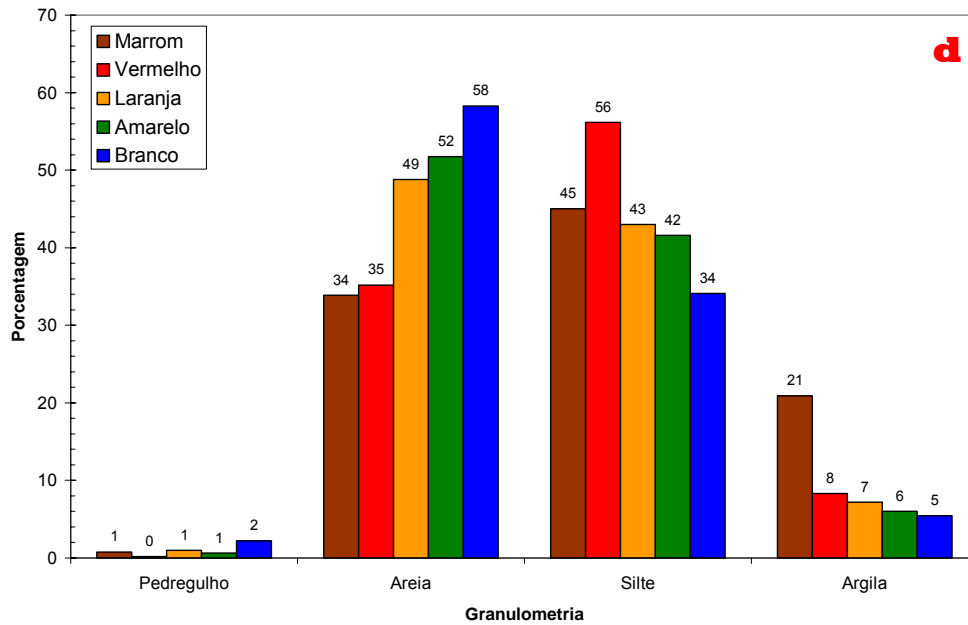
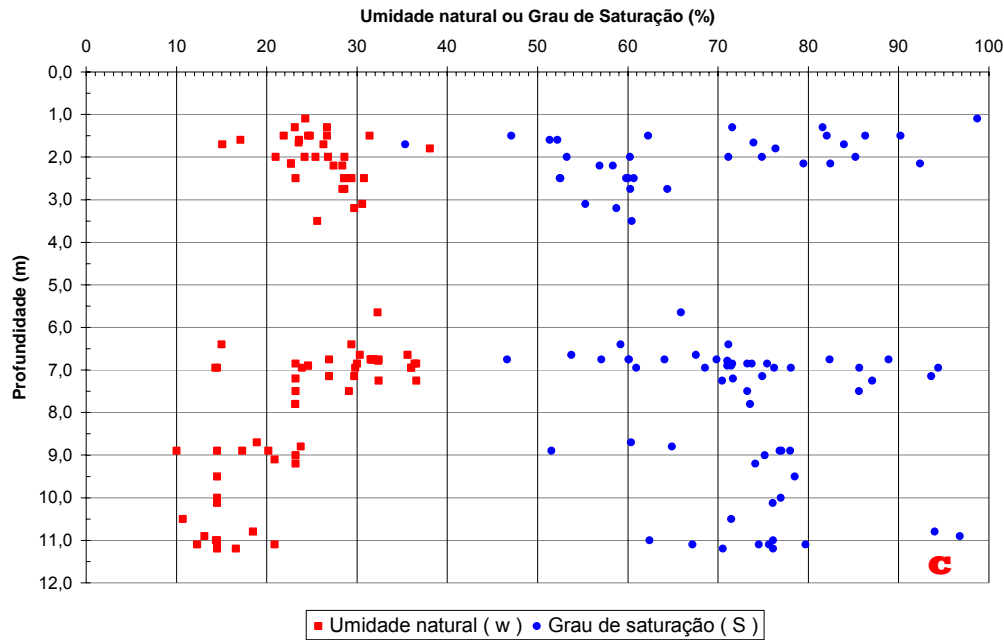


Figura 5.2 – Propriedades índice ao longo do perfil

Para os solos Vermelho e Marrom, o peso específico natural (γ_{nat}) mostra uma tendência de diminuição com o aumento da profundidade. Abaixo da profundidade de 6m, a tendência se inverte, podendo ser notado um crescimento (Figura 5.2a). Os valores de γ_{nat} oscilam entre 14 kN/m^3 e 20 kN/m^3 para todo o perfil. O peso específico dos grãos γ_s mantém-se praticamente constante, variando em torno da média de $26,55 \text{ kN/m}^3$.

A diminuição da densidade natural do solo com o aumento da profundidade nas camadas mais superficiais se reflete no índice de vazios e na

porosidade, que apresentam nitidamente uma tendência de aumentar junto com a profundidade nestas camadas do perfil. O comportamento inverso também é confirmado nos horizontes menos intemperizados (Figura 5.2b).

O teor de umidade natural w_{nat} (Figura 5.2c) aumenta com o aumento da profundidade nas camadas superficiais e decresce com o aumento da profundidade nas camadas mais inferiores (solos Laranja, Amarelo e Branco).

A Figura 5.2d traz as porcentagens correspondentes às frações granulométricas. Pode-se verificar que a composição do solo varia bastante ao longo do perfil. Nota-se que o teor médio de argila das amostras é decrescente com a profundidade. O mesmo acontece com o teor de silte, menos para o solo Marrom, onde se observa uma queda na parcela desta fração. A fração areia é encontrada em maior quantidade no solo Branco, o único também a apresentar quantidade considerável de pedregulho. Isto porque este solo é o que mais preserva as características da rocha matriz. Um teor um pouco menos significativo de material granular é encontrado nos solos Amarelo e Laranja. É possível observar no gráfico da Figura 5.2d que à medida que a profundidade aumenta, os teores de pedregulho e areia também aumentam enquanto os teores das frações mais finas, silte e argila, diminuem. A variação das propriedades ao longo do perfil possivelmente está associada à ação do intemperismo. O fato dos teores de pedregulho e areia se reduzirem em direção à superfície sugere que parte do material granular – a fração correspondente ao feldspato – teria sido intemperizada, aumentando a porcentagem de argila nos estratos mais superficiais.

Na Figura 5.3, pode se avaliar a atividade dos solos. O índice de atividade das argilas (I_a) foi determinado segundo proposta de Skempton a partir da equação:

$$I_a = \frac{IP}{\% < 2\mu m}$$

onde:

$\% < 2 \mu m$ = fração argila

A classificação segundo a fração argila presente no solo é dada por:

- $I_a < 0,75$ inativas
- $1,25 > I_a > 0,75$ atividade normal
- $I_a > 1,25$ ativas

A maioria das amostras de solo Marrom é classificada como “inativa”, enquanto algumas amostras de solo Amarelo são ativas e outras inativas. As demais possuem atividade normal.

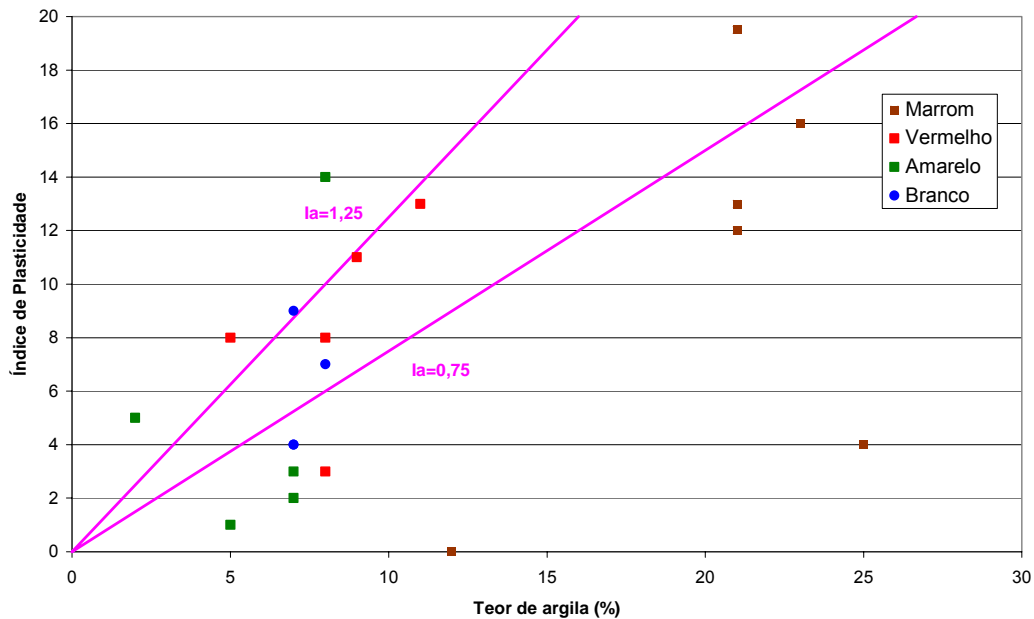


Figura 5.3 – Atividade dos solos

A Figura 5.4 apresenta a variação do peso específico aparente seco com o índice de vazios para as diferentes camadas de solo. Nota-se uma diminuição do índice de vazios com o aumento de γ_d . Os maiores valores de índices de vazios são encontrados nos solos Laranja e Vermelho. Já o solo com menor valor de índice de vazios é o solo Branco. De uma forma geral, o índice de vazios diminui com o aumento da profundidade. Esta tendência só não é verificada para o solo Marrom, o mais intemperizado, que apresenta uma faixa de índice de vazios situada abaixo da dos solos Laranja e Vermelho.

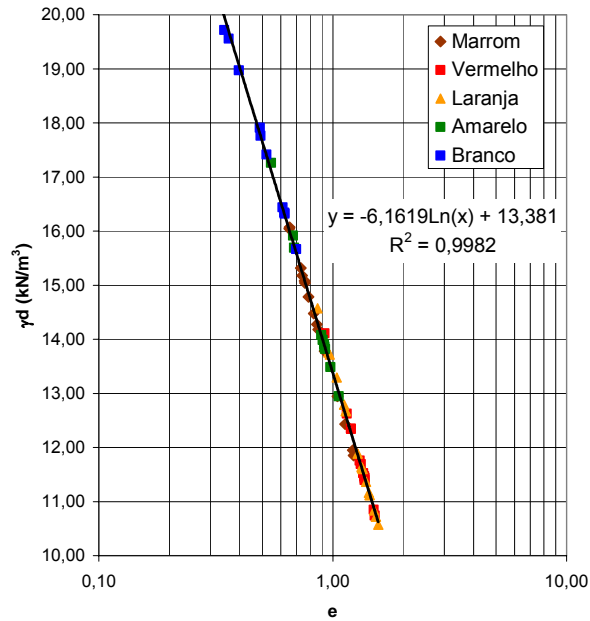


Figura 5.4 – Variação de γ_d com o índice de vazios

Considerando que a densidade relativa dos grãos (G_s) varia pouco ao longo do perfil, é esperada uma relação linear do grau de saturação (S) com a umidade (w_{nat}). A inclinação da reta é dada pelo inverso do índice de vazios médio. Na Figura 5.5 é possível observar esta tendência para os cinco solos estudados. Fica evidenciado no gráfico que, classificados da maneira como foram, os solos Laranja e Vermelho se confundem. Da mesma forma, o solo Amarelo ora se comporta como Branco e ora como Laranja. Além disso, nota-se que o solo Branco tem 3 comportamentos distintos, podendo então ter sido classificado como 3 materiais diferentes.

A Figura 5.6 propõe uma nova divisão dos diferentes solos com base na variação destes índices, que poderá ser utilizada em futuros trabalhos. As retas da figura cruzam os eixos na origem. A partir desta figura sugere-se que, num futuro trabalho os solos de um mesmo perfil sejam classificados não somente segundo seus aspectos morfológicos, mas utilizando também relações tais como a relação linear dos parâmetros grau de saturação e umidade, como a mostrada na figura.

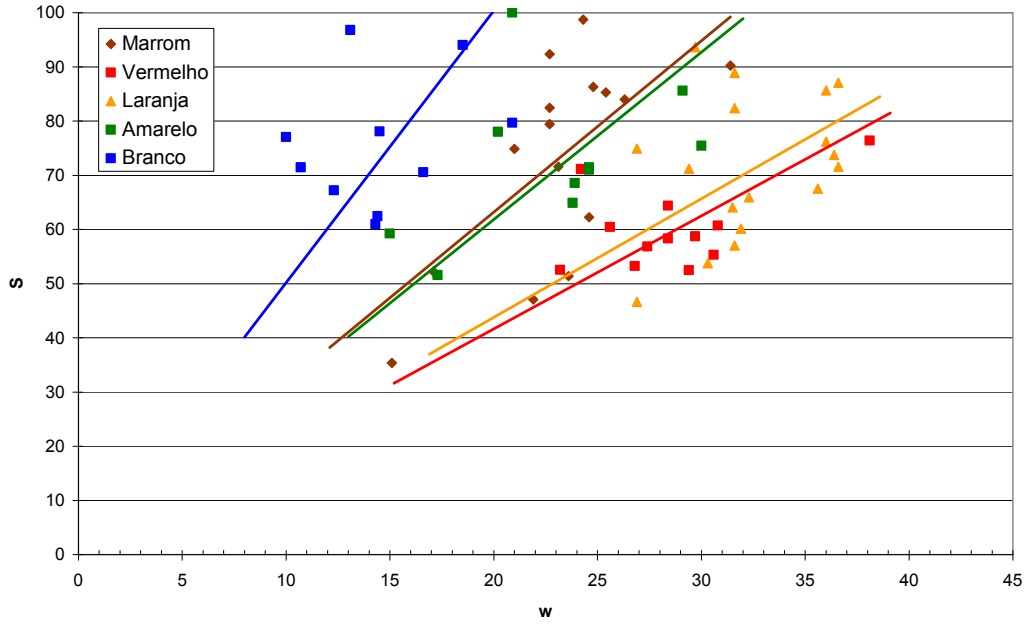


Figura 5.5 – Variação do grau de saturação com o teor de umidade para os 5 diferentes solos com suas respectivas tendências lineares

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

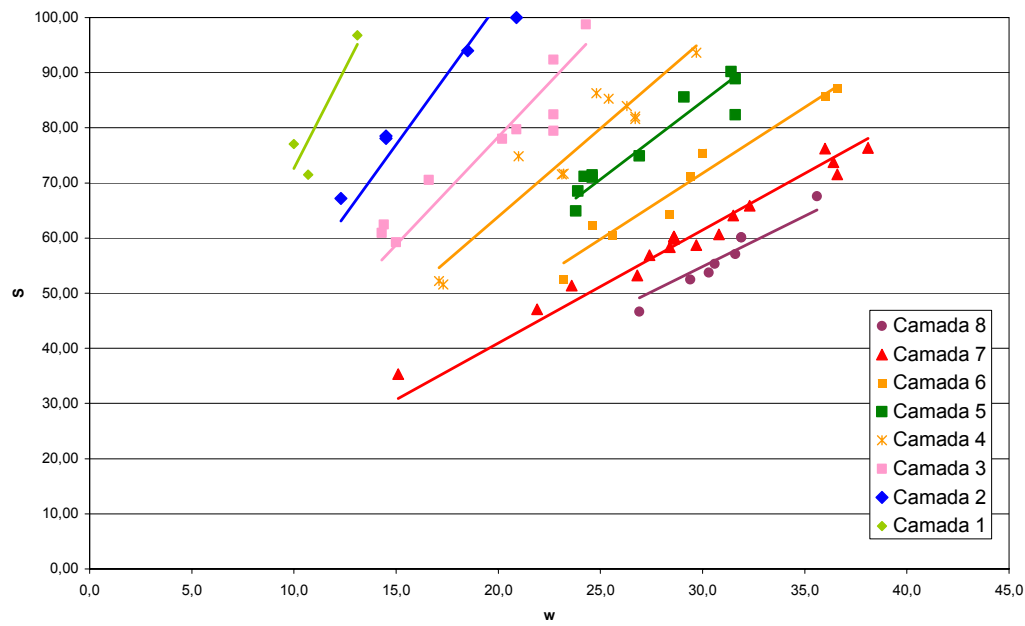


Figura 5.6 – Proposta de uma nova divisão das camadas com base na variação linear do grau de saturação com o teor de umidade

5.1.2. Porosimetria de mercúrio

Foram realizados ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio em amostras de solo e de rocha.

Na Figura 5.7a é apresentada a distribuição cumulativa dos diâmetros dos poros para os solos do perfil, e na Figura 5.7b para as rochas.

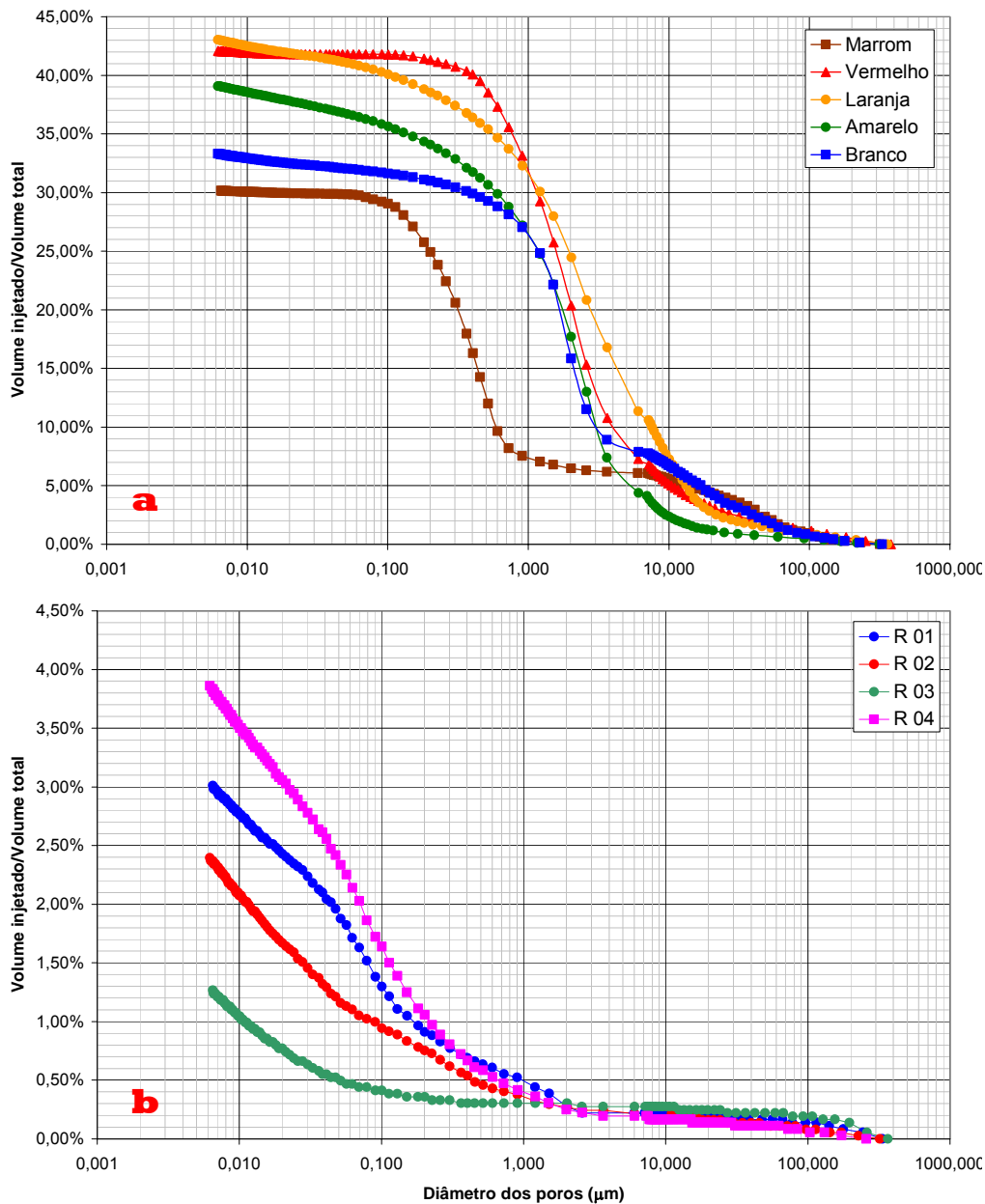


Figura 5.7 - Distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros (a) para os solos; (b) para as rochas

A porosidade dos solos e das rochas nos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio é representada pelas curvas de volume total de mercúrio injetado nas amostras versus o diâmetro dos poros. Devido a limitações do equipamento, não foi possível estudar a contribuição dos microporos menores que $0,0062 \mu\text{m}$, pois o nível de pressão aplicada só é capaz de gerar informações sobre os diâmetros maiores que este.

A Figura 5.7a mostra claramente que a porosidade nos solos do perfil estudado varia com a profundidade. De uma maneira geral, os solos mais profundos são menos porosos (Amarelo e Branco). Os solos Laranja e Vermelho apresentam uma porosidade maior e muito próximas entre si. No entanto, o solo Marrom, mais superficial, apresenta uma porosidade baixa, muito próxima da encontrada no solo Branco.

Na Figura 5.7b observa-se que o volume de poros nas rochas também varia com a profundidade. A amostra mais profunda, R 04, foi a que apresentou maior porosidade, confirmando mais uma vez a existência de um intemperismo diferencial neste perfil. Vale aqui ressaltar que as escalas verticais das Figuras 40a e 40b são diferentes. Dessa forma, vê-se que a rocha mais porosa, R 04, tem uma porosidade ainda 10 vezes menor que o solo Branco, o menos poroso.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de porosidade total obtidos para os solos e rochas nos ensaios de porosimetria. A porosidade total é obtida multiplicando-se o volume total injetado na amostra por grama de solo/rocha pelo peso específico seco do solo/rocha.

Tabela 5.4 – Porosidade por injeção de mercúrio

Solo/Rocha	Porosidade total por Hg (%)
Marrom	30,17
Vermelho	42,07
Laranja	43,01
Amarelo	39,09
Branco	33,29
R 01	3,02
R 02	2,39
R 03	1,27
R 04	3,85

Na Figura 5.8a tem-se a distribuição incremental dos diâmetros dos poros ao longo das camadas de solo enquanto na Figura 5.8b ao longo das camadas de rocha.

A classificação dos espaços porosos como macroporos, mesoporos e microporos ainda não é um consenso entre os diferentes autores.

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC)⁽¹⁾ propõe a seguinte relação:

Macroporos – poros de diâmetro maior que 0,5 μm ;

Mesoporos – poros de diâmetro entre 0,2 μm e 0,5 μm ;

Microporos – poros menores que 0,2 μm .

Por outro lado, Delage *et al.* (1996)⁽²⁾ classificam os poros como:

Grandes – poros de diâmetro superior a 50 μm ;

Médios – poros de diâmetro entre 0,5 μm e 50 μm ;

Pequenos – poros menores que 0,5 μm .

Martinez (2003)⁽³⁾, analisando os resultados de ensaios de porosimetria de mercúrio em solos provenientes de três jazidas de solos residuais tropicais situadas no estado da Paraíba propôs uma terceira classificação, denominando de macroporos os poros com diâmetro superior a 4 μm e de mesoporos os de diâmetro inferior a 4 μm .

Já Brewer (1976) classifica os poros segundo suas dimensões em:

Macroporos – poros maiores que 75 μm ;

Mesoporos – poros entre 30 e 75 μm ;

Microporos – poros entre 5 e 30 μm ;

Ultramicroporos – poros entre 0,1 e 5 μm ;

Criptoporos – poros menores que 0,1 μm .

A Tabela 5.5 apresenta de forma resumida estas três diferentes classificações encontradas na literatura.

Tabela 5.5 – Classificação dos espaços porosos.

Classificação	IUPAC ⁽¹⁾	Delage <i>et al.</i> (1996 <i>apud</i> Martínez, 2003) ⁽²⁾	Martínez (2003) ⁽³⁾
Macroporos	$\Phi > 0,5 \mu\text{m}$	$\Phi > 50 \mu\text{m}$	$\Phi > 4 \mu\text{m}$
Mesoporos	$\Phi > 0,2 \mu\text{m}$ $\Phi < 0,5 \mu\text{m}$	$\Phi > 0,5 \mu\text{m}$ $\Phi < 50 \mu\text{m}$	$\Phi < 4 \mu\text{m}$
Microporos	$\Phi < 0,2 \mu\text{m}$	$\Phi < 0,5 \mu\text{m}$	--

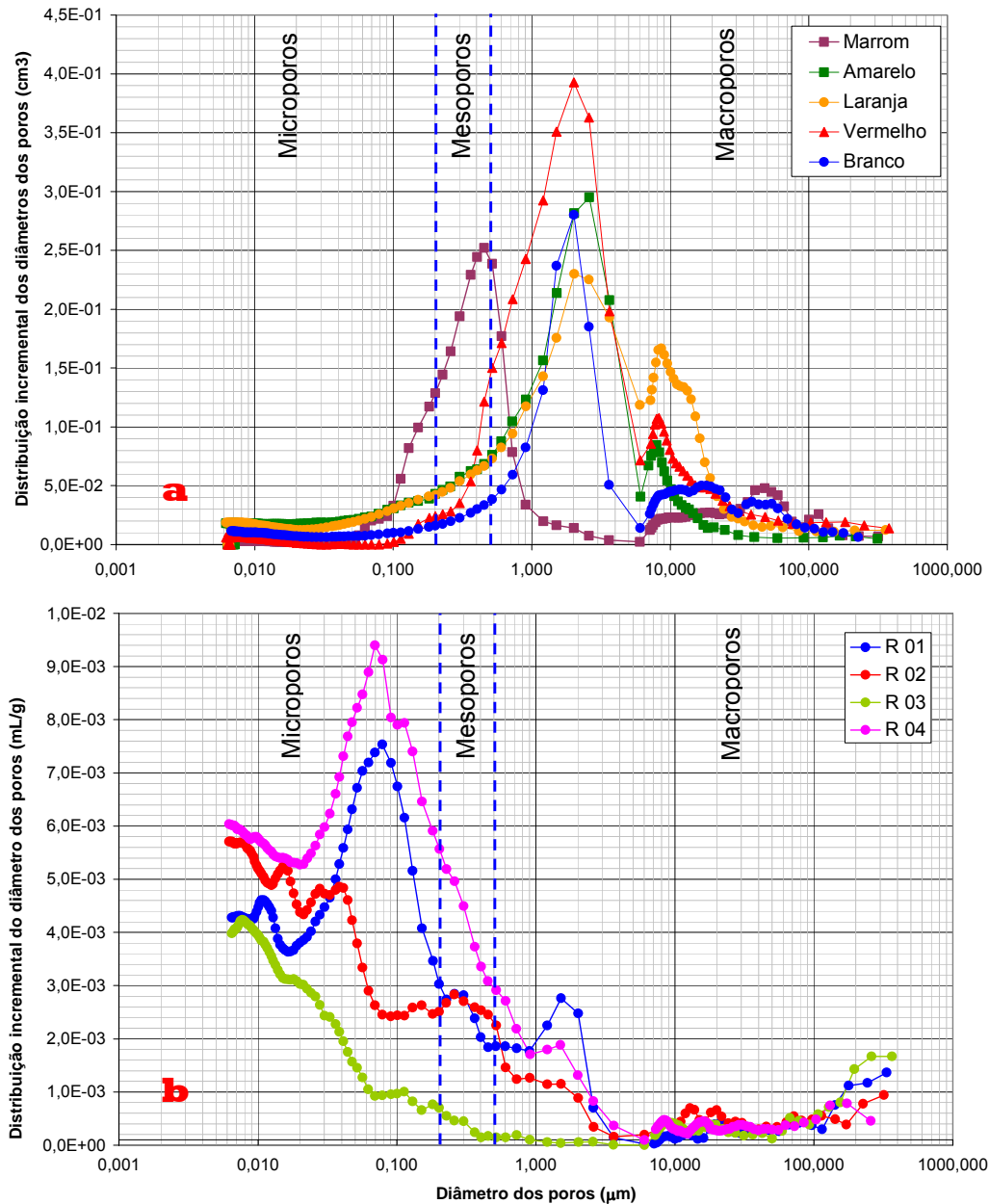


Figura 5.8 - Distribuição incremental dos diâmetros dos poros (a) para os solos; (b) para as rochas (as faixas de micro, meso e macroporos apresentadas no gráfico se referem a classificação da IUPAC)

Observa-se que para os solos estudados, a classificação que melhor se aplica é a da IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada. Isto porque apenas com esta classificação é possível diferenciar o comportamento do solo Marrom dos demais. Nota-se que no solo Marrom existe uma maior concentração de mesoporos enquanto nos demais ocorre a predominância de macroporos.

Conforme pode ser visto na Figura 5.8a, a distribuição do diâmetro dos poros para o solo Marrom se dá na forma bi-modal, ou seja, existe uma concentração de poros em dois diâmetros muito distintos. Este formato é característico de solos residuais intemperizados que apresentam poros entre partículas e poros entre agregados de partículas. Essa tendência já foi observada por outros autores em ensaios de porosimetria com solos residuais (e.g. Machado, 1998).

A partir dos resultados mostrados na Figura 5.8 é possível obter a porcentagem volumétrica de microporos, mesoporos e macroporos presentes nos solos estudados conforme Tabela 5.6.

A técnica de injeção de mercúrio para a determinação das dimensões de poros se mostra muito eficaz no estudo de solos residuais. Foi possível concluir que o solo mais intemperizado, ou seja, a camada de solo Marrom, apresenta uma porosidade muito próxima a da camada de solo menos intemperizada (solo Branco).

Tabela 5.6 - Distribuição de poros em porcentagem

Solo	Micro (%)			Meso (%)			Macro (%)	
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)
Marrom	15,6	54,0	79,3	42,4	38,5	20,7	42,0	7,5
Vermelho	1,8	7,8	75,6	6,0	87,9	24,4	92,2	4,3
Laranja	10,4	17,4	62,9	7,0	79,3	37,1	82,6	3,3
Amarelo	4,0	11,3	65,9	7,3	85,8	34,1	88,7	2,9
Branco	6,9	11,8	73,7	4,9	82,3	26,3	88,2	5,9

¹ IUPAC

² Delage *et al.* (1996)

³ Martinez (2003)

Camapum de Carvalho (2004) afirma que nos solos pouco intemperizados, a agregação entre as partículas é pequena, a estrutura é influenciada pela estrutura da rocha mãe e a distribuição de poros é relativamente homogênea (mono-modal). Nestes solos o nível de herança da rocha mãe depende do grau de alteração sofrido. Já nos solos profundamente intemperizados, a agregação é importante, a estrutura independe da origem (residual ou transportado) e é geralmente marcada por porosidade elevada que se distribui entre os agregados e no interior dos mesmos, conferindo ao solo uma distribuição de poros bi-modal. Mesmo sendo um solo ainda residual jovem, pela grande quantidade de minerais primários que apresenta, o solo Marrom estudado nesta dissertação já apresenta

uma distribuição de poros bi-modal, como a observada por Camapum de Carvalho (2004) em solos muito intemperizados.

Foi mostrado na Figura 5.4 que o índice de vazios diminui com o aumento da profundidade para os solos Branco, Amarelo, Laranja e Vermelho. Esta tendência só não foi verificada para o solo Marrom, o mais intemperizado, que apresentou uma faixa de índice de vazios situada abaixo da dos solos Laranja e Vermelho. Os gráficos de porosimetria de mercúrio concordam com esta tendência, pois indicam claramente uma diminuição dos macroporos no solo Marrom. Isto pode ser decorrente da migração de partículas sólidas que foram lixiviadas do solo maduro.

5.2. Caracterização química

5.2.1. Análise química total

A análise química total abrangeu amostras de solo e de rocha. Os resultados da análise química total para as amostras do perfil encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Análise química total por fluorescência de raios-X

Registro da Amostra	Solo/Rocha	Profundidade (m)	Índices químicos em % de peso										Índices de intemperismo			
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	PF(%)	ba	ba ₁	ba ₂
2.4113.05	Marrom	1,1	53,95	25,68	7,50	0,53	0,07	0,63	0,04	1,71	0,10	0,09	9,55	0,08	0,08	0,07
2.4523.05	Vermelho	2,0	54,46	25,06	8,23	0,59	0,07	0,74	0,05	1,65	0,15	0,10	8,70	0,08	0,07	0,08
2.4522.05	Vermelho	2,5	51,09	26,51	9,59	0,67	0,06	0,61	0,04	1,56	0,25	0,10	9,37	0,07	0,07	0,06
2.4528.05	Laranja	6,8	52,72	23,78	9,03	0,67	1,51	1,44	0,24	1,59	0,20	0,13	8,52	0,21	0,09	0,27
2.4527.05	Amarelo	7,2	59,79	20,51	5,84	0,56	3,38	1,15	1,42	1,70	0,10	0,08	5,29	0,51	0,20	0,45
2.4526.05	Amarelo	7,5	64,29	19,63	3,88	0,40	2,26	1,04	1,43	2,19	0,06	0,06	4,56	0,45	0,24	0,35
2.4521.05	Amarelo	9,0	71,14	16,10	2,92	0,32	1,93	0,66	1,55	1,39	0,03	0,05	3,70	0,47	0,25	0,33
2.4525.05	Branco	9,5	68,51	17,75	2,98	0,31	2,00	0,87	1,10	2,49	0,03	0,05	3,74	0,46	0,25	0,33
2.4520.05	Branco	10,0	69,07	17,00	2,87	0,33	2,19	0,75	1,63	2,35	0,03	0,05	3,46	0,55	0,31	0,35
2.4524.05	Branco	11,0	70,57	14,05	3,67	0,35	3,12	1,28	2,62	1,46	0,06	0,06	2,53	0,83	0,42	0,65
R 01	Rocha	19,9	71,78	14,88	2,11	0,17	2,06	0,34	3,86	3,89	0,03	0,06	1,20	0,97	0,71	0,32
R 02	Rocha	24,4	65,44	17,60	3,90	0,24	4,07	0,78	4,80	1,64	0,06	0,13	1,54	0,98	0,55	0,54
R 03	Rocha	25,5	61,98	16,13	5,95	0,33	5,41	2,59	4,29	1,67	0,13	0,23	1,49	1,17	0,55	1,03
R 04	Rocha	25,8	66,09	16,52	3,65	0,21	4,31	1,26	4,41	2,14	0,07	0,15	1,25	1,06	0,58	0,68

Dentre as cinco amostras de rocha obtidas por sondagem rotativa, a R01 (profundidade - 19,9m) foi considerada como representante menos alterada do perfil estudado. Esta escolha está baseada no índice ba_1 de intemperismo químico bem como nas características petrográficas e estruturais observadas em lâminas delgadas.

Os índices de intemperismo químicos apresentados na Tabela 5.7 foram calculados conforme descrito no Capítulo 2. Os resultados analíticos obtidos, para o solo e a rocha (Figura 5.9), mostram a intensidade do intemperismo químico que, juntamente com os outros tipos de intemperismo, formou o solo residual de granito-gnaissé estudado. Os índices são, em geral, maiores na rocha do que no solo.

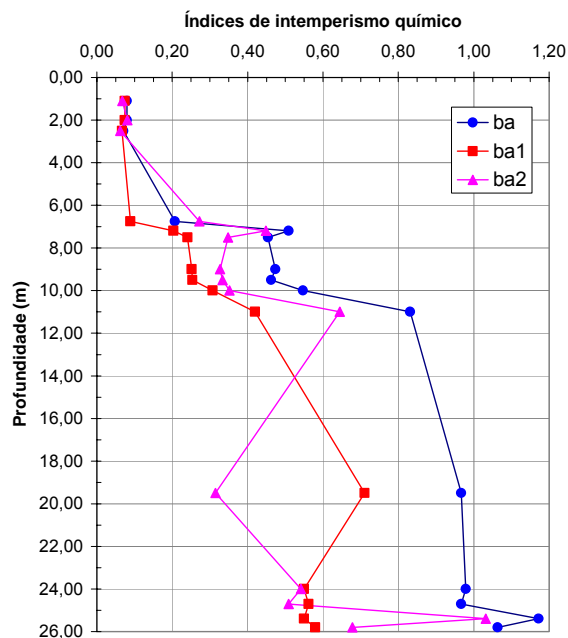


Figura 5.9 – Variação dos principais índices químicos do perfil estudado ao longo da profundidade

Para efeitos de correlações nesta dissertação, o índice de intemperismo utilizado foi o ba_1 . Isto porque o perfil de solo em questão provém de rochas ácidas e, portanto, suas quantidades de potássio e sódio são mais representativas que os teores de cálcio e magnésio (Antunes, 2006). Considerando-se os dados apresentados na Tabela 5.1, é possível traçar o gráfico da Figura 5.10 onde se verifica que o solo residual de granito-gnaissé estudado neste trabalho apresenta um comportamento coerente com os percentuais de argila e o índice de intemperismo ba_1 . De uma forma geral, observa-se que um aumento no percentual de argila corresponde a um aumento no grau de intemperismo, indicado pela diminuição do índice ba_1 (Figura 5.10).

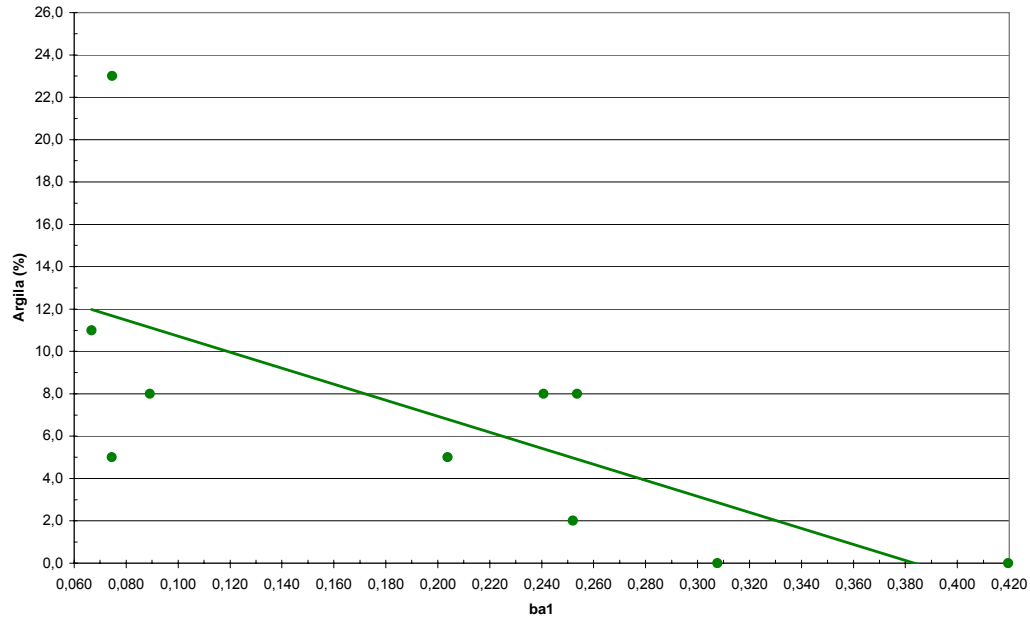


Figura 5.10 – Teor de argila x índice de intemperismo ba_1 ao longo do perfil

Estando diretamente relacionado com o grau de intemperismo de um solo, a variação ao longo da profundidade do índice de perda ao fogo (P.F.) mostra a evolução do intemperismo num dado perfil. A Figura 5.11 mostra esta variação e indica uma forte tendência de evolução do intemperismo com a diminuição da profundidade.

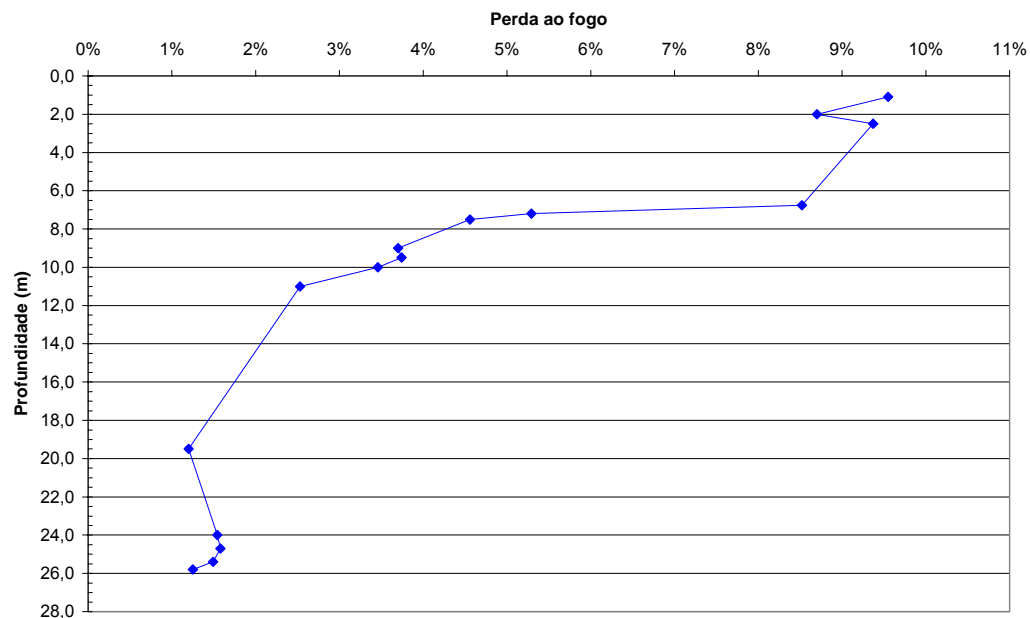


Figura 5.11 – Variação do índice de perda ao fogo ao longo da profundidade

As variações da fração fina (silte e argila) ao longo da profundidade estão apresentadas na Figura 5.12.

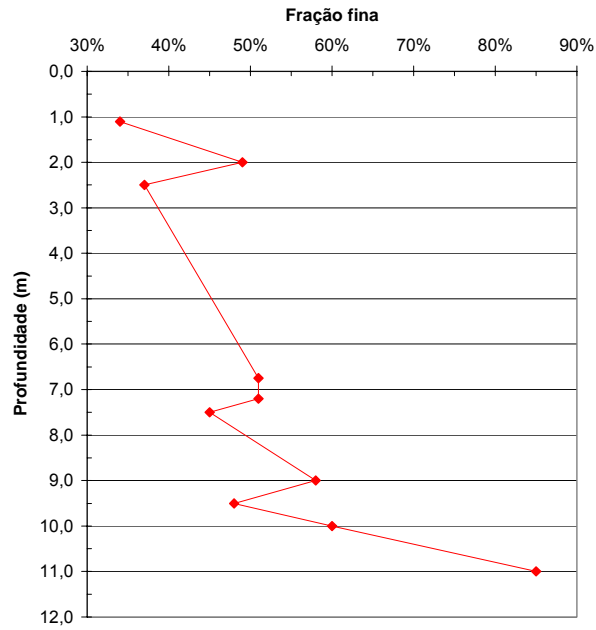


Figura 5.12 – Variação da fração fina do solo ao longo da profundidade

5.2.2. Análise química parcial

As análises químicas parciais compreenderam a análise química por ataque sulfúrico e complexo sortivo. Os ensaios foram realizados apenas em amostras de solo. Informações específicas sobre a execução dos ensaios podem ser encontradas no Capítulo 4. Os resultados da análise química parcial dos solos estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Análise química parcial – complexo sortivo e ataque sulfúrico

Registro da amostra	Solo	Profundidade (m)	Complexo sortivo			Valor S (Soma)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T (Soma)
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺				
2.4116.05	Marrom	1,10	0,70	0,08	0,01	0,8	2,70	6,39	
2.4523.05	Vermelho	2,00	0,20	0,09	0,02	0,3	2,00	4,11	
2.4522.05	Vermelho	2,50	0,60	0,10	0,01	0,7	2,00	3,71	
2.4528.05	Laranja	6,75	0,30	0,10	0,02	1,2	1,70	4,52	
2.4527.05	Amarelo	7,20	1,70	0,09	0,02	2,7	0,80	4,71	
2.4526.05	Amarelo	7,50	4,30	0,80	0,06	5,2	0,20	6,43	
2.4521.05	Amarelo	9,00	1,40	1,20	0,04	2,7	0,00	3,70	
2.4525.05	Branco	9,50	2,00	0,40	0,11	2,6	0,10	3,25	
2.4520.05	Branco	10,00	1,70	0,30	0,04	2,1	0,00	2,92	
2.4524.05	Branco	11,00	1,90	0,30	0,06	2,3	0,10	3,01	

Registro da amostra	Solo	Profundidade (m)	Superfície Específica (S.E.)	Ataque sulfúrico			SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (Ki)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (Kf)
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃		
2.4116.05	Marrom	1,10	49,87	196	199	47	2,9	1,45
2.4523.05	Vermelho	2,00	32,08	200	194	99	6,4	1,32
2.4522.05	Vermelho	2,50	28,95	80	49	23	1	2,13
2.4528.05	Laranja	6,75	35,28	76	59	25	3,1	1,72
2.4527.05	Amarelo	7,20	36,76	52	38	18	2,1	1,78
2.4526.05	Amarelo	7,50	50,18	46	29	19	1,7	1,89
2.4521.05	Amarelo	9,00	28,88	111	103	25	1,7	1,59
2.4525.05	Branco	9,50	25,36	88	58	28	1,3	1,97
2.4520.05	Branco	10,00	22,79	101	91	18	2,1	1,67
2.4524.05	Branco	11,00	23,49	88	59	28	1,3	1,94

A soma das concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ é denominada soma de bases (S). Somando-se o Al^{3+} , ao valor de S tem-se a capacidade de troca de cátions efetiva. Se ainda se somar o hidrogênio à capacidade de troca de cátions efetiva tem-se a capacidade de troca de cátions a pH7 (T ou CTC). A partir deste valor é possível calcular a superfície específica do solo conforme segue:

$$S.E. = 7,8043 \times T \quad (\text{VIII})$$

A área de superfície é uma função direta do tamanho e forma do grão sendo esta associada à mineralogia do solo. As cargas de superfície ocorrem em função de substituições isomórficas no reticulado cristalino e da ionização de grupos funcionais. No caso de minerais de dimensão relativamente grandes, como é o caso do quartzo, a reatividade será mínima, pois as substituições isomórficas não existem e a superfície específica é pequena. Assim, nos solos arenosos, a interação entre as partículas será predominantemente de natureza gravitacional, enquanto a interação entre a água e a partícula vizinha será de natureza predominantemente capilar.

Os solos argilosos por sua vez apresentam alta reatividade, devido à superfície específica elevada e à ocorrência de substituições isomórficas no reticulado cristalino. Nestes solos a superfície do mineral encontra-se recoberta por uma solução eletrolítica de água e a interação mineral-mineral se dá por meio desta camada de hidratação.

As relações moleculares K_i e K_r são comumente usadas para indicar o grau de alteração dos solos. Quanto maior o valor de K_i , menor o grau de intemperização do solo. Sabendo-se que alguns solos lateríticos costumam apresentar valores de K_i da ordem de 0,4, pode-se concluir que o solo mais intemperizado estudado nesta dissertação é ainda um solo em processo de alteração. A variação dos índices K_i e K_r ao longo do perfil pode ser observada na Figura 5.13.

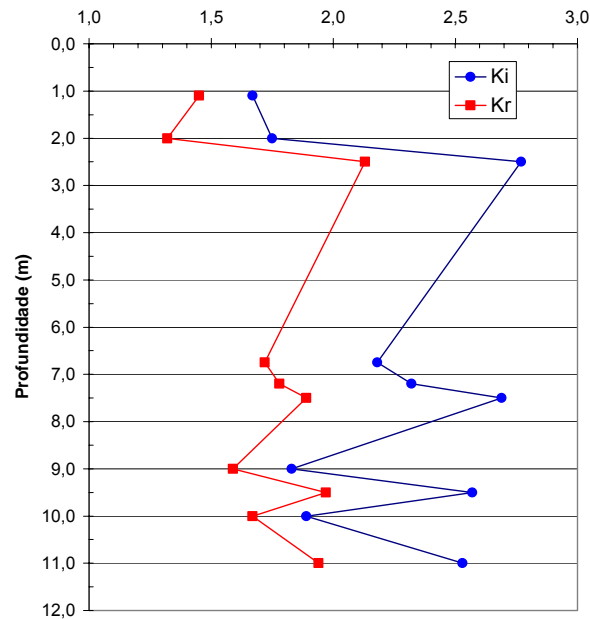


Figura 5.13 – Variação de Ki e Kr com a profundidade

5.2.3. PH e matéria orgânica

Foi determinado o pH em água e em KCl, bem como o teor de matéria orgânica, por duas diferentes metodologias, para amostras de solo de todo o perfil. Para as amostras de rocha foi determinado apenas o pH em água. Os resultados destas análises estão apresentados na Tabela 5.9

O pH em água e em cloreto de potássio mede o índice de acidez do solo. É possível observar assim que trata-se de um perfil de solo ácido. Diminuindo-se o pH em água do pH em KCl obtém-se um valor de ΔpH com o qual é possível saber se a carga líquida predominante nos colóides é negativa, nula ou positiva. Para todos os solos ensaiados o valor de ΔpH é negativo. Isto significa que nestes solos há predominância de cargas negativas, ou seja, a capacidade de reter cátions (cálcio, magnésio, potássio e sódio) é maior que a de reter ânions (sulfato, nitrato, fosfato e cloreto).

Em meios tropicais, a rápida degradação da matéria orgânica gera soluções de alteração levemente ácidas. Nesta faixa de pH o alumínio e o ferro são insolúveis, enquanto os elementos alcalinos e alcalinos terrosos (sódio, potássio, cálcio, magnésio etc.) são muitas vezes totalmente lixiviados. A sílica também é mobilizada, embora em menor velocidade.

Tabela 5.9 – pH e matéria orgânica

Registro da amostra	Solo/Rocha	Profundidade (m)	pH		C (orgânico) g/kg	Matéria Orgânica por oxidação com bicromato de potássio (g/kg) método EMBRAPA	Matéria Orgânica por mufla a 400° (%)
			Água	KCl 1N			
2.4116.05	Marrom	1,10	4,90	3,90	3,3	5,6	
2.4495.05	Marrom	2,00					2,54
2.4523.05	Vermelho	2,00	5,10	4,40	0,4	0,7	3,07
2.4522.05	Vermelho	2,50	5,10	4,30	0,6	1,0	2,34
2.4528.05	Laranja	6,75	5,10	4,30	0,4	0,7	1,53
2.4527.05	Amarelo	7,20	5,60	4,10	0,5	0,9	1,42
2.4526.05	Amarelo	7,50	5,90	4,10	0,5	0,9	1,38
2.4521.05	Amarelo	9,00	5,70	4,70	0,4	0,7	1,36
2.4525.05	Branco	9,50	6,00	4,30	0,5	0,9	0,83
2.4520.05	Branco	10,00	6,00	4,90	0,4	0,7	0,98
2.4524.05	Branco	11,00	5,80	4,10	0,8	1,4	
R 01	Rocha	19,9	8,71				
R 02	Rocha	24,4	9,53				
R 03	Rocha	25,5	9,38				
R 04	Rocha	25,8	9,65				

A Figura 5.14 mostra a variação do pH ao longo do perfil de solo estudado.

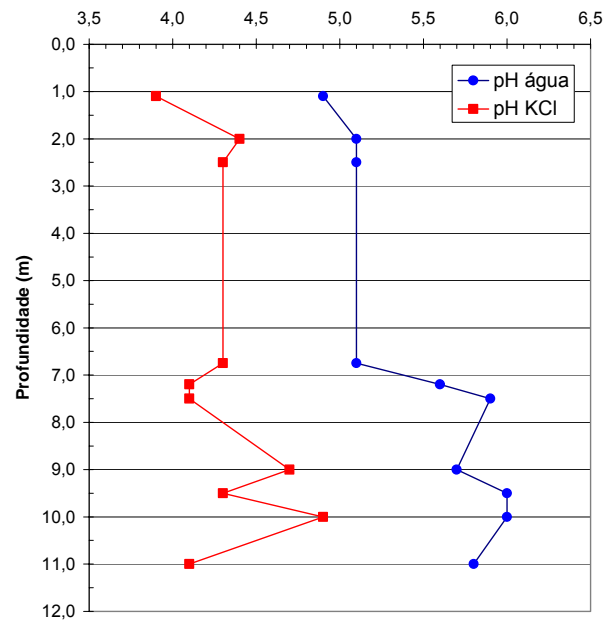


Figura 5.14 – Variação do pH dos solos com a profundidade

A matéria orgânica sob condições climáticas apropriadas tem papel importante na evolução pedogenética, propiciando as condições ideais de pH para a transformação mineralógica. Pela análise do carbono orgânico é possível estimar o teor de matéria orgânica no solo multiplicando-se a quantidade de carbono por 1,72. A EMBRAPA - Solos determina o carbono orgânico por oxidação via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico. Apenas o solo Marrom apresenta uma quantidade relevante de matéria orgânica.

A Figura 5.15 apresenta a variação da porcentagem de matéria orgânica nos solos ao longo da profundidade. Utilizando-se a metodologia da EMBRAPA-Solos, pouca diferença foi notada no teor de matéria orgânica para os diferentes solos. Já pela determinação a partir da mufla, nota-se que o teor de matéria orgânica decresce com o aumento da profundidade.

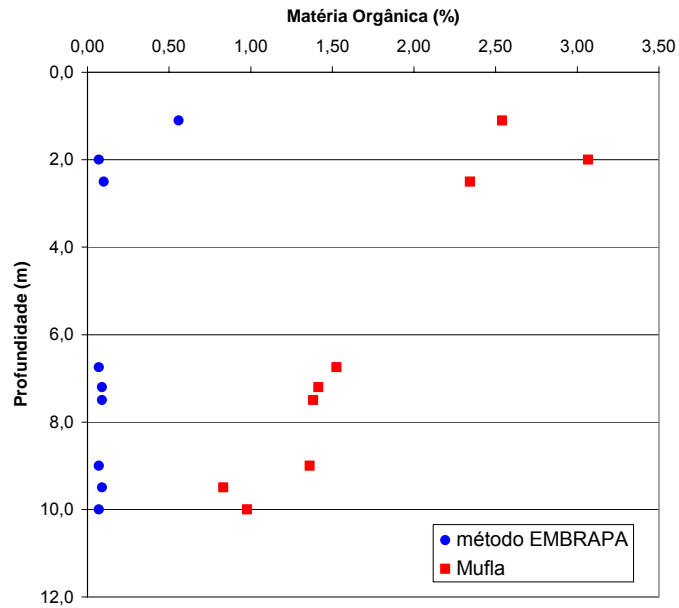


Figura 5.15 – Variação da porcentagem de matéria orgânica com a profundidade

5.3. Análises mineralógicas e microestruturais

5.3.1. Observação em lupa binocular

A partir de observações em lupa binocular, foram identificados os minerais presentes nas amostras de solo coletadas ao longo do perfil. A descrição obtida a partir desta análise encontra-se na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Caracterização mineralógica do material retido na peneira nº 200 (frações pedregulho e areia)

Registro da amostra	Solo	Descrição
2.4523.05 2.4522.05	Vermelho	Apresenta muitas concreções de manganês identificadas por pontos pretos. É uma amostra diferente das demais. O quartzo apresenta-se de forma limpa enquanto o feldspato apresenta-se em tons alaranjados. Trata-se de uma amostra com quantidade significativa de ferro precipitado. Com o auxílio de um imã foi possível perceber a grande presença de magnetita na amostra.
2.4528.05	Laranja	Apresenta grande quantidade de quartzo. Pode-se observar todos os grãos de feldspatos tingidos pelo ferro, em tons alaranjados. Apresenta concreções de manganês.
2.4527.05 2.4526.05 2.4521.05	Amarelo	Apresenta traços de mineral preto, concreções de óxido de manganês, pois fervem na presença de água oxigenada. Apresenta grande quantidade de quartzo que na fração ligeiramente mais grossa se mostra em tons amarelados devido à presença de óxido de ferro. Apresenta também inclusões de quartzo cinzento, arestado, com aspecto vítreo, sem sinais de transporte na fração ligeiramente mais grossa. De uma forma geral apresenta muitos fragmentos de feldspato alterado de coloração branca leitosa. Estes fragmentos estão possivelmente se transformando em caolinita, pois são identificados em maior quantidade na fração mais fina do material. Alguns fragmentos de feldspato alterado observados na fração fina já se encontram tingidos pelo ferro.
2.4525.05 2.4520.05 2.4524.05	Branco	Semelhante à amostra anterior, com granulometria mais grossa. É possível identificar também traços de biotita, representados por pontos pretos.

5.3.2. Difração de raios-X

A mineralogia dos solos em estudo foi determinada utilizando o método da difratometria de raios-X. As análises por difração de raios-X foram realizadas tanto em amostras de solo quanto de rocha. Informações específicas sobre a execução destas análises podem ser encontradas no Capítulo 4. Em um difratograma, picos estreitos, simétricos e bem definidos (mais intensos) caracterizam mineral com estrutura cristalina bem definida, podendo indicar

ainda uma maior porcentagem deste mineral na amostra. Os minerais podem ser identificados ainda por picos menos intensos e largos e como mineral traço.

A seguir estão apresentados os difratogramas representativos das cinco camadas de solo bem como das quatro camadas de rocha identificadas no Capítulo 3. Um resumo dos minerais identificados na difratometria de raios-X é apresentado na Tabela 5.11.

Na amostra de solo Branco foi feito tratamento por glicolagem e aquecimento para permitir melhor identificação do mineral expansivo (esmectita) como mostra a Figura 5.20.

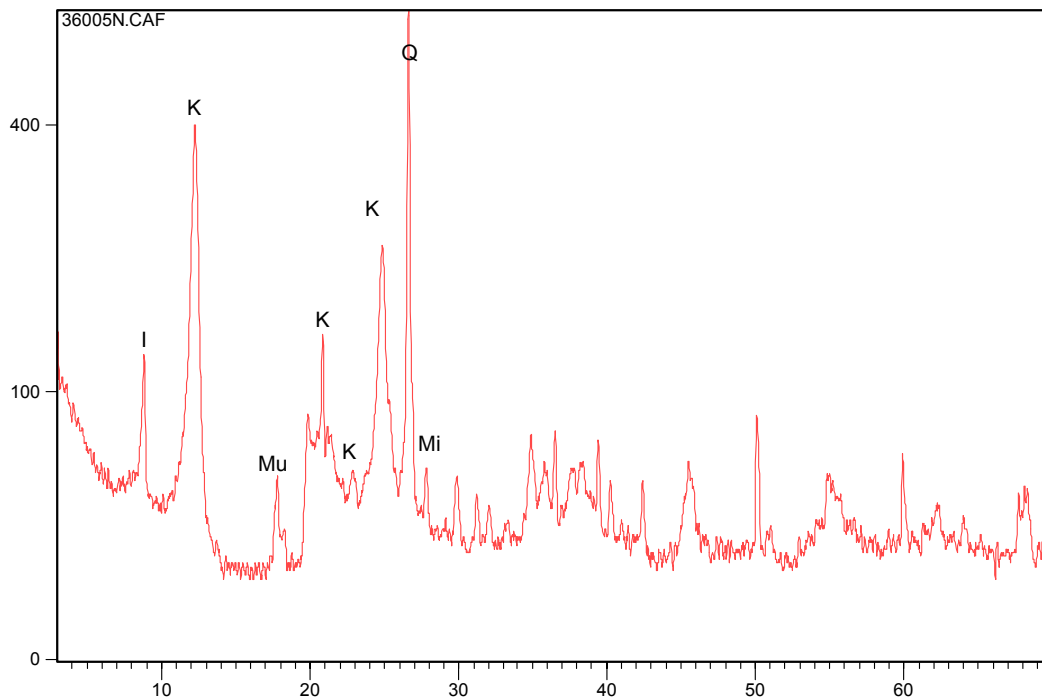


Figura 5.16 - Difratograma do solo Marrom (fração silte - amostra 2.4108.05) sem tratamento. I – Ilita; K – Caolinita; Mu – Muscovita; Q – Quartzo; Mi - Microclina

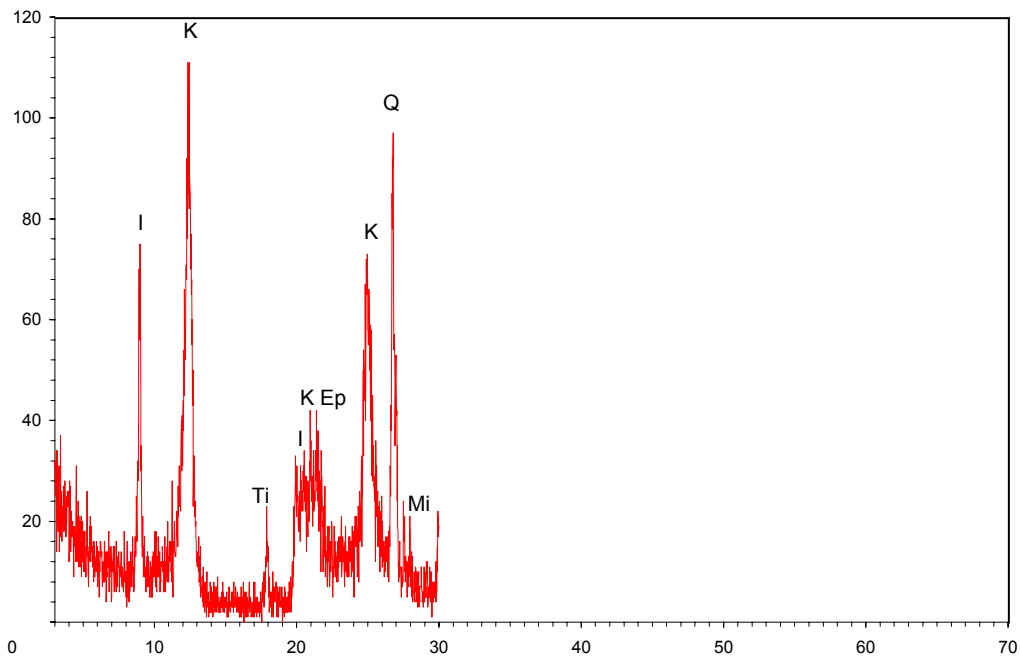


Figura 5.17 – Difratograma do solo Vermelho (fração argila - amostra 2.4523.05) sem tratamento. I – Ilita; K – Caolinita; Ti – Titanita; Ep – Epidoto; Q – Quartzo; Mi – Microclina

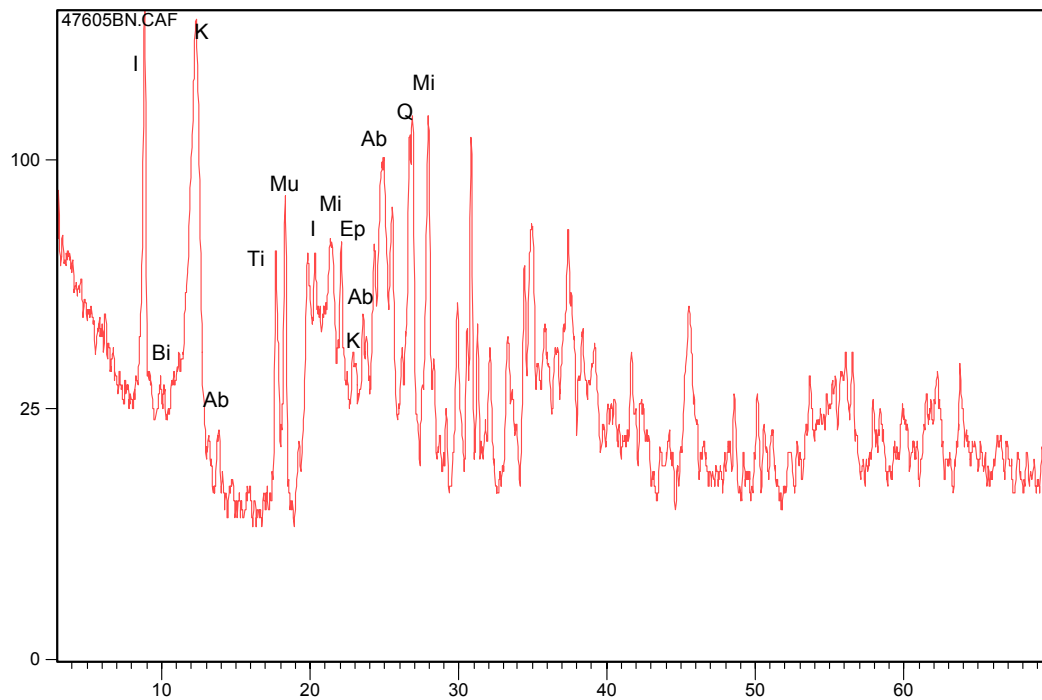


Figura 5.18 – Difratoograma do solo Laranja (fração silte - amostra 2.4528.05) sem tratamento. I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albite; Ti – Titanita; Mu – Muscovita; Mi – Microclina; Ep – Epidoto; Q - Quartzo

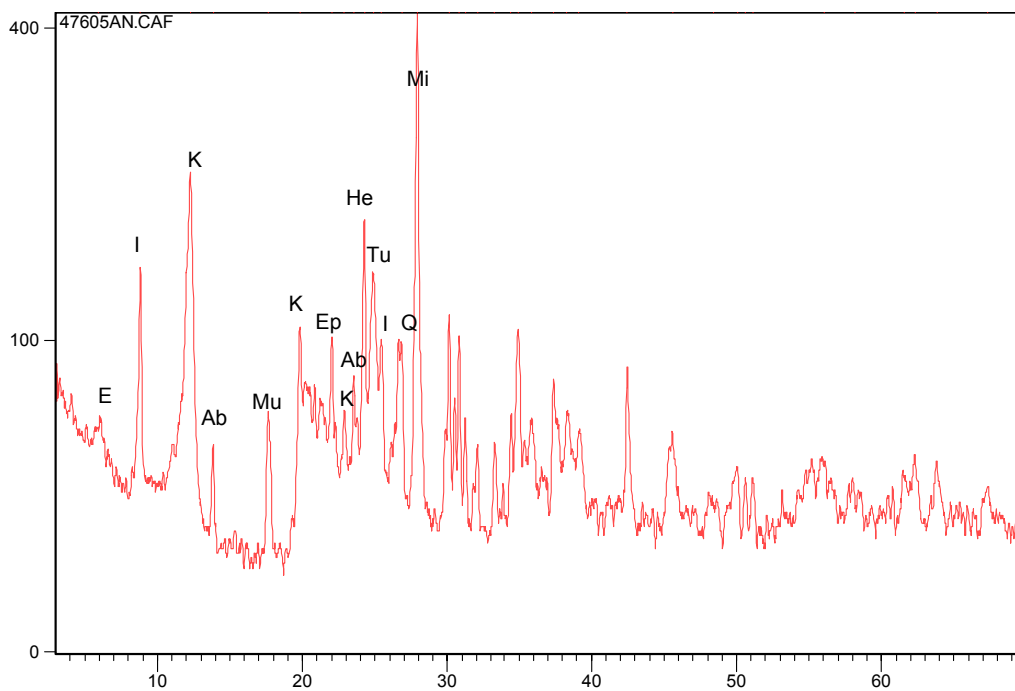


Figura 5.19 – Difratoograma do solo Amarelo (fração silte - amostra 2.4521.05) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; K – Caolinita; Ab – Albite; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Tu – Turmalina; Q – Quartzo; Mi - Microclina

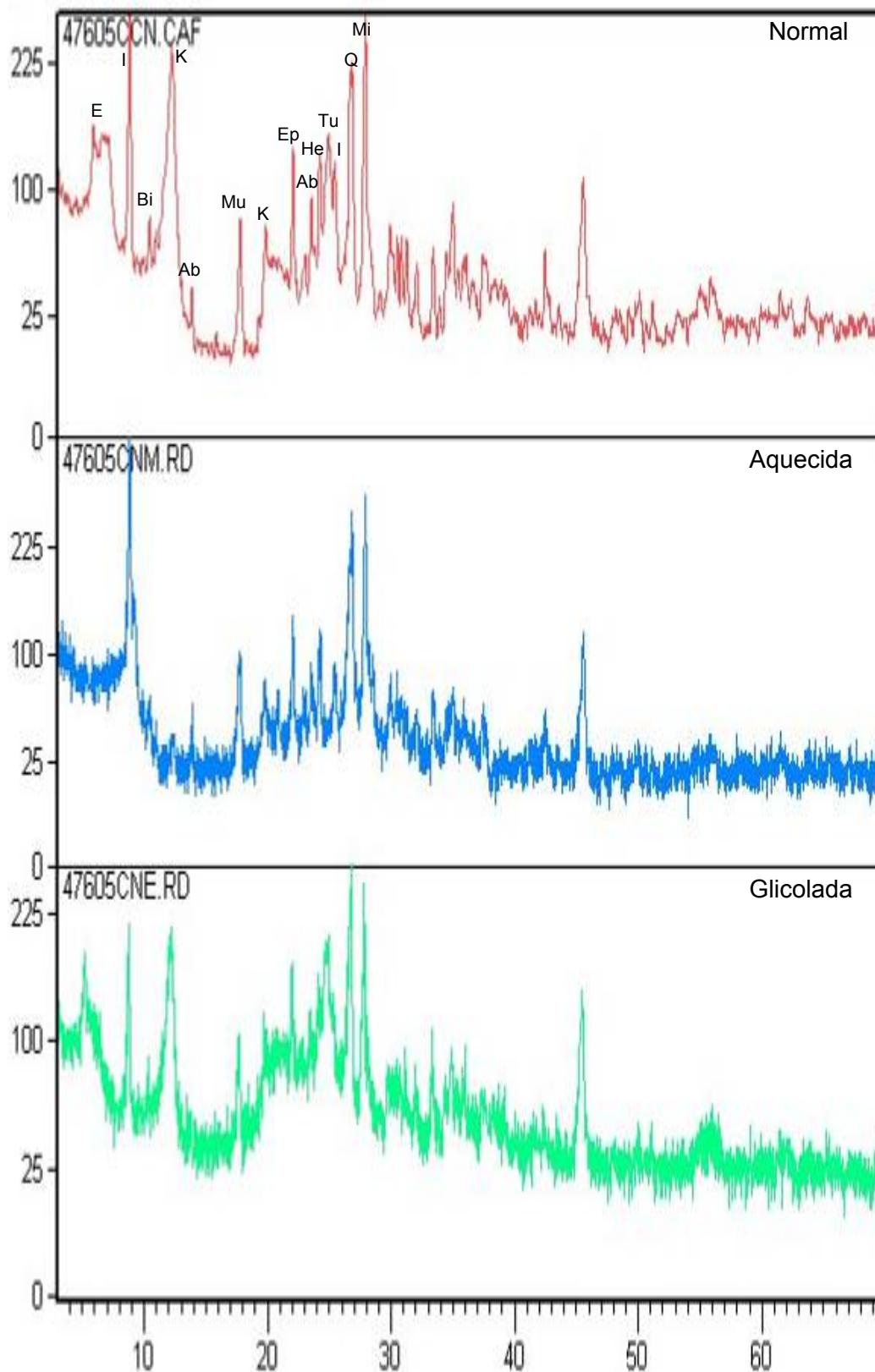


Figura 5.20 – Difratoograma do solo Branco (fração silte - amostra 2.4524.05) com tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Tu – Turmalina; Q – Quartzo; Mi - Microclina

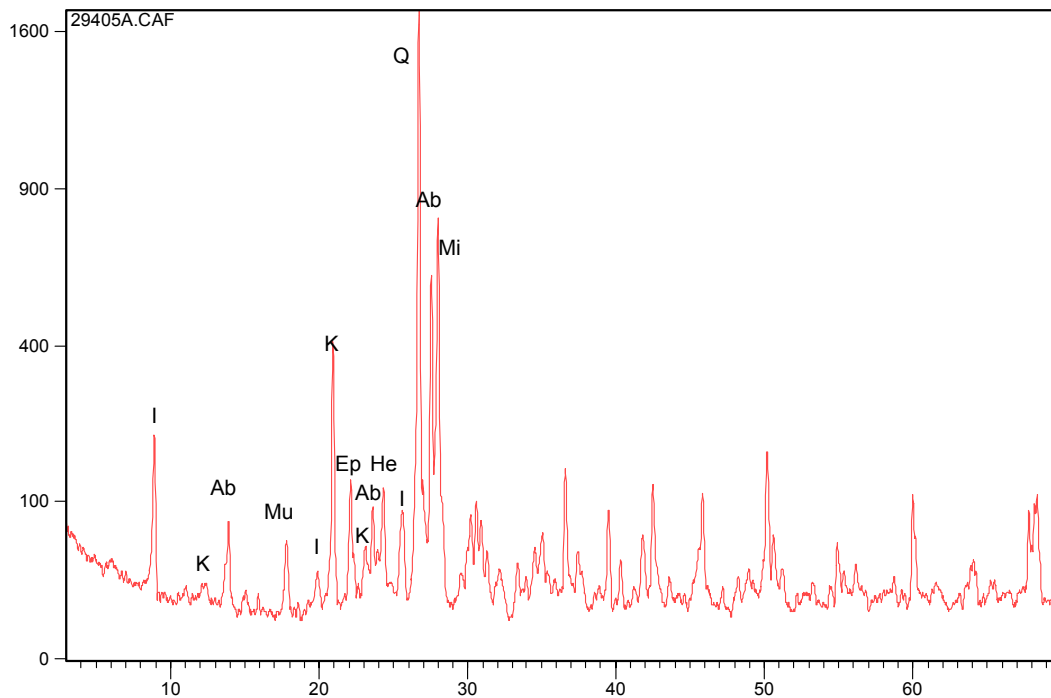


Figura 5.21 – Difratograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 01) sem tratamento. I – Ilita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Q – Quartzo; Mi - Microclina

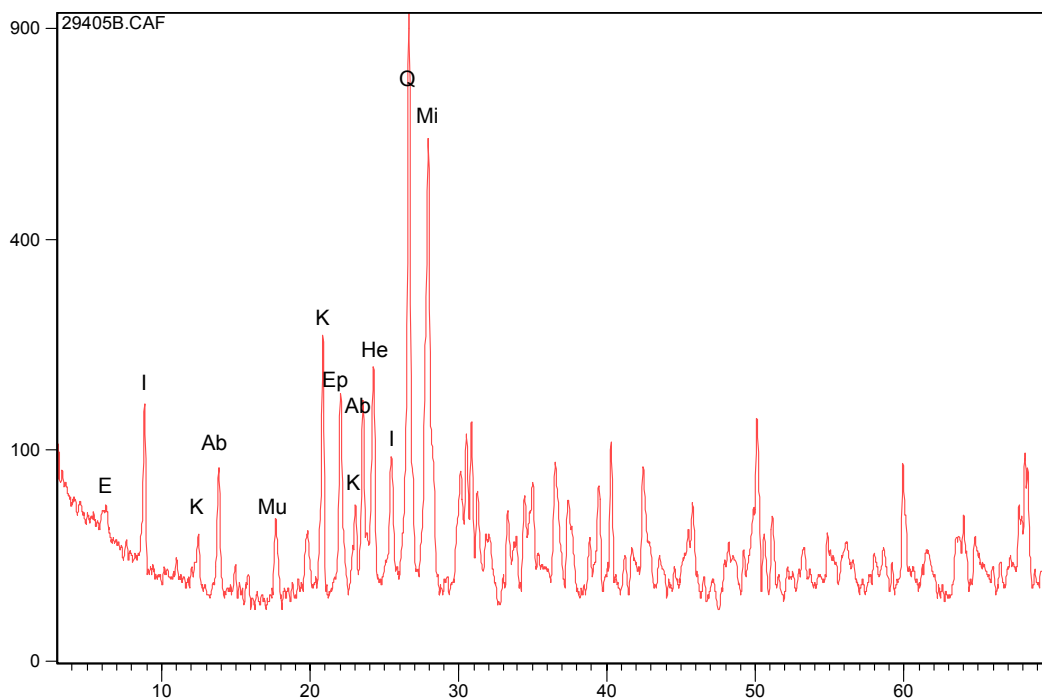


Figura 5.22 – Difratograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 02) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Q – Quartzo; Mi – Microclina

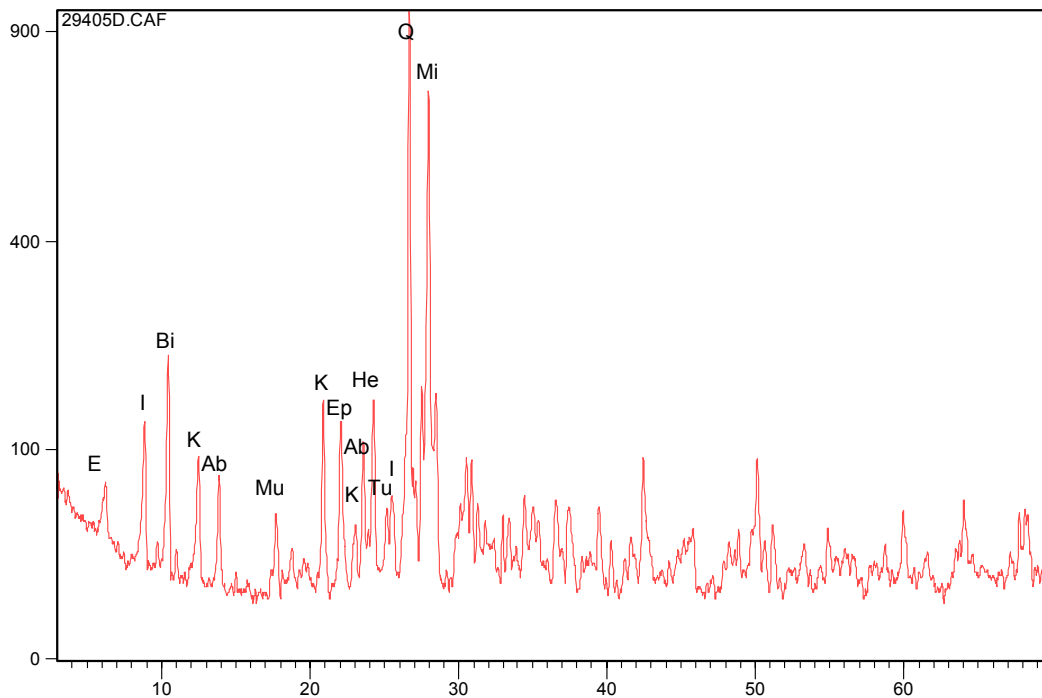


Figura 5.23 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 03) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu – Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Tu – Turmalina; Q – Quartzo; Mi - Microclina

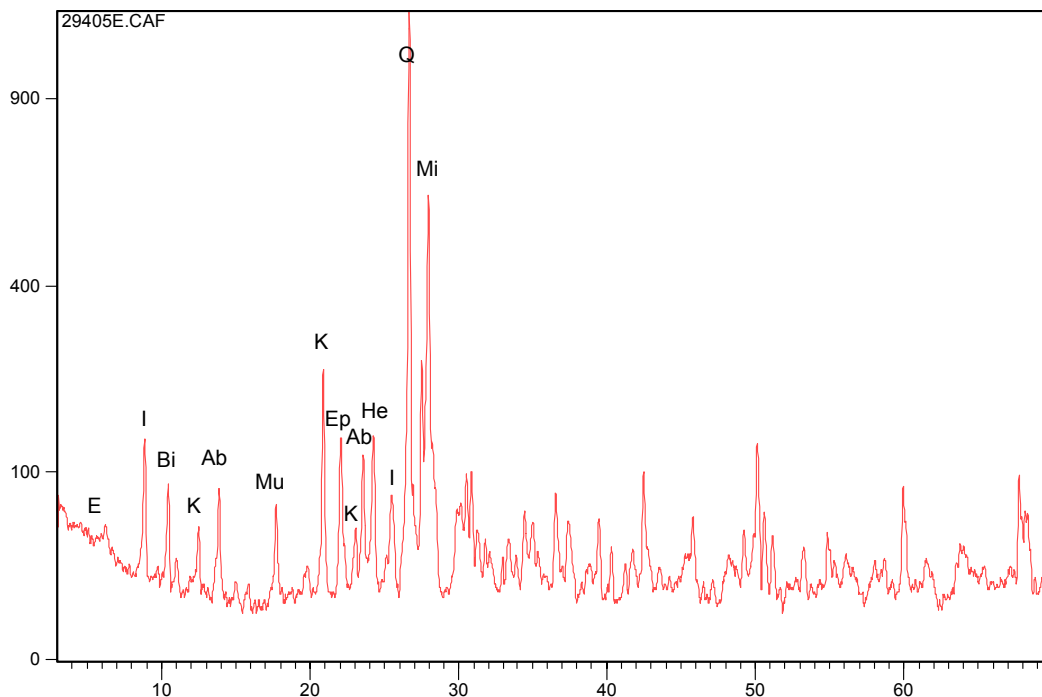


Figura 5.24 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 04) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu – Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Q – Quartzo; Mi – Microclina

Tabela 5.11 – Minerais identificados por difratometria de raios-X

Registro da amostra	Solo / Rocha	Picos mais intensos	Picos menos intensos
2.4108.05	Marrom	Caolinita Ilita Microclina Quartzo	Muscovita
2.4523.05	Vermelho	Caolinita Ilita Quartzo Titanita	Epidoto Microclina
2.4528.05	Laranja	Caolinita Ilita Quartzo	Albita Biotita Epidoto Microclina Muscovita Titanita
2.4521.05	Amarelo	Albita Caolinita Hematita Ilita Muscovita Turmalina	Epidoto Esmectita Quartzo
2.4524.05	Branco	Caolinita Ilita Microclina Muscovita Quartzo	Albita Biotita Epidoto Esmectita Hematita Turmalina
R 01*	Rocha	Albita Epidoto Ilita Microclina Muscovita Quartzo	Caolinita Hematita
R 02*	Rocha	Epidoto Ilita Microclina Muscovita Quartzo	Albita Caolinita Esmectita Hematita
R 03*	Rocha	Albita Biotita Caolinita Epidoto Ilita Quartzo	Esmectita Hematita Microclina Muscovita Turmalina
R 04*	Rocha	Albita Biotita Caolinita Epidoto Ilita Muscovita Quartzo	Esmectita Hematita Microclina

*Difratometria realizada apenas na fração total pulverizada no LAMIR – Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR

A análise mineralógica do perfil de intemperismo revelou que o quartzo é o mineral de maior estabilidade química, seguindo-lhe o feldspato potássico (microclina) e a mica (muscovita).

Os minerais neoformados mais representativos pertencem ao grupo da caolinita, como produtos da alteração dos feldspatos e das micas, observando-se também a presença de illita e hematita, provavelmente como produtos de alteração da biotita. Também é sugerida a presença de esmectita. Como minerais acessórios encontram-se titanita, turmalina e os do grupo do epidoto.

Sugere-se que a esmectita encontrada não foi formada pelo intemperismo, mas sim por hidrotermalismo, como constatado na análise petrográfica. Isto porque é encontrada também na rocha. Nas camadas mais superficiais não se tem mais esmectita, podendo ter sido a mesma transformada em illita e/ou caolinita.

O estudo da mineralogia deste perfil mostra uma linha de evolução dos minerais, isto é, a transformação dos minerais primários em secundários.

5.3.3. Petrografia

Lâminas petrográficas são normalmente confeccionadas com a espessura de 30 μ m. Cabe ressaltar que neste trabalho as lâminas foram confeccionadas com espessuras em torno de 50 a 60 μ m. Isto foi necessário por se estar trabalhando com rochas friáveis, fortemente alteradas. Quando da confecção das lâminas, a tentativa de diminuir sua espessura a valores inferiores a 50 μ m resultava em descolamento de partículas da rocha. Os minerais foram identificados segundo suas propriedades ópticas. A rocha que dá origem ao perfil estudado foi classificada como granito-gnaisse.

Os gnaisses são rochas grosseiramente foliadas de estrutura muito variável. Podem ser desde maciças, granitóides, com foliação dada pelo achatamento dos grãos até bandada, com bandas na faixa de 1 a 10 mm e mineralogia contrastante, geralmente alternando faixas quartzo-feldspáticas com outras mais máficas (compostos ferromagnesianos). Estas rochas têm composição essencialmente quartzo-feldspática, granulação de média a grossa e são derivadas de processos de segregação metamórfica que culminam em rochas migmatíticas. Rochas migmatíticas são formadas por mistura de fácies de rochas metamórficas na qual pelo menos um componente é representado por material granítico ou granitóide derivado de fusão parcial e/ou de

metassomatismo (processo de alteração e/ou transformação química de uma rocha principalmente pela ação de fase fluida reagente, resultando em entrada e/ou saída significativa de componentes químicos da rocha com modificação importante de seus minerais). A biotita e os minerais do grupo do epidoto são minerais característicos de rochas gnáissicas. Nestas rochas o plagioclásio presente é praticamente albita pura. A rocha estudada nesta dissertação se enquadra nas características acima mencionadas.

As lâminas, confeccionadas a partir das amostras relacionadas na Tabela 1, estão descritas de forma breve, dando ênfase ao grau de intemperismo dos minerais e à variação de suas características ao longo do perfil. Além disso, é feito um paralelo com a descrição macroscópica dos respectivos testemunhos. Informações específicas sobre a execução destas análises podem ser encontradas no Capítulo 4.

R 01 (19,9m)

Como mostra a Figura 5.25, estão presentes nesta rocha minerais como plagioclásio, microclina, quartzo e biotita, além de seus produtos de alteração tais como muscovita, clorita, epidoto, saussurita e sericita. Nota-se nesta lâmina que a biotita observada na macroscopia é um pseudomorfo¹.

Na Figura 5.27 e na Figura 5.28 é possível observar que a alteração desta rocha se dá inter-grãos e ocorre de fora para dentro, fato justificado pela grande concentração de material fino entre os grãos. A invasão dos agentes intempéricos se dá por planos de clivagem e/ou linhas de fraturas. Este processo é contínuo e culmina em mudanças na microestrutura da rocha.

Na Figura 5.26 observa-se um plagioclásio em processo de saussuritização², enquanto na Figura 5.29 observa-se uma microclina em processo de sericitização³. Os elementos originados da biotita são mais facilmente alterados que o plagioclásio e a microclina e, portanto, são encontrados em pequena quantidade nesta amostra, já bastante alterada. No

¹ Corpo cuja forma externa corresponde à do cristal original, mas constituído por material neoformado.

² Formação de saussurita (mistura de até 3 minerais resultante da alteração hidrotermal de plagioclásios cálcicos).

³ Formação de sericita (mineral do grupo das micas, variedade microcristalina da muscovita, ligeiramente mais hidratada, resultante da alteração hidrotermal de feldspatos).

entanto, quando comparada com as demais amostras, é a que apresenta os minerais mais intactos.

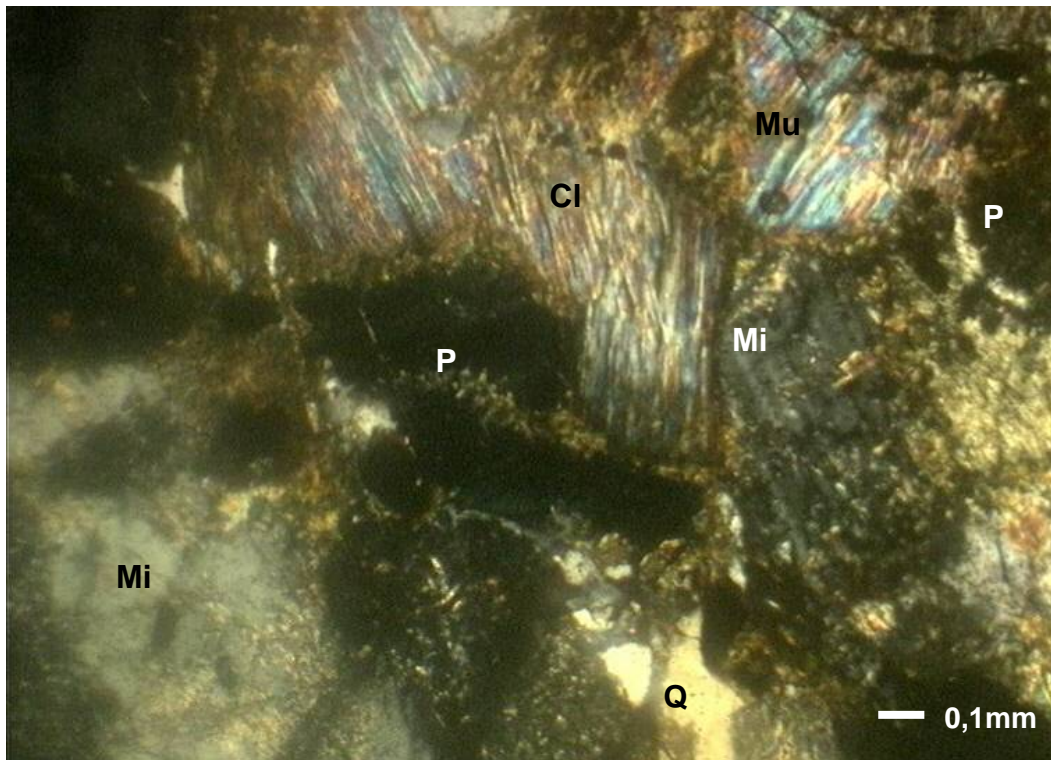


Figura 5.25 – Fotomicrografia da rocha R01. Minerais. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. CI – Clorita; Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina; Q – Quartzo

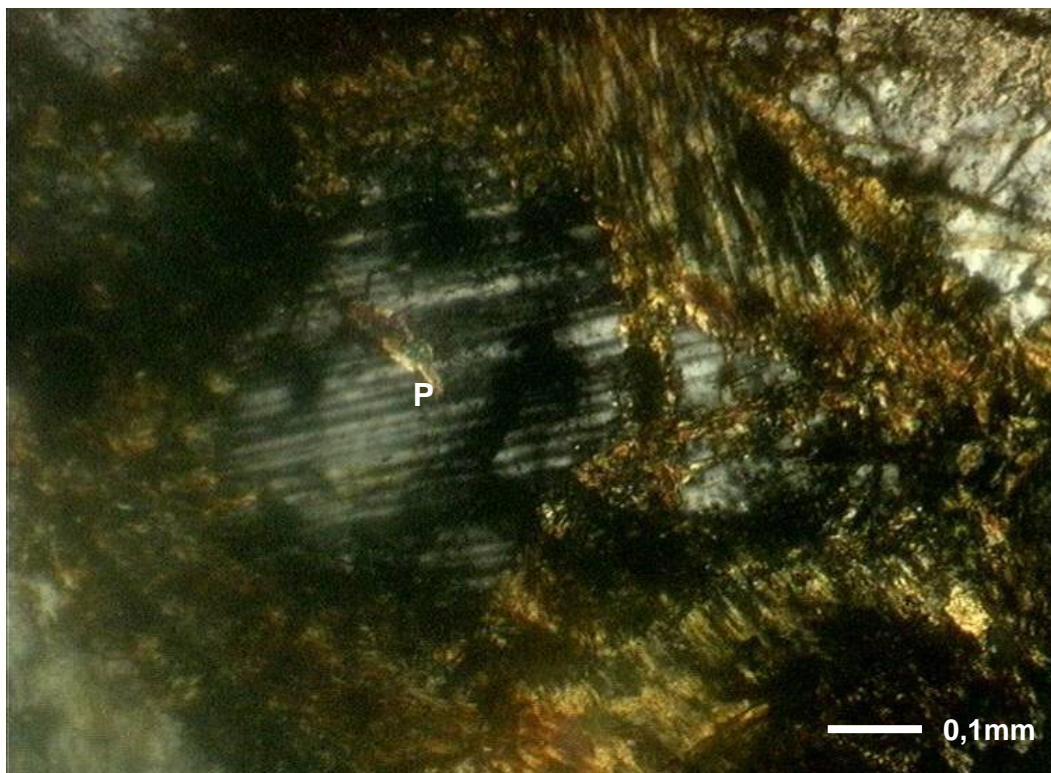


Figura 5.26 - Fotomicrografia da rocha R01. Palagioclásio mais preservado. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio

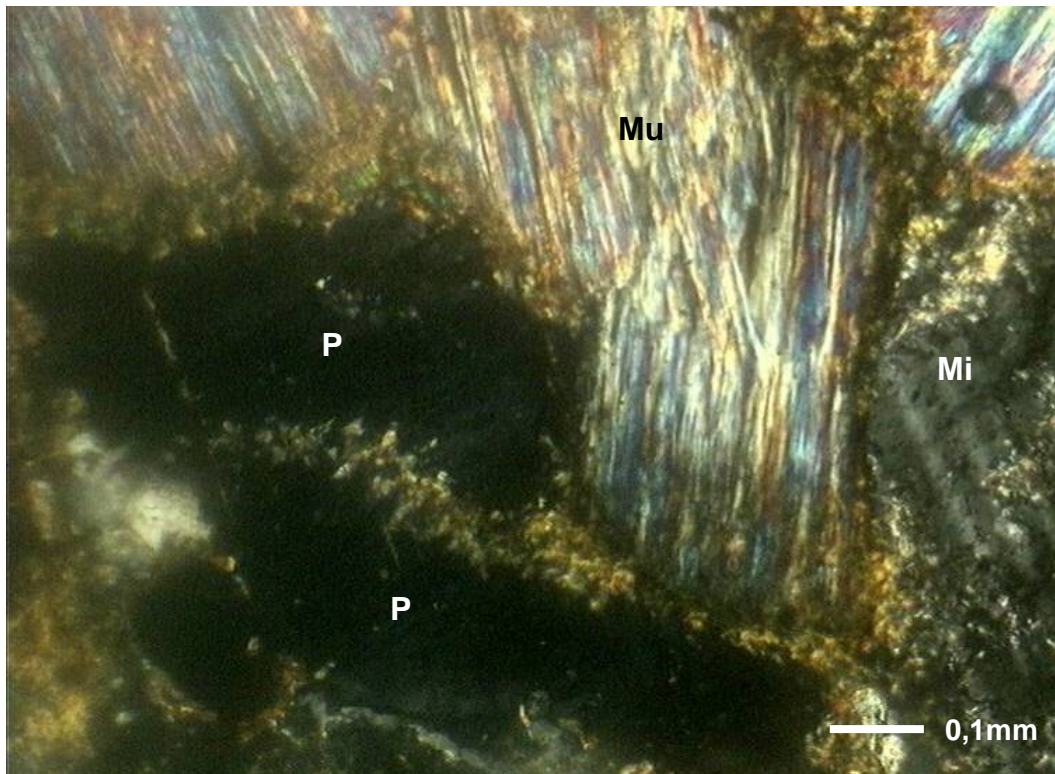


Figura 5.27 – Fotomicrografia da rocha R01. Alteração inter-grãos. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina

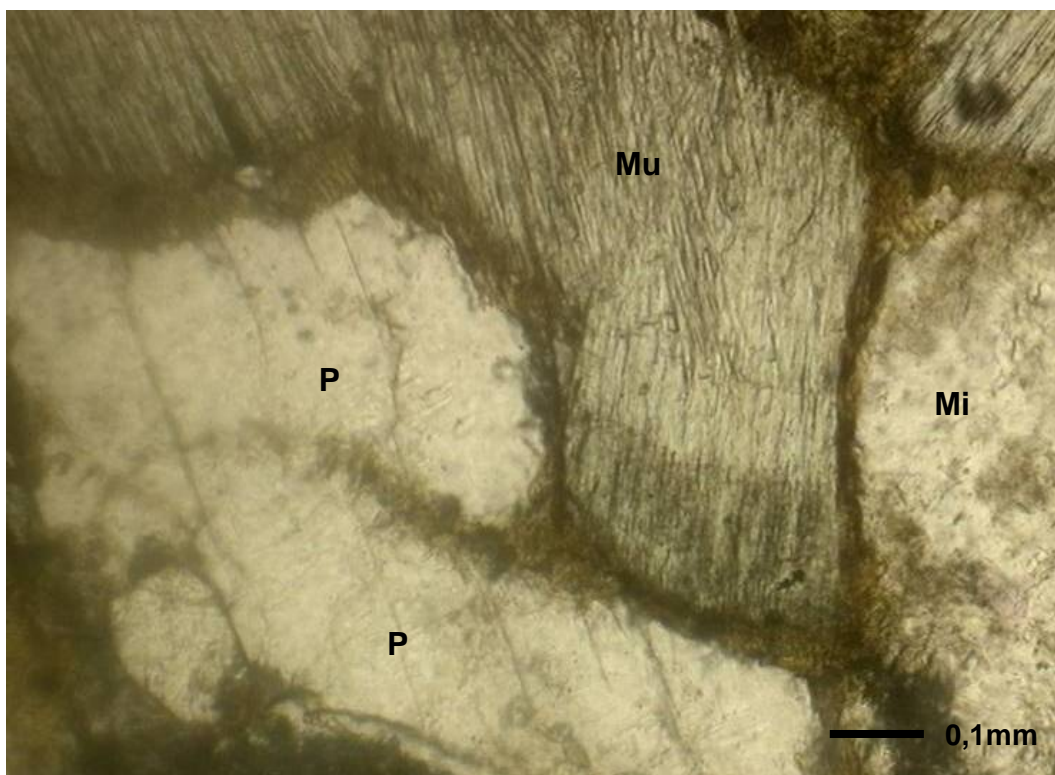


Figura 5.28 – Fotomicrografia da rocha R01. Alteração inter-grãos. Aumento de 100 vezes. *Nicóis cruzados*. Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina

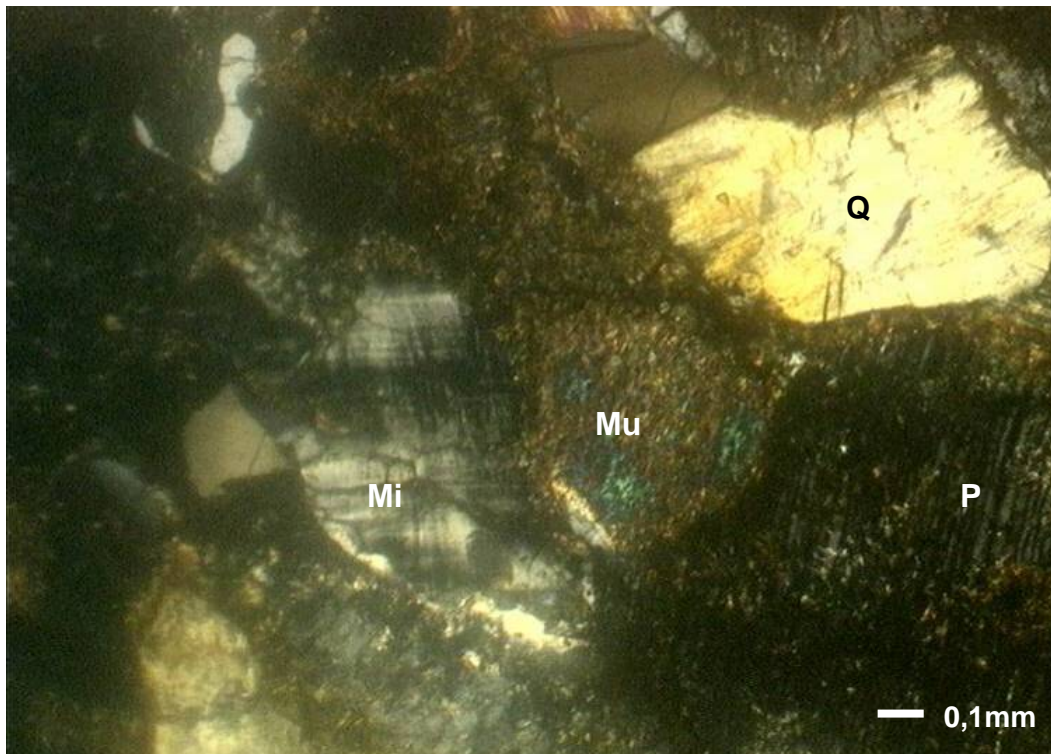


Figura 5.29 - Fotomicrografia da rocha R01. Microclina mais preservada. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina; Q – Quartzo

R 02 (24,4m)

Esta rocha se apresenta no geral mais alterada que a anterior. Seus grãos estão mais preservados, no entanto se observa maior quantidade de mineral secundário. Como mostra a Figura 5.30, o quartzo se apresenta mais recristalizado que na amostra anterior, em grãos menores e eventualmente alongados, confirmando a descrição macroscópica.

Além dos minerais citados na lâmina anterior, é possível observar a esta profundidade presença de zircão (Figura 5.31), turmalina e titanita como minerais acessórios.

A biotita, assim como na amostra anterior, já desapareceu, deixando apenas sua forma em seus minerais de alteração.

Na Figura 5.32 e na Figura 5.33 é possível observar a ação da alteração hidrotermal nos grãos de feldspato (plagioclásio e microclina). Isto é evidenciado pelo fato de o intemperismo estar atuando de dentro para fora dos grãos. Na Figura 5.34 observa-se que o plagioclásio se altera mais rápido que a microclina. Isso se dá porque o plagioclásio é mais pobre em sílica e, quanto mais rico em sílica for o mineral, mais resistente ele será ao intemperismo.

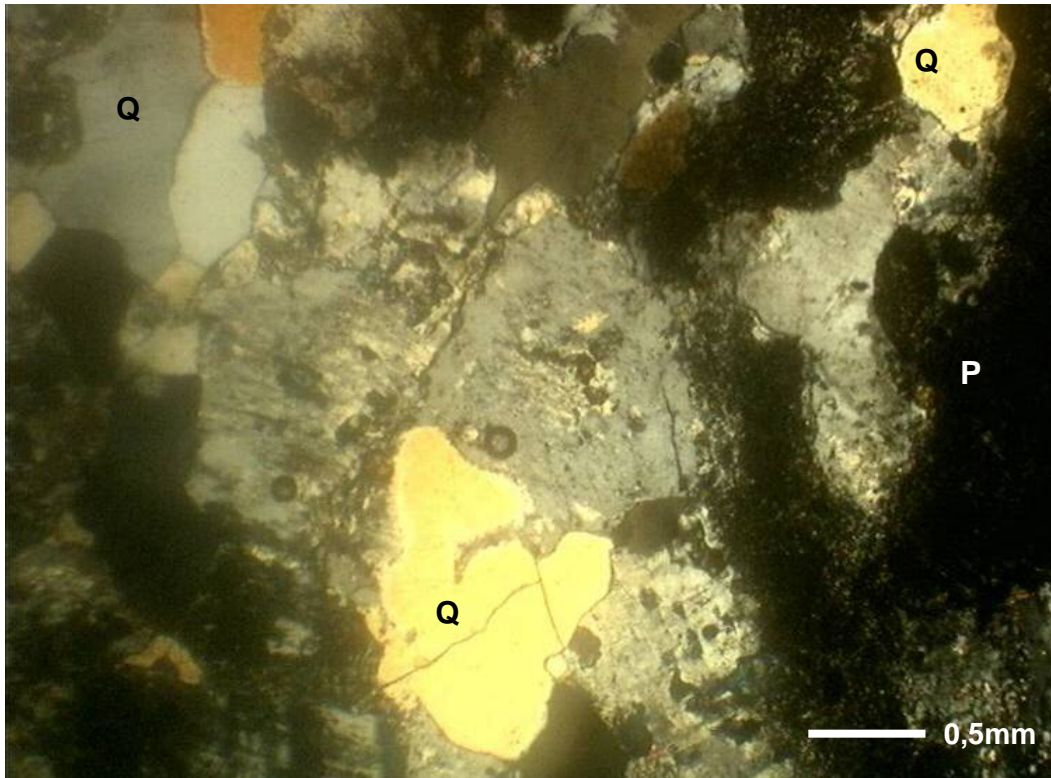


Figura 5.30 - Fotomicrografia da rocha R02. Profundidade 24,4m. Aumento de 25 vezes. Luz plana. P – Plagioclásio; Q – Quartzo

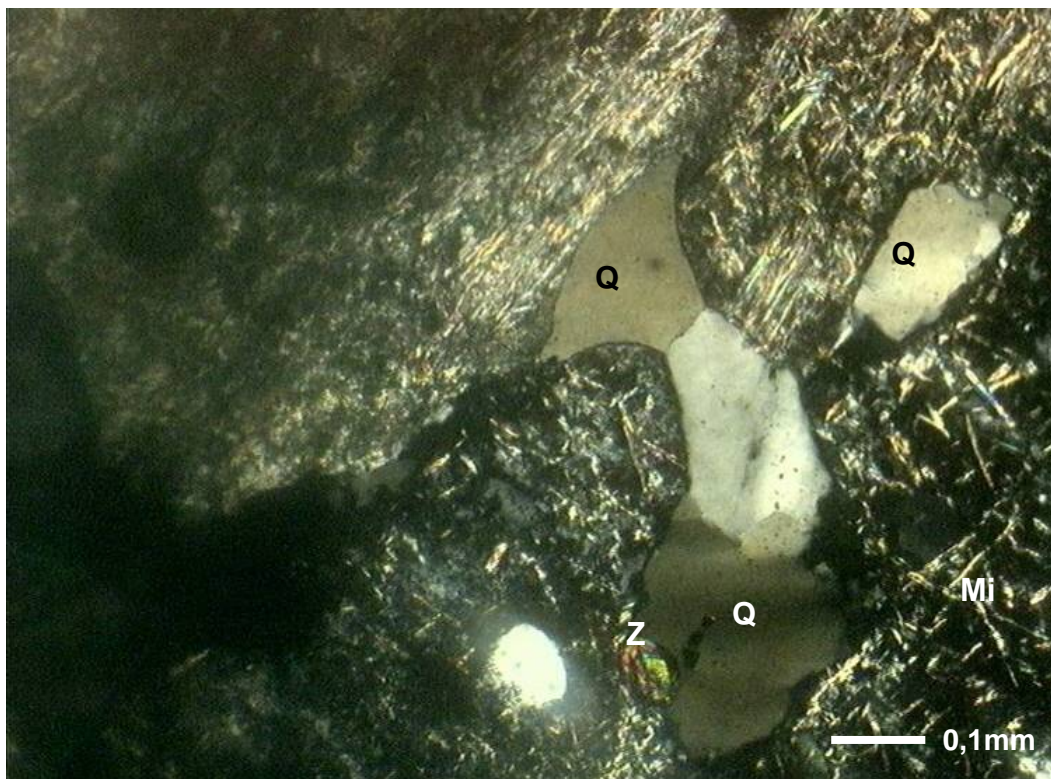


Figura 5.31 - Fotomicrografia da rocha R02. Zircão. Aumento de 100 vezes. Luz plana. Mi – Microclina; Q – Quartzo; Z - Zircão

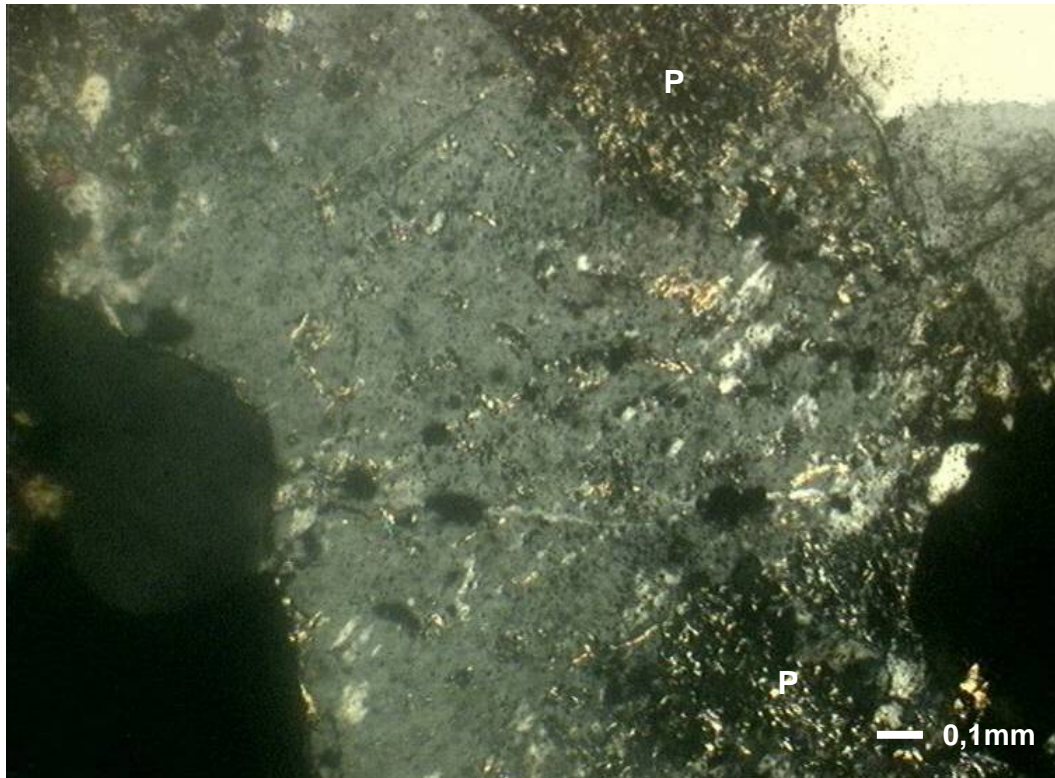


Figura 5.32 - Fotomicrografia da rocha R02. Indicação de alteração hidrotermal, intemperismo atuando de dentro para fora do grão de plagioclásio. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio

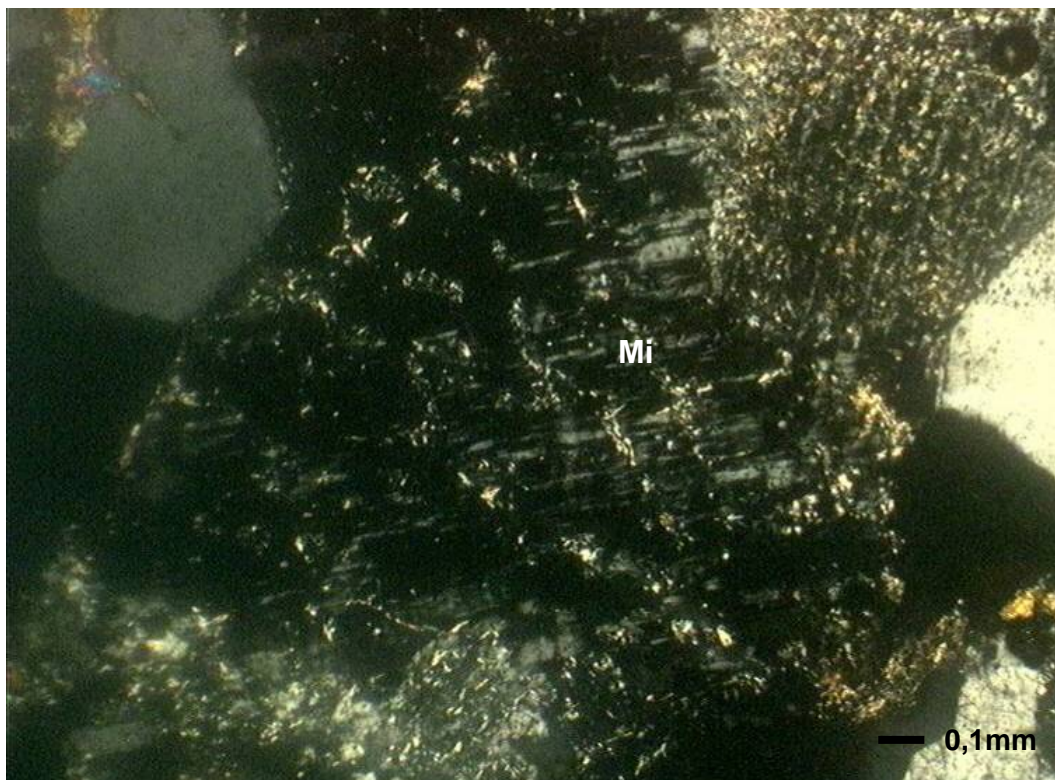


Figura 5.33 - Fotomicrografia da rocha R02. Microclina se alterando por hidrotermalismo. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. Mi – Microclina

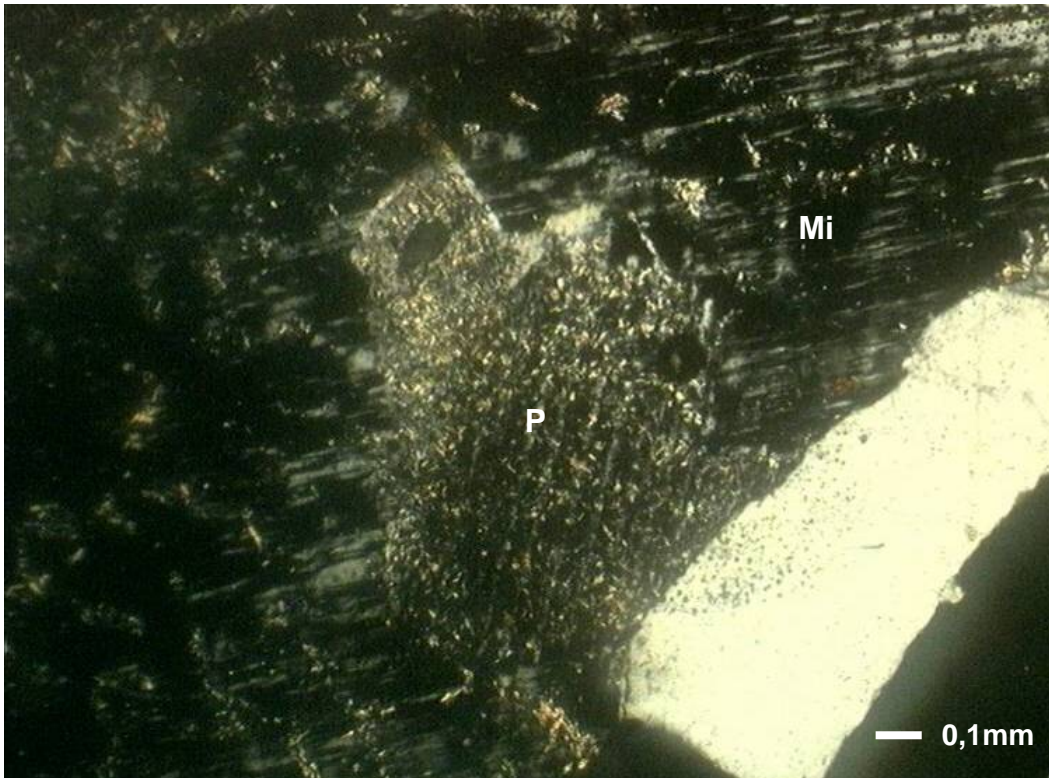


Figura 5.34 - Fotomicrografia da rocha R02. Plagioclásio mais alterado que a microclina. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mi – Microclina

R 03 (25,5m)

A Figura 5.35 mostra que a esta profundidade a rocha se encontra fortemente alterada. Esta é a amostra mais intemperizada de todo o perfil. A lâmina é similar à lâmina da amostra R 02.

Na Figura 5.37 é possível observar titanita como mineral acessório.

Observa-se a esta profundidade uma grande quantidade de epidoto, originado pelo cálcio do plagioclásio que se uniu com o ferro da biotita. Isto é evidenciado na Figura 5.36 que mostra também a presença de zircão e feldspatos muito transformados.

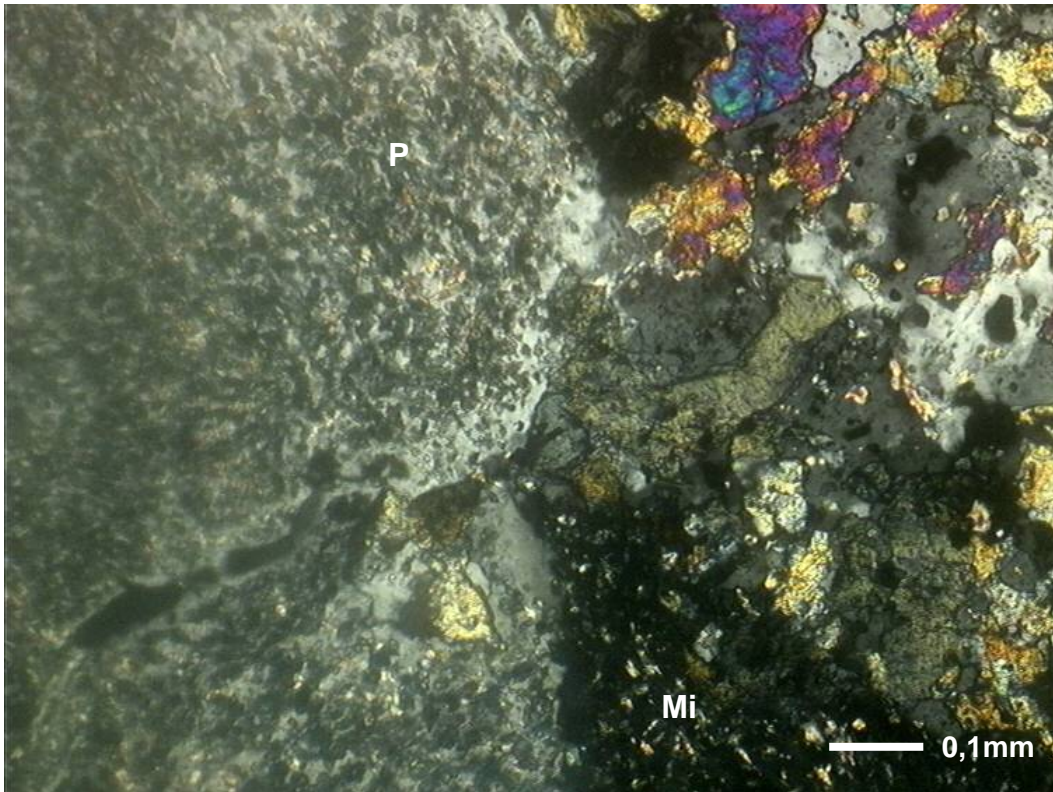


Figura 5.35 - Fotomicrografia da rocha R03. É a amostra mais alterada. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mi – Microclina

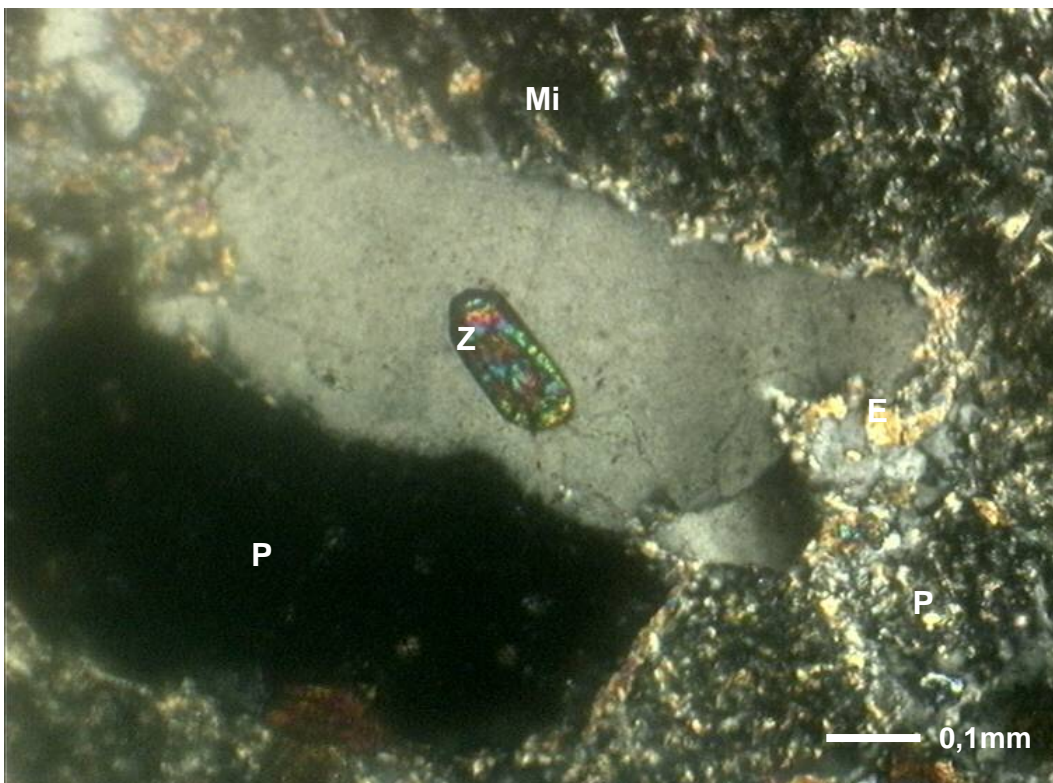


Figura 5.36 - Fotomicrografia da rocha R03. Zircão e feldspatos muito transformados. Grande quantidade de epidoto. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mi – Microclina; Z - Zircão

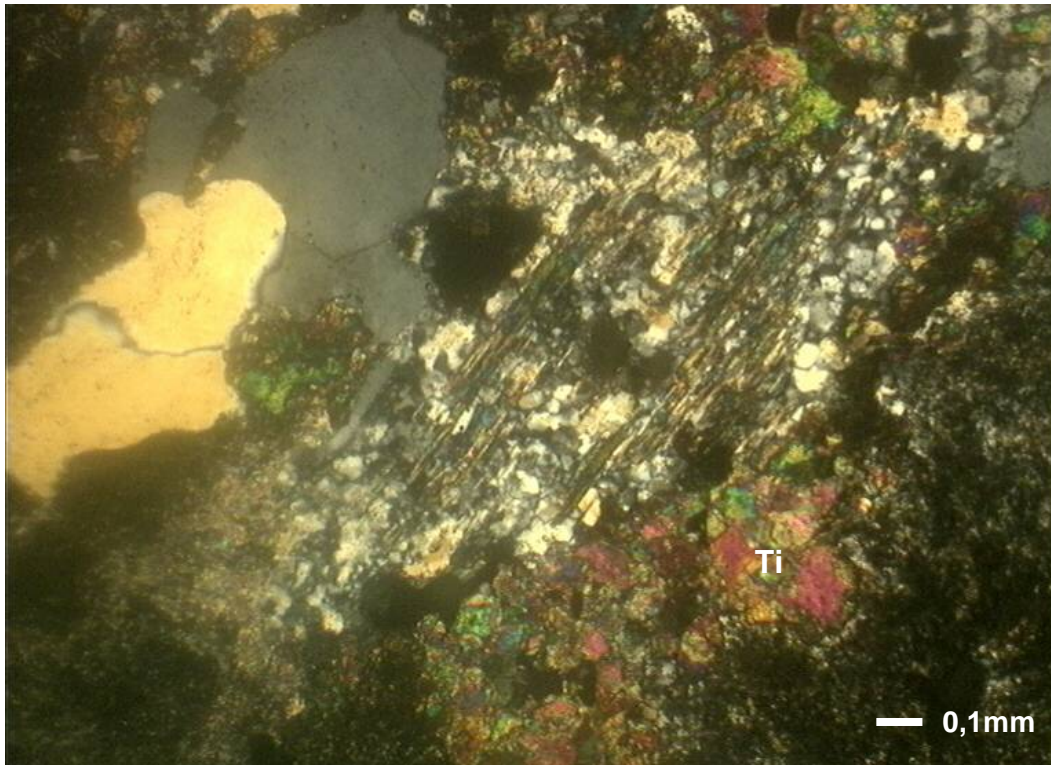


Figura 5.37 - Fotomicrografia da rocha R03. Titanita. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*.

Ti - Titanita

R 04 (25,8m)

Apesar de ser a amostra coletada na maior profundidade, esta não é a rocha mais intacta dentre as analisadas. Ela se apresenta mais alterada que a amostra R 01 e menos alterada que as demais. Cabe ressaltar que a lâmina estudada foi feita a partir da parte leucocrática da amostra, uma vez que, como citado no Capítulo 3, a amostra R 04 apresenta uma parte leucocrática⁴ e outra mesocrática⁵ bem distintas.

A Figura 5.40 evidencia a formação de muscovita por hidrotermalismo. É possível dizer que foi a ação hidrotermal que transformou o feldspato em mica (sericita) porque a transformação está ocorrendo de dentro do plagioclásio para fora. Observa-se também a presença de epidoto nesta amostra embora ele seja encontrado em menor quantidade que na R 03.

A Figura 5.38 e a Figura 5.39 mostram a biotita dando origem a epidoto e clorita.

⁴ Predominância de minerais claros e menos de 30-37% de minerais escuros.

⁵ Minerais claros e escuros aproximadamente em quantidades iguais sendo composta por mais de 30-37% e menos de 60-67% de minerais escuros.

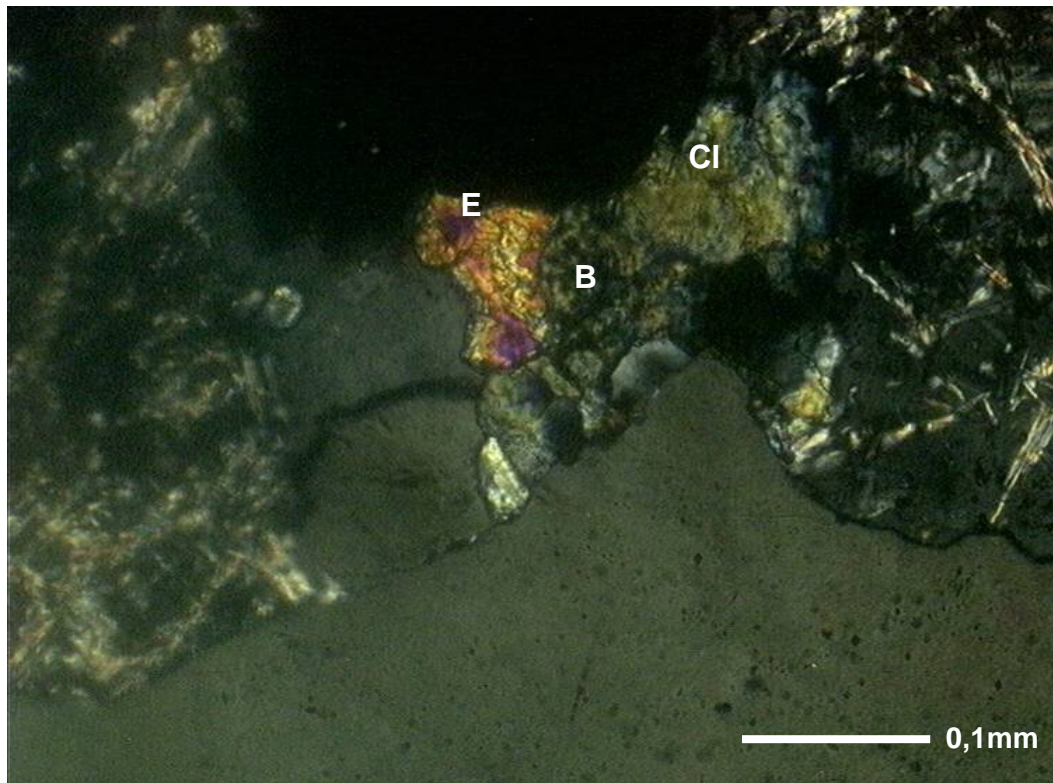


Figura 5.38 - Fotomicrografia da rocha R04. Biotita dando origem a epidoto e clorita. Aumento de 200 vezes. *Luz plana*. E – Epidoto; B – Biotita; Cl - Clorita

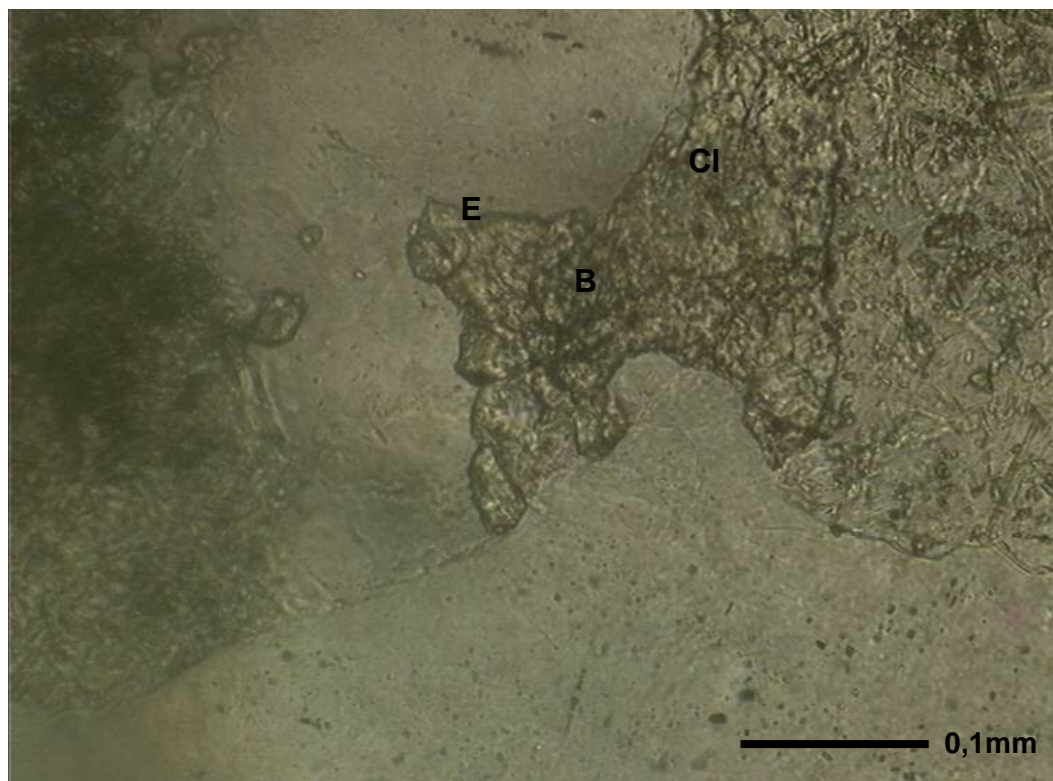


Figura 5.39 - Fotomicrografia da rocha R04. Biotita dando origem a epidoto e clorita. Aumento de 200 vezes. *Nicóis cruzados*. E – Epidoto; B – Biotita; Cl - Clorita

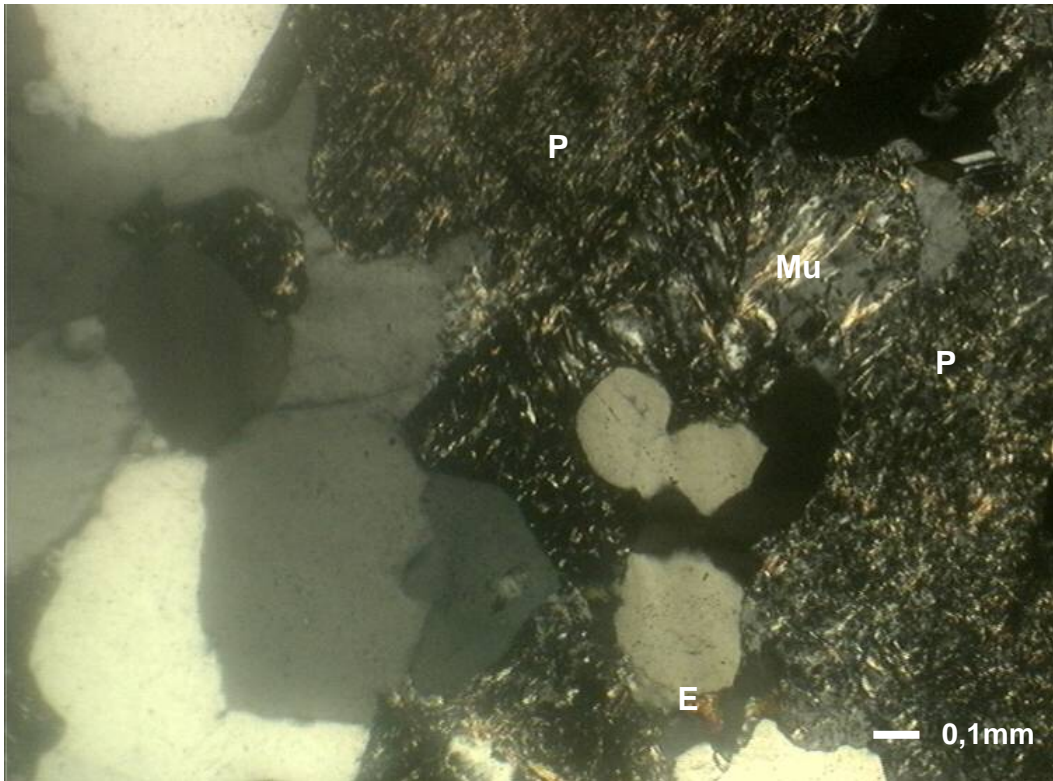


Figura 5.40 - Fotomicrografia da rocha R04. Profundidade 25,8m. Muscovita dentro do plagioclásio e presença de epidoto. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mu – Muscovita; E - Epidoto

A Tabela 5.12 apresenta um resumo das descrições das lâminas de rocha de todo o perfil.

Tabela 5.12 – Descrição petrográfica das lâminas de rocha

Amostra / Profundidade	Minerais/ Observações	Tamanho (mm)	Quantidade (%)	Alteração	Forma dos grãos
R 01 (mais preservada) / 19,9m	Plagioclásio	5 à 6	35 à 40	Alterado	Hipidiomórfica ⁶
	Quartzo		20 à 30	Não alterado	Granular, xenomórfico ⁷
	Microclina	4 à 5	20 à 25	Alterado	Hipidiomórfica
	Biotita	3 à 4	15 à 20	Muito alterado	Hipidiomórfica
R 02 24,4m	Plagioclásio	3 à 4	30 à 35	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Quartzo	1 à 2	25 à 35	Não alterado	Granular, xenomórfico, eventualmente alongado
	Microclina	7 à 8	20 à 25	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Biotita	3 à 4	10 à 12	Muito alterado	Hipidiomórfica planar
R 03 (mais alterada) / 25,5m	Plagioclásio/ totalmente sericitizado	3 à 4	60 (juntamente com ^a microclina)	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Quartzo/ recristalizado / em bandas	3	30 à 35	Não alterado	Granular, xenomórfico, eventualmente alongado
	Microclina/ totalmente salsuritizada	7 à 8	60 (juntamente com ^o plagioclásio)	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Titanita+ Epidoto+ Carbonato	Minerais < 1mm Carbonato muito fino	5 à 10	Muito alterado	-
R 04 25,8m	Plagioclásio + Microclina	-	60	Alterado	Hipidiomórfica tabular
	Quartzo	3	5 à 10	Não alterado	Granular, xenomórfico
	Titanita+ Epidoto+ Carbonato	Minerais < 1mm Carbonato muito fino	5 à 10	Alterado	Hipidiomórfica planar

⁶ Mineral de forma parcialmente desenvolvida, limitada em até duas faces cristalinas.

⁷ Mineral de forma pouco desenvolvida, não limitada por faces cristalinas.

Na descrição macroscópica dos testemunhos de rocha, foi observado que o grau de intemperismo diminui com o aumento da profundidade. Isto não foi confirmado na análise das lâminas petrográficas, o que indica que a análise macroscópica apresenta limitações. Desse modo, conclui-se que, para avaliar o grau de intemperismo das rochas, as descrições macroscópicas devem ser sempre acompanhadas de análises petrográficas.

5.3.4. Micromorfologia dos solos

O estudo da organização das partículas de solo em escala microscópica chama-se micromorfologia. Com o auxílio de um microscópio óptico polarizante, também conhecido como microscópio petrográfico, foram analisadas amostras de solo indeformadas, preparadas em lâminas finas (com cerca de 30 μ m de espessura).

A micromorfologia é uma técnica muito útil no estudo da gênese do solo. Com o auxílio das técnicas de processamento e análise digital de imagem, a micromorfologia é capaz de fornecer resultados de porosidade com precisão elevada.

Na verdade, a análise micromorfológica é uma continuação da análise morfológica de campo, numa escala que não se pode trabalhar à vista desarmada. Portanto, assim como no campo, os solos sob o microscópio também se apresentam diferentes uns dos outros.

Neste item serão discutidas as características micromorfológicas dos solos de quatro camadas que formam o perfil estudado. Foram analisadas lâminas delgadas de diferentes profundidades, representativas dos solos Branco, Amarelo, Laranja e Marrom, com a finalidade de caracterizar a morfologia dos poros, a mineralogia do solo e sua microestrutura. Infelizmente não foi confeccionada uma lâmina do solo Vermelho. Isto porque esta camada foi acrescentada ao perfil posteriormente, em função de se observar que a camada de solo superior apresentava comportamentos distintos para amostras morfológicamente similares. Nesta ocasião, as lâminas dos outros quatro solos já estavam em fase de análise e a confecção de uma nova lâmina atrasaria o andamento dos trabalhos.

Evitou-se descrever as lâminas nas proximidades de suas bordas. Estas análises também foram realizadas com o intuito de complementar a análise de

evolução dos minerais primários ao longo do perfil em função do grau de intemperismo.

A seguir estão apresentadas as características referentes aos constituintes e à estrutura dos solos dos diferentes níveis do perfil de solo residual estudado nesta dissertação. Além da caracterização da micromorfologia dos solos é também apresentado o resultado de análise da diferenciação do espaço poral pelo método de contagem de pontos. Os vazios são representados por vários tons de azul.

É importante ressaltar que os dados de propriedades físicas apresentaram alguns valores distintos do que foi encontrado na contagem do espaço poral. Isto vem demonstrar que a análise micromorfológica é também de fundamental importância na análise dos solos.

Através da análise dos blocos das diferentes profundidades observa-se que há um elevado percentual de macroporos nas amostras mais intemperizadas.

Segundo Bertolino (2004), os solos residuais maduros apresentam características bem peculiares, apresentando, na grande maioria das vezes, uma estrutura em blocos, alta porosidade e permeabilidade. Estas características não foram fortemente evidenciadas no solo Marrom, confirmando, mais uma vez, que embora seja o solo mais intemperizado do perfil, trata-se ainda de um solo residual jovem.

As Figuras a seguir apresentam os dados de morfologia dos poros, de mineralogia do solo e de sua microestrutura. O resumo das descrições micromorfológicas dos solos ao longo do perfil é apresentado na Tabela 5.13. Podem-se verificar no perfil modificações principalmente em relação à estrutura do solo e à porosidade.

Solo Marrom

A Figura 5.41 mostra a presença de macroporos no solo Marrom. O poro fotografado é na forma de canal e tem aproximadamente 1 mm de espessura. A Figura 5.42 apresenta grande quantidade de óxidos precipitados, indicando que o solo Marrom é um solo já bastante intemperizado. Isto é confirmado na Figura 5.43 que mostra a grande quantidade de plasma encontrada neste solo.

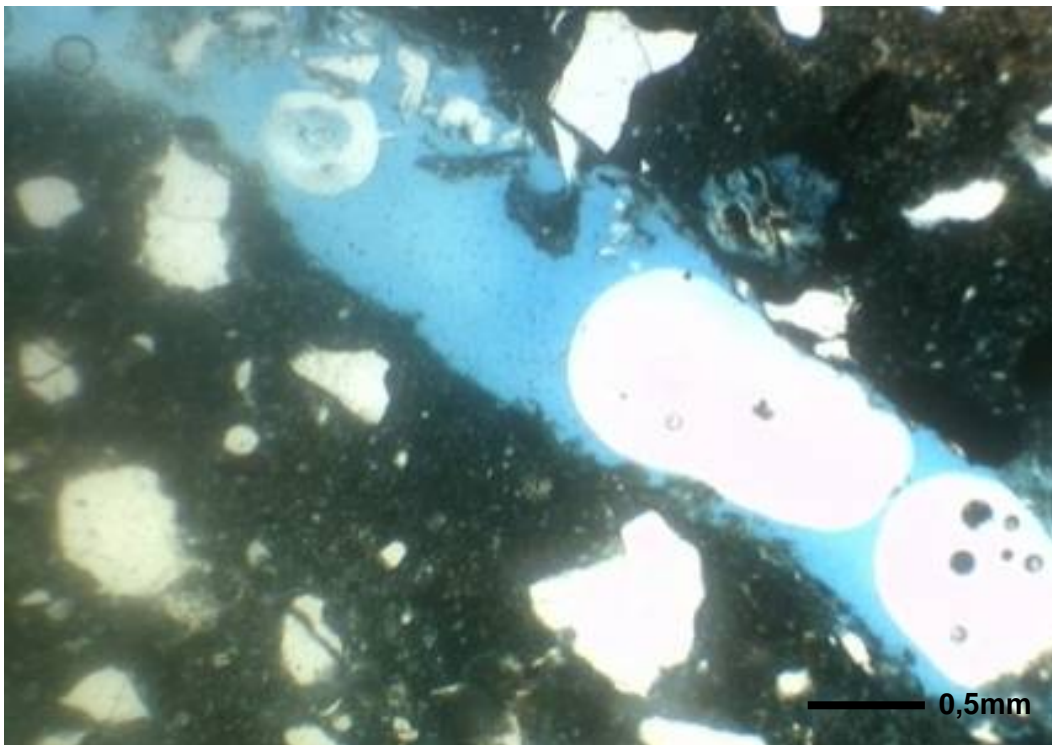


Figura 5.41 – Fotomicrografia do solo Marrom. Macroporo (1mm) em forma de canal. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

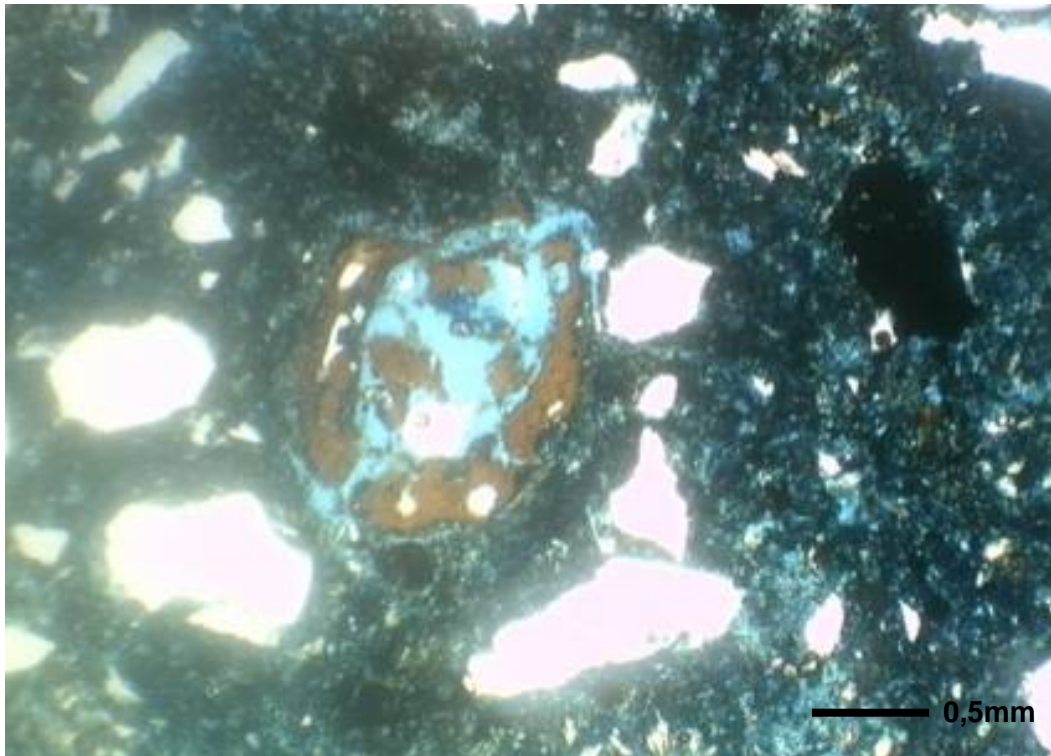


Figura 5.42 – Fotomicrografia do solo Marrom. Óxidos precipitados. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

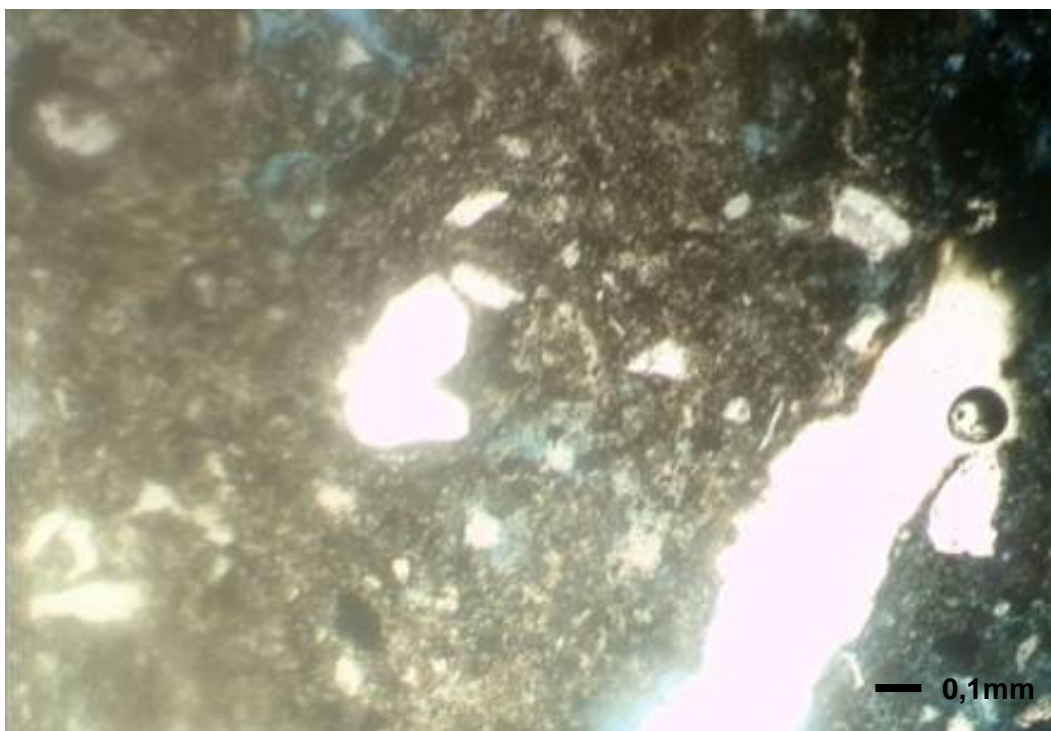


Figura 5.43 – Fotomicrografia do solo Marrom. Freqüência alta de plasma. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*

Solo Laranja

Na Figura 5.44 observa-se a porosidade do solo Laranja. É possível perceber que, no geral, o diâmetro dos poros é menor que no solo Marrom. A Figura 5.45 mostra a grande quantidade de microporos, bem como quartzos possivelmente recristalizados alinhados e óxidos de ferro precipitados formando faixas, fato evidenciado macroscopicamente no solo Laranja pelos veios pretos. Na Figura 5.46 observa-se um pedotúbulo⁸, o que indica que neste solo existe atividade microbiana.

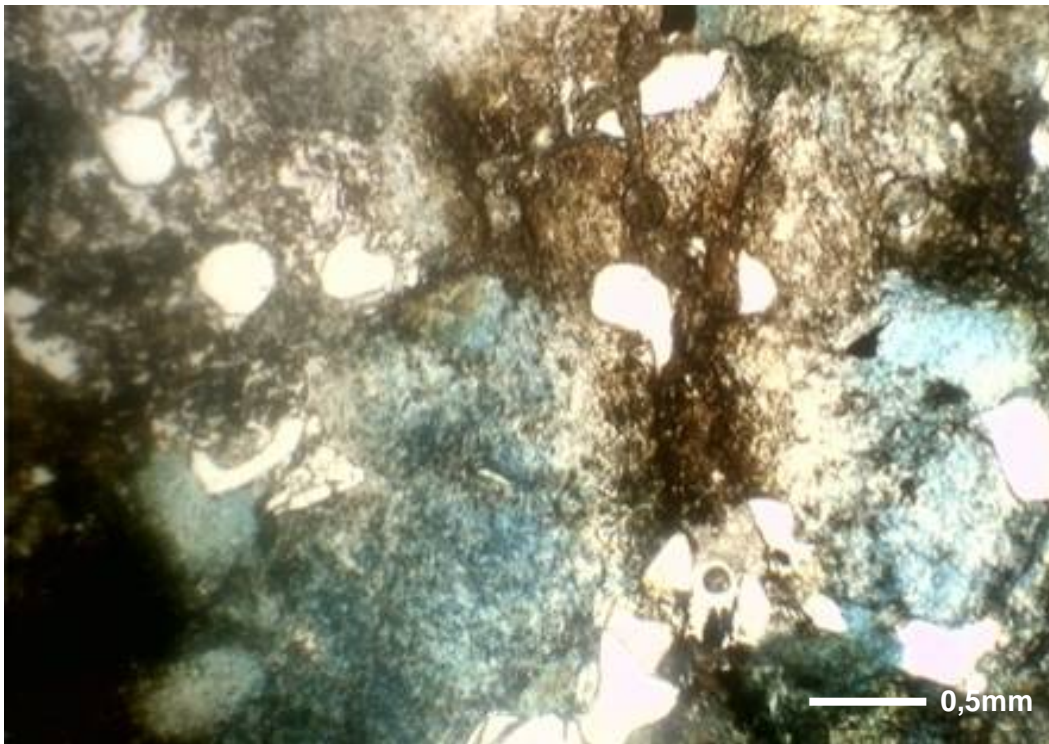


Figura 5.44 – Fotomicrografia do solo Laranja. Presença de microporos. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

⁸ Feições de preenchimento caracterizadas pela forma externa tubular, preenchidas total ou parcialmente por materiais de diferentes origens, podendo atingir dimensões milimétricas ou centimétricas.

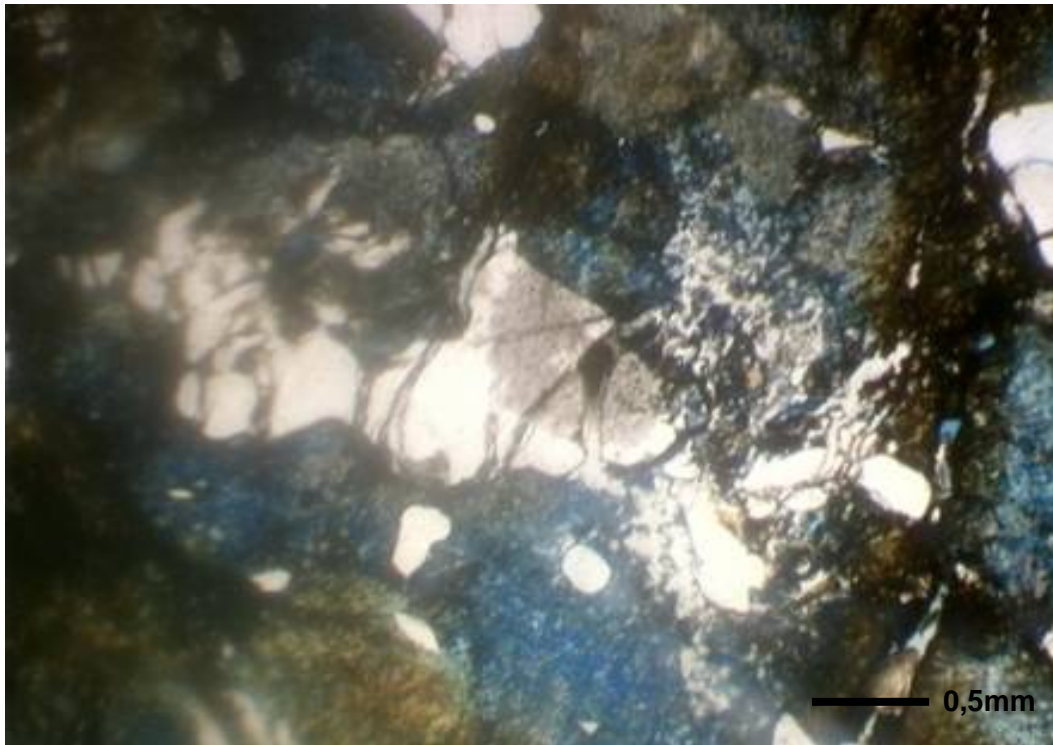


Figura 5.45 – Fotomicrografia do solo Laranja. Alta porosidade do solo. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

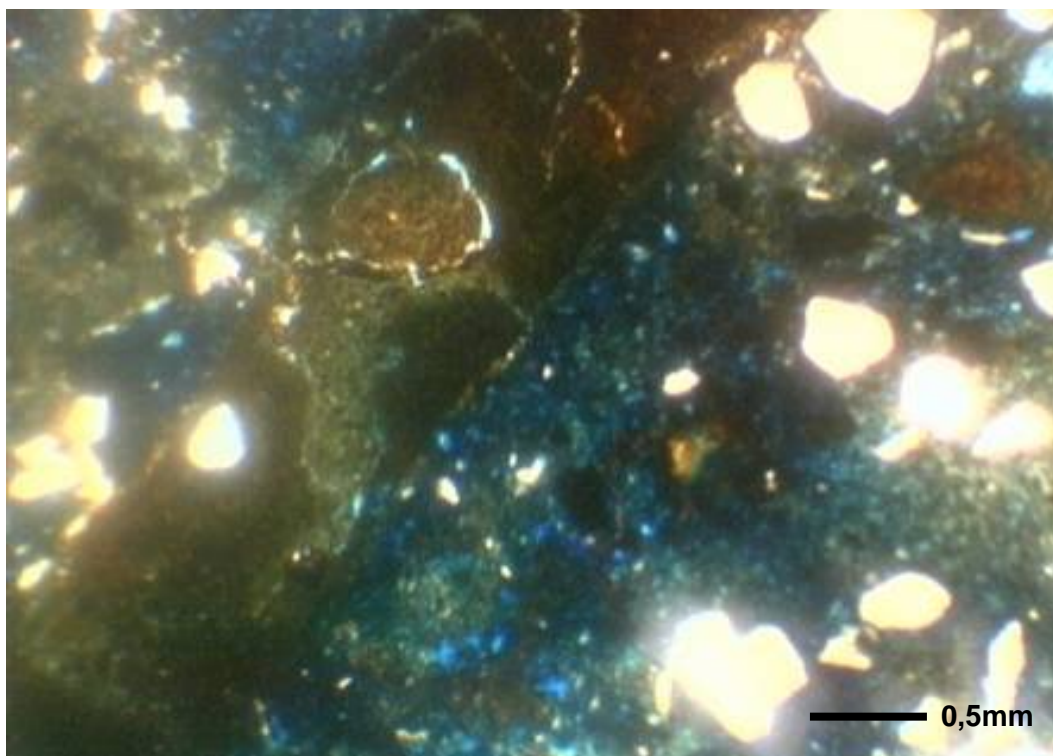


Figura 5.46 – Fotomicrografia do solo Laranja. Pedotúbulo. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

Solo Amarelo

Na Figura 5.47 e na Figura 5.48 observa-se um plagioclásio muito alterado. Isto confirma que o solo Amarelo se encontra menos intemperizado que o Laranja já que, no solo Laranja, as formas dos minerais já não são mais distinguidas.

Na Figura 5.49 observa-se minerais muito alterados, quartzo e epidoto.

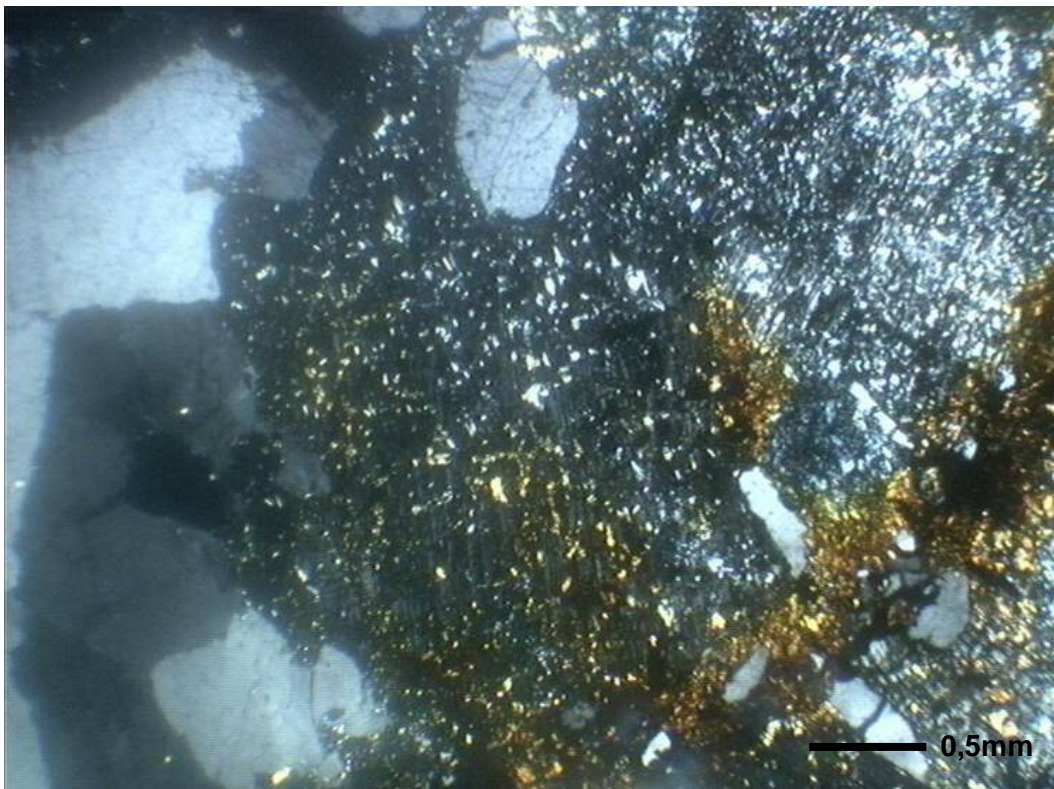


Figura 5.47 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Plagioclásio. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

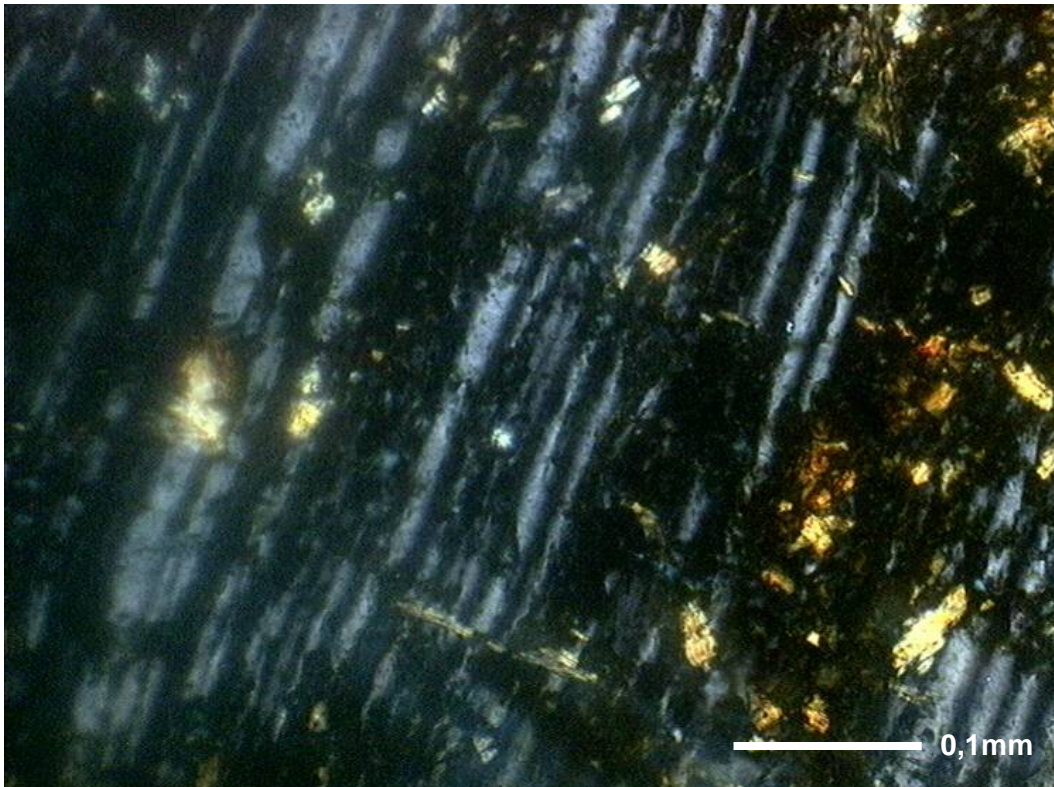


Figura 5.48 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Plagioclásio. Aumento de 200 vezes. *Luz plana*

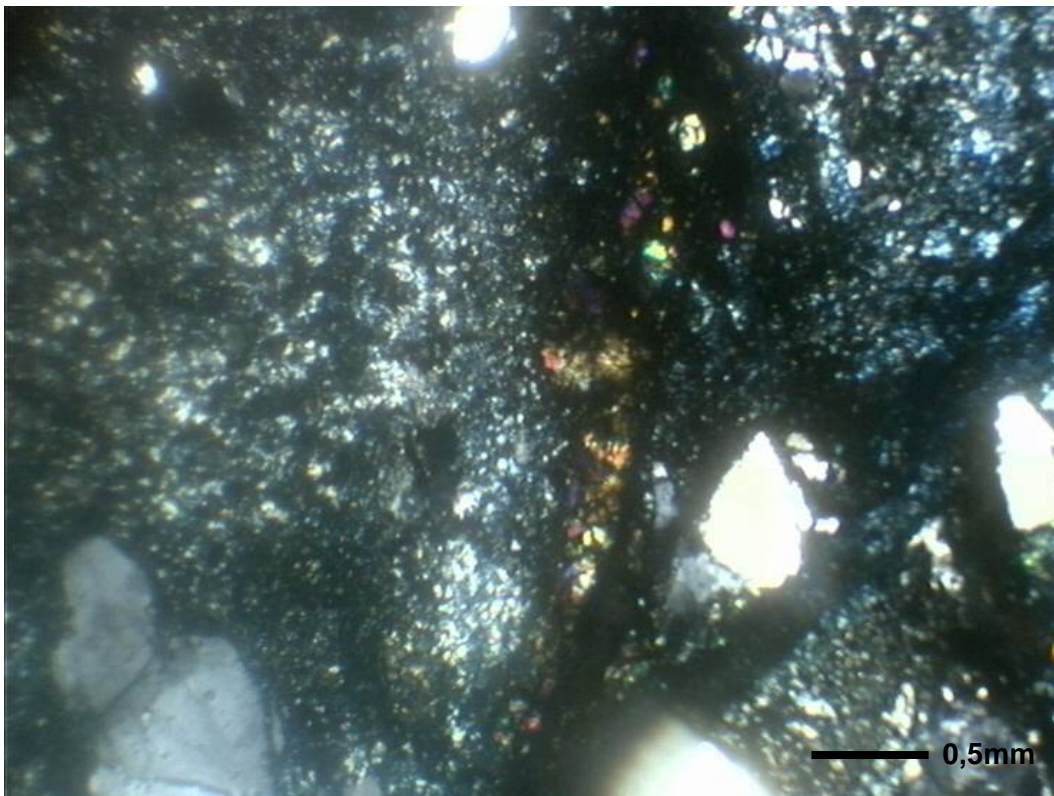


Figura 5.49 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Epidoto. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

Solo Branco

Na Figura 5.50 observa-se a presença de minerais mais preservados que em todos os outros solos. Nota-se a presença de plagioclásio, microclina e epidoto, muito alterados, além do quartzo.

Na Figura 5.51 observa-se um plagioclásio em processo de alteração. Esta estrutura mais preservada pode ser comparada com os plagioclásios encontrados nas amostras de rocha.

Observa-se na Figura 5.52 a presença de poros maiores que nos solos Amarelo e Laranja.

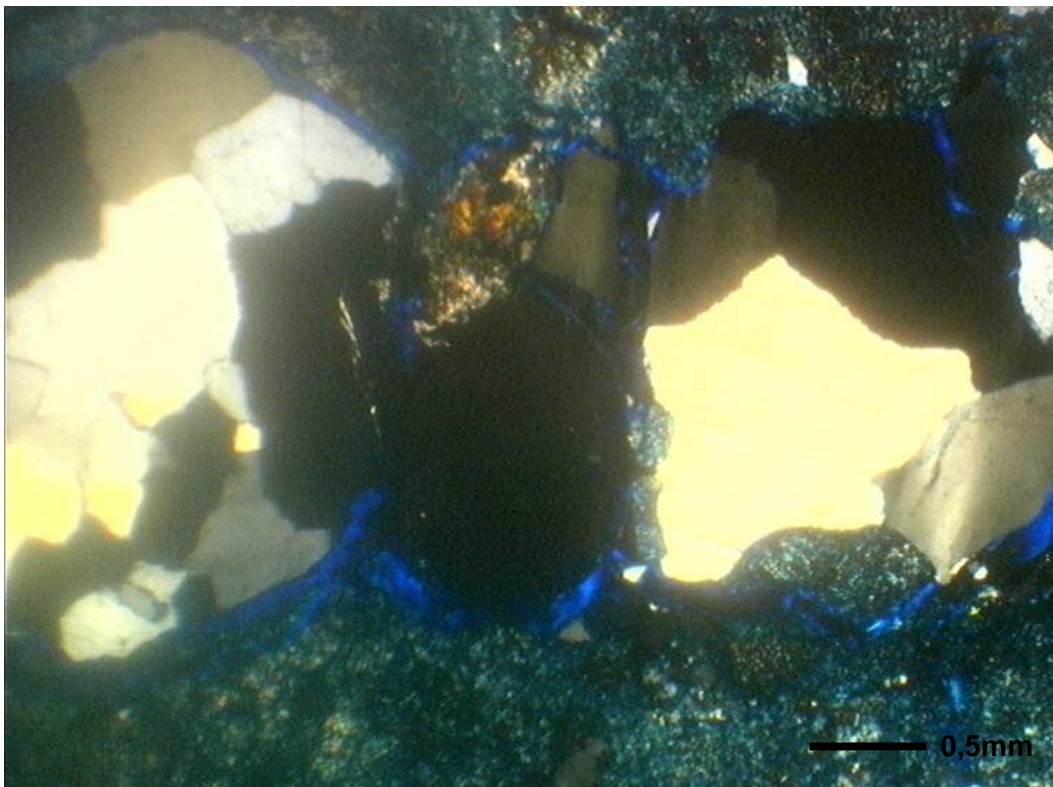


Figura 5.50 – Fotomicrografia do solo Branco. Quartzo. Aumento de 25 vezes. *Nicóis cruzados*

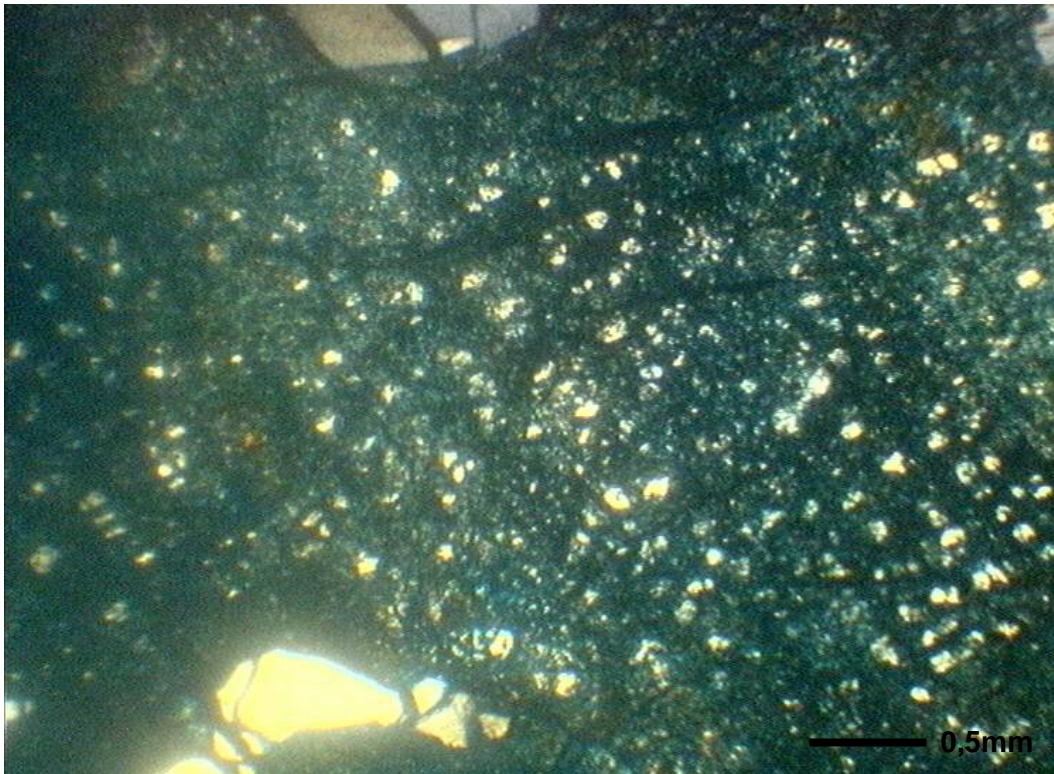


Figura 5.51 – Fotomicrografia do solo Branco. Mineral se alterando. Aumento de 25 vezes. *Nicóis cruzados*

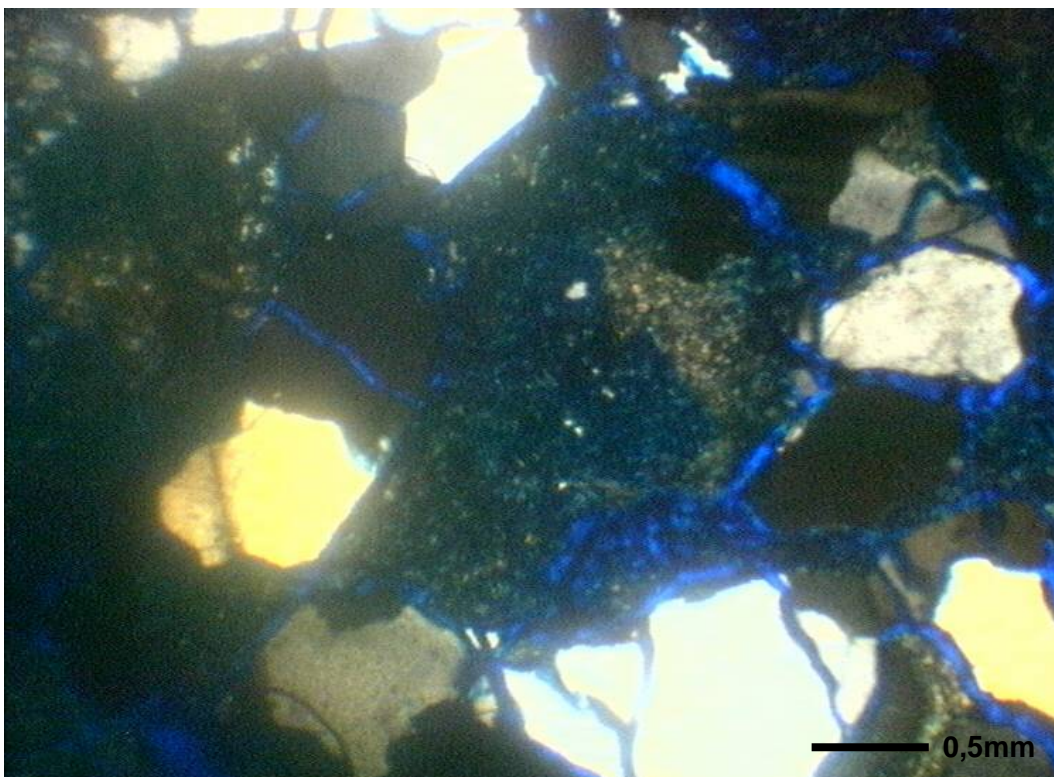


Figura 5.52 – Fotomicrografia do solo Branco. Porosidade. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

A Tabela 5.13 apresenta a frequência dos constituintes da lâmina que pôde ser contabilizada através de contagem de pontos. Frequência refere-se à abundância de determinada fração no campo visual observado, indicada em porcentagem. As frações observadas na micromorfologia são: poros, plasma e esqueleto.

Esqueleto é a parte observada na lâmina formada por partículas maiores que 2 μm , granulometricamente classificadas como areia e silte. Constitui-se de minerais primários (quartzo, feldspatos, micas etc.).

O plasma é composto por partículas menores que 2 μm , granulometricamente classificadas como fração argila. O plasma pode conter argilominerais, matéria orgânica, sais, óxidos, hidróxidos etc. As partículas do plasma em geral não podem ser unitariamente identificadas por microscopia óptica, necessitando para isso de corantes, difração de raios-X, observação por microscopia eletrônica de varredura ou de transmissão, entre outros meios. O solo Marrom é o que apresenta quantidade mais significativa de plasma. É também o único que apresenta macroporos muito finos, indicando tratar-se do solo mais intemperizado dentre os estudados.

Já os poros são os volumes “vazios”, isto é, orifícios ou aberturas desprovidos de materiais sólidos que atuam de diferentes formas, capazes de reter líquidos (soluções) e/ou permitir sua percolação, bem como a passagem de ar (gases), de animais, raízes etc. Podem ter diversas origens, formas e dimensões.

A Tabela 5.13 mostra que existe uma correlação entre o grau de intemperismo e a porcentagem de poros, de plasma e de esqueleto. Com o aumento da profundidade ocorre um aumento da porcentagem de esqueleto e uma diminuição na quantidade de plasma e poros. Isso só se inverte no solo Laranja. Os poros foram classificados segundo sua dimensão e segundo sua forma. Detalhes desta classificação são encontrados no Apêndice I.

A pedalidade é a constituição física de um solo, expressa pelo tamanho, pela forma e pelo arranjo dos agregados elementares, podendo ser avaliada segundo seus graus de desenvolvimento. O grau de pedalidade indica o grau de desenvolvimento dos agregados argilosos com base na extensão dos poros em seu contorno. O grau de pedalidade aumenta à medida que vai havendo a formação de argilominerais. Portanto está ligado ao grau de evolução dos solos. Os dados de grau de pedalidade da Tabela 5.13 evidenciam mais uma vez que no perfil de solo estudado o grau de intemperismo aumenta com a diminuição da profundidade.

Tabela 5.13 – Resumo da descrição micromorfológica⁹

Registro da amostra	Solo	Mineralogia	Frequência (% da área da lâmina)			Dimensão dos poros	Forma dos poros	Grau de pedalidade	Forma dos pedes	Textura dos pedes	Distribuição relativa dos pedes
			Esqueleto	Plasma	Poros						
2.4113.05	Marrom	Quartzo, óxidos de ferro e alumínio e argilominerais	18,23	40,89	40,89	Macroporos muito finos (entre 75 e 1000µm)	canal e planar oblíqua	Média a alta	subangular	ondulada	porfirica
2.4042.05	Laranja	Quartzo, vestígios de plagioclásio mica (biotita), óxidos de ferro e alumínio e argilominerais	26,2	47,4	26,4	Mesoporos	planar	média	subangular	ondulada	porfirica
2.4049.05	Amarelo	Quartzo, hematita, muscovita, vestígios de plagioclásio altamente sericitizado (mas ainda mantém as macias) e epidoto interperizado e não interperizado	34,8	35,3	30,1	Macroporos (+- 200µm)	planar	baixa	angular	ondulada	porfirica
2.4026.05 2.4089.05	Branco	Quartzo, óxidos de ferro e de alumínio, e mica (muscovita)	45,3	30,5	24,4	Macroporos e mesoporos	planar	baixa	subangular	ondulada	porfirica

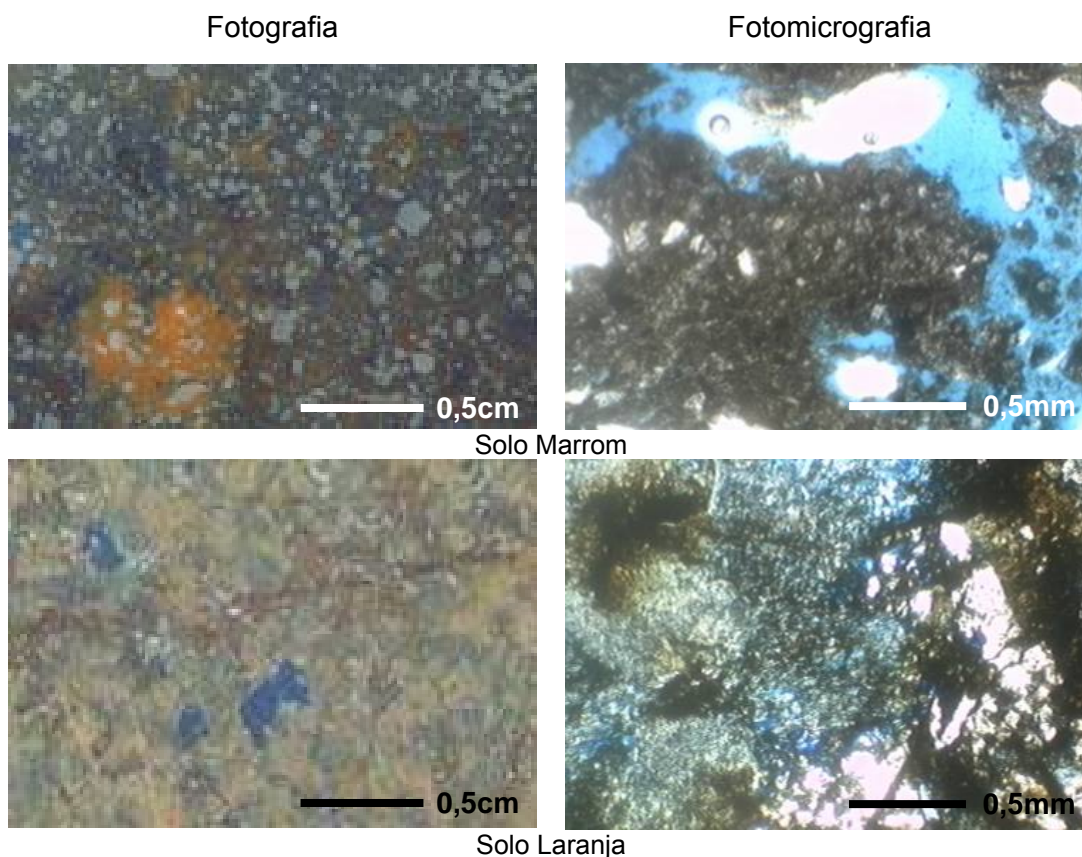
⁹ Ver Apêndices I e II

A forma dos pedes é dada por seu grau de arredondamento. O grau de arredondamento trata da característica superficial relacionada à agudeza dos cantos. De modo simplificado, pode-se classificar a superfície como angular quando apresenta facetas com vértices agudos, como subangular quando as facetas apresentam vértices ligeiramente arredondados, como subarredondado quando as curvas intercalam-se a facetas, como arredondado quando apresenta curvas não concordantes e como bem arredondado quando apresenta somente curvas suaves e concordantes.

A textura dos pedes é dada principalmente por sua rugosidade. Maiores detalhes sobre a classificação da pedalidade dos solos estudados são encontrados no Apêndice II.

5.3.5. Evolução microestrutural do perfil

Com base na petrografia e na micromorfologia dos solos, é apresentada a seguir uma seqüência de fotografias e de fotomicrografias das lâminas de solo e de rocha.



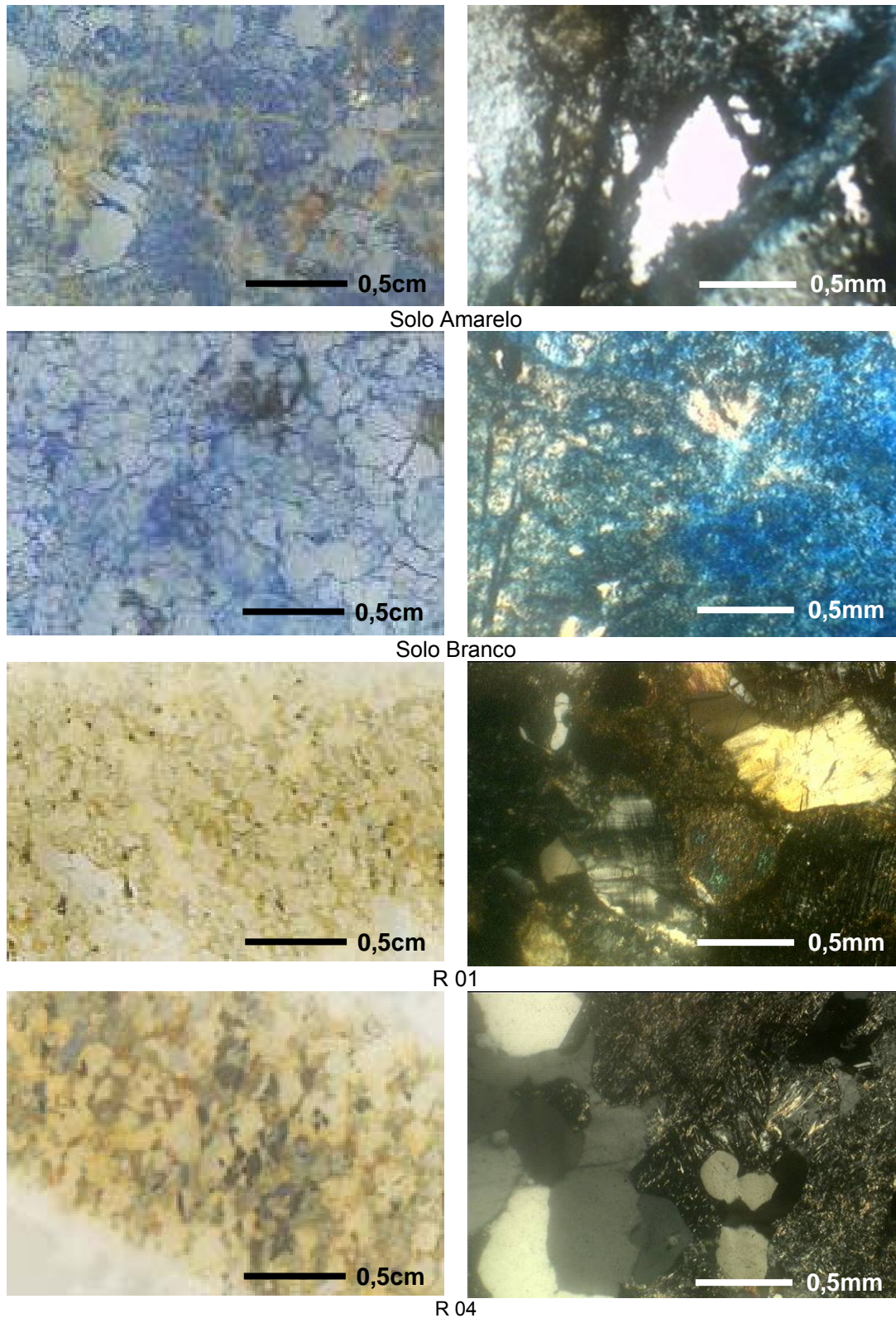


Figura 5.53 – Evolução microestrutural do perfil estudado

Na Figura 5.53, especialmente nas fotomicrografias (fotos das lâminas microscópicas) observa-se toda a transição da microestrutura da rocha até o solo mais superficial, em função do aumento do intemperismo. Nas amostras de

rocha observa-se a presença de minerais primários e o contato entre eles, características microestruturais da rocha são. É possível perceber que à medida que a profundidade diminui, ocorre a formação dos minerais secundários bem como o aumento da porosidade estipulada por estes minerais.

5.4. Análises microbiológicas

Foram determinadas a quantidade de microorganismos viáveis e cultiváveis bem como a atividade microbiana degradadora total dos solos do perfil. A seguir estão apresentados, sob a forma de tabelas e gráficos, os resultados obtidos para as cinco camadas de solo identificadas no Capítulo 3.

A Tabela 5.14 mostra a variação da quantidade de microorganismos ao longo do perfil estudado. A contagem foi realizada em duplicata para cada uma das camadas de solo. Os valores não apresentados na tabela não puderam ser determinados em função de contaminação de materiais e/ou falhas de execução. A Figura 5.54 apresenta valores médios dessas contagens.

Tabela 5.14 - Microrganismos viáveis e cultiváveis no meio TSA 10%

Registro da amostra	Solo	UFC/g de solo seco
2.4518.05	Marrom	$6,92 \times 10^6$
2.4518.05	Marrom	$1,20 \times 10^7$
2.4517.05	Vermelho	$1,53 \times 10^5$
2.4517.05	Vermelho	$1,70 \times 10^6$
2.4516.05	Laranja	$2,44 \times 10^6$
2.4516.05	Laranja	*
2.4515.05	Amarelo	$9,80 \times 10^5$
2.4515.05	Amarelo	$1,74 \times 10^5$
2.4514.05	Branco	$1,87 \times 10^6$
2.4514.05	Branco	*

*valores não determinados

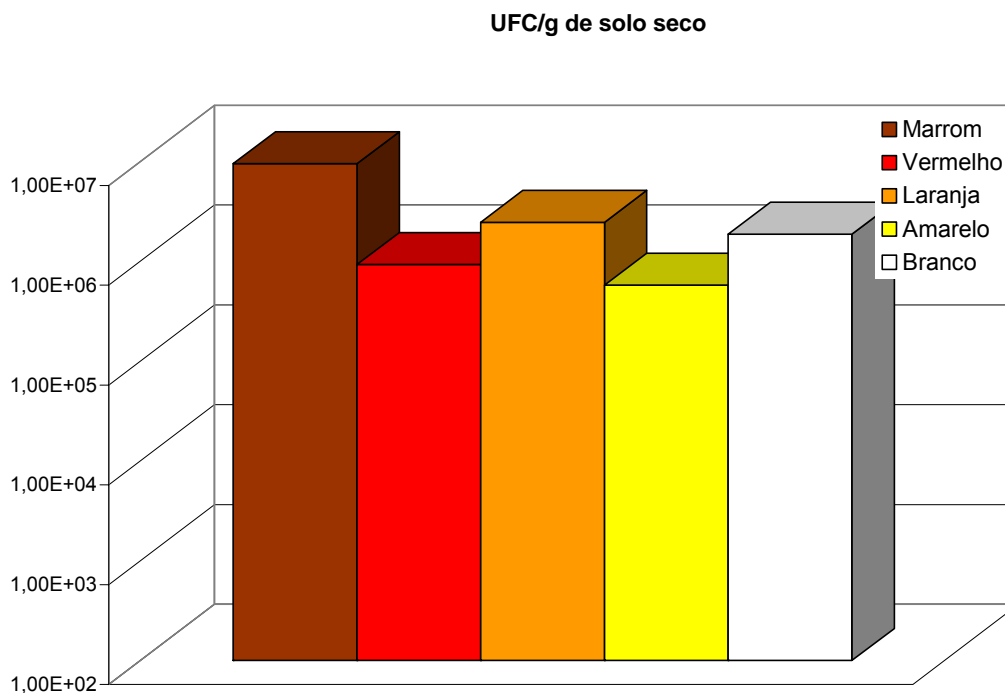


Figura 5.54 – Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis no meio TSA 10% - valores médios

Observa-se no gráfico que a variação na quantidade de microrganismos foi pequena entre os solos Marrom, Laranja e Branco, dentro da mesma ordem de grandeza. Já os solos Vermelho e Amarelo apresentaram uma quantidade significativamente menor, uma ordem de grandeza, de microrganismos viáveis e cultiváveis (bactérias e fungos).

Os resultados se mostram contrários aos encontrados na literatura (Moreira e Siqueira, 2002) que apontam para uma diminuição progressiva da quantidade de microrganismos com o aumento da profundidade em um perfil de solo.

A análise morfológica das colônias observadas na presente dissertação sugere haver diferença nas populações das diferentes camadas em concordância com o observado por Fierer *et al.* (2002). No entanto, para consolidar esta hipótese, mais investigações precisam ser realizadas, utilizando-se outras metodologias para determinação da biomassa microbiana como: taxa de respiração, análise de ácidos graxos de membrana entre outras.

Na Tabela 5.15 estão apresentados os dados relativos à atividade de enzimas degradadoras de matéria orgânica. A determinação foi realizada em duplicata para cada uma das camadas de solo.

Na Figura 5.55 observa-se que o solo Marrom, mais rico em matéria orgânica, apresenta uma taxa metabólica quase 15 vezes maior que a média dos demais. Dentre o restante dos solos não houve variação considerável, estando todos na mesma ordem de grandeza. Estes dados são esperados uma vez que esta atividade está diretamente relacionada a quantidade de matéria orgânica disponível para degradação. Sugere-se que ensaios utilizando atividades metabólicas microbianas como a desidrogenase, ou outras relacionadas a elementos presentes no perfil de solo estudado, sejam executadas.

Tabela 5.15 – Atividade microbiana degradadora total

Registro da amostra	Solo	μg de fluoresceína/g de solo seco/hora
2.4518.05	Marrom	12,827
2.4518.05	Marrom	17,594
2.4517.05	Vermelho	0,934
2.4517.05	Vermelho	2,532
2.4516.05	Laranja	0,842
2.4516.05	Laranja	0,955
2.4515.05	Amarelo	0,610
2.4515.05	Amarelo	0,693
2.4514.05	Branco	0,733
2.4514.05	Branco	0,938

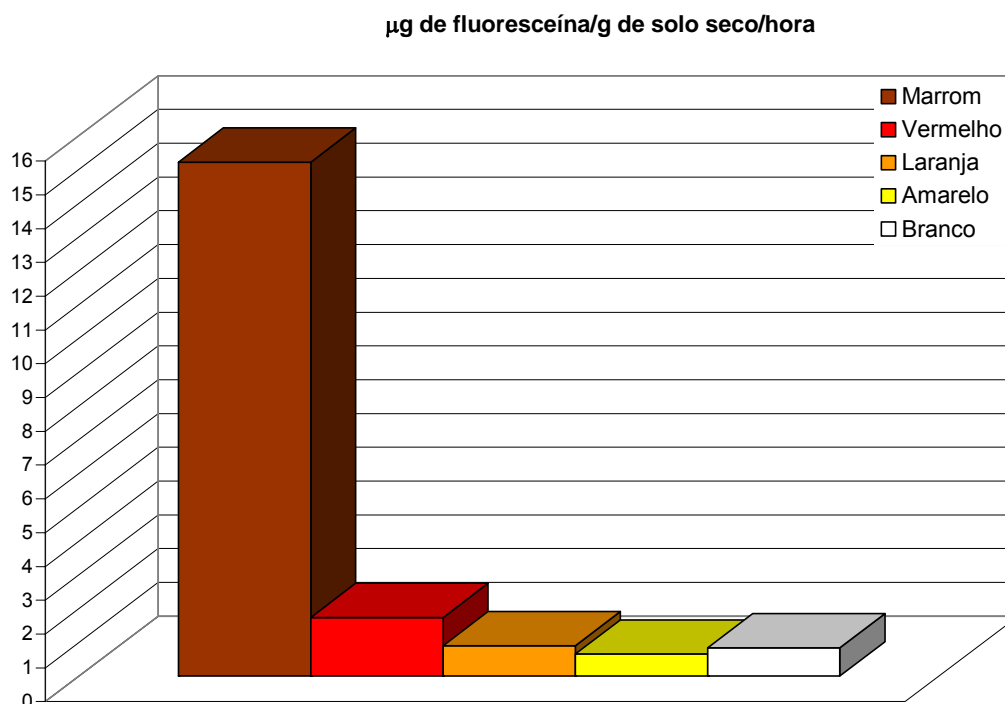


Figura 5.55 - Atividade microbiana degradadora total determinada pelo método do FDA – valores médios

Para melhor conhecimento da distribuição populacional microbiana neste perfil, sugere-se também o uso da biologia molecular como ferramenta complementar diagnóstica. Com isto, busca-se a possibilidade de encontrar algum fator biológico que apresente correlação com o grau de intemperismo físico-químico de perfis de alteração.

5.5. Ensaio de desagregabilidade

A erodibilidade de um solo pode também ser analisada a partir de observações do comportamento das amostras na presença de água.

No presente trabalho, duas amostras de solo Branco, de diferentes profundidades, foram ensaiadas por apresentarem características morfológicas muito distintas. Além destas, foram submetidas a este ensaio uma amostra de cada uma das outras camadas de solo com exceção da camada de solo Vermelho. Amostras de solo Vermelho não foram ensaiadas porque esta camada foi acrescentada ao perfil posteriormente, em função de se observar que a camada de solo superior apresentava comportamentos muito distintos para amostras visualmente similares. Nesta ocasião, estes ensaios já estavam concluídos e a realização de um novo ensaio atrasaria o andamento dos trabalhos.

Para a realização do ensaio de desagregabilidade, os corpos-de-prova, com 5 centímetros de lado, foram colocados dentro de duas bandejas metálicas e sobre pedras porosas saturadas cobertas com papel filtro. Em seguida, observaram-se suas reações ao processo de submersão.

Na primeira bandeja, após colocados os corpos-de-prova sobre as pedras porosas, o nível d'água foi mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos (Figura 5.56).



Figura 5.56 – Desagregabilidade - corpos-de-prova colocados sobre pedra porosa no início do ensaio por imersão progressiva - água na altura da base

Passados os 30 minutos, a altura da água foi aumentada até atingir $1/3$ da altura total da amostra (Figura 5.57).



Figura 5.57 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 30 minutos - nível d'água a $1/3$ da altura total do corpo

A seguir, os corpos foram mantidos com este nível d'água por mais 15 minutos e, na seqüência, o nível d'água foi elevado até $2/3$ da altura total do corpo (Figura 5.58).



Figura 5.58 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 45 minutos do início do ensaio - nível d'água a $2/3$ da altura total do corpo

Os corpos-de-prova foram mantidos com o nível d'água a 2/3 da altura total do corpo por mais 15 minutos e em seguida o nível foi elevado a 3/3 da altura total do corpo ficando assim todos eles inteiramente submersos (Figura 5.59).

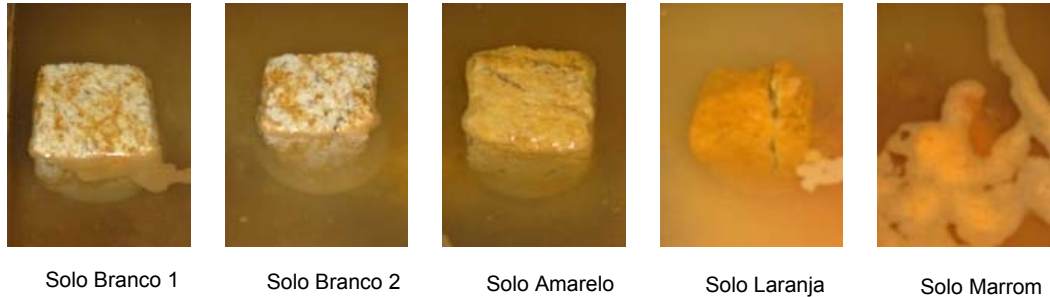


Figura 5.59 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 60 minutos do início do ensaio - totalmente submersos

Prosseguiu-se com o ensaio até que as amostras completassem um ciclo de 24 horas inteiramente submersas (Figura 5.60).

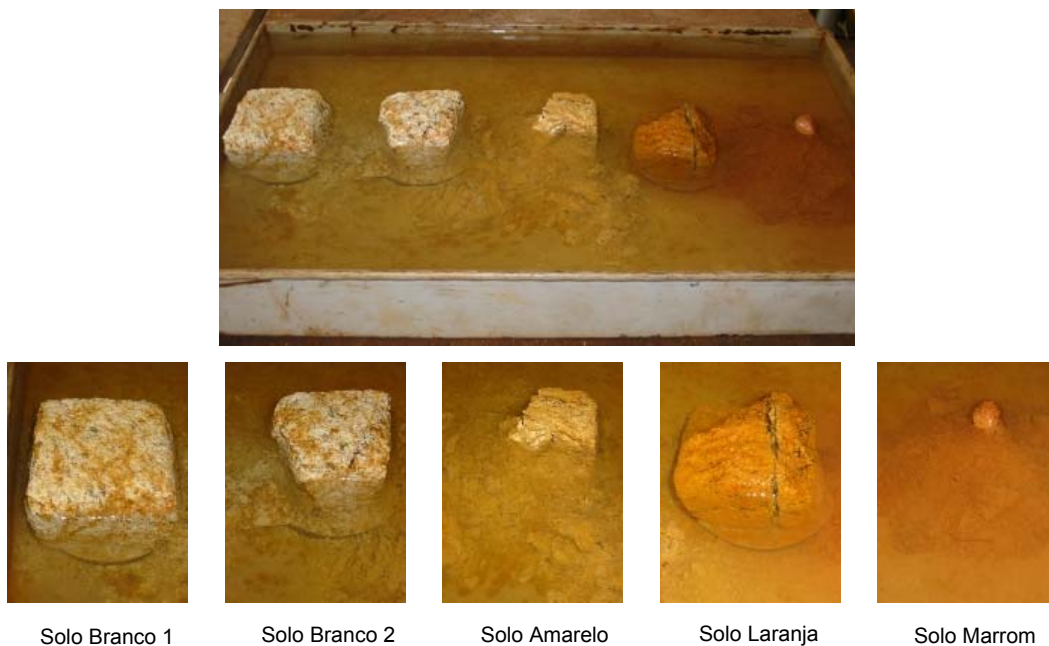


Figura 5.60 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 24 horas do início do ensaio - totalmente submersos

Na segunda bandeja, depois de colocados os corpos-de-prova sobre as pedras porosas, estes foram submetidos a imersão total desde o início do ensaio e mantiveram esta condição por 24 horas. Foram registrados os períodos de 15 minutos da primeira hora e o resultado final após as 24 horas. Os registros estão apresentados da Figura 5.61 à Figura 5.66.

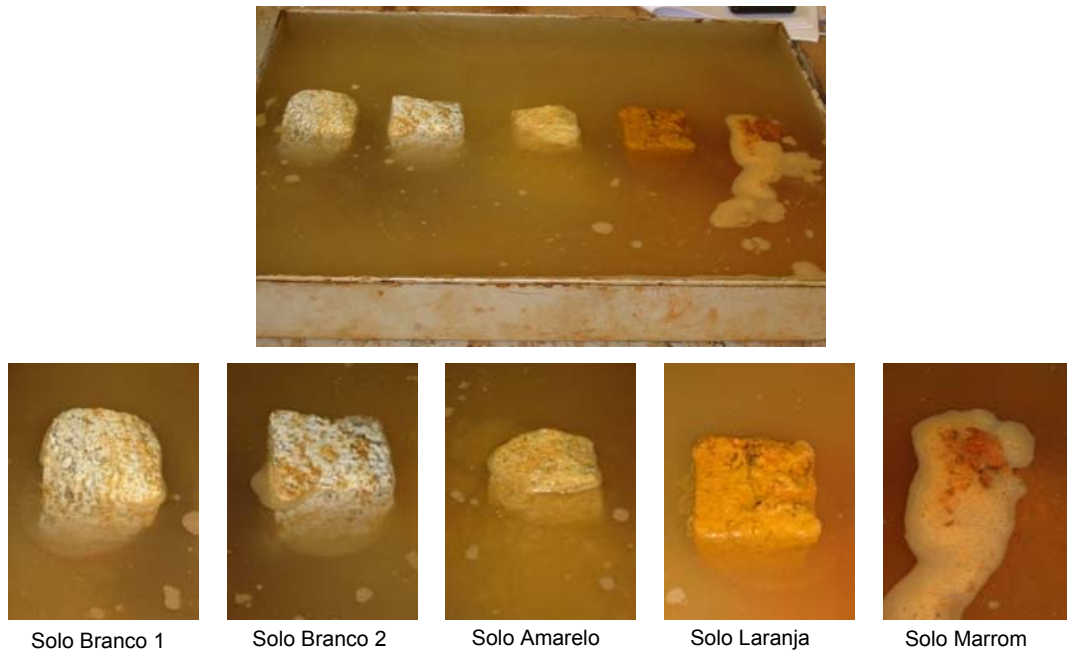


Figura 5.61 – Desagregabilidade - corpos-de-prova logo após a inundação no início do ensaio por imersão total desde o início



Figura 5.62 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 15 minutos



Figura 5.63 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 30 minutos



Figura 5.64 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 45 minutos

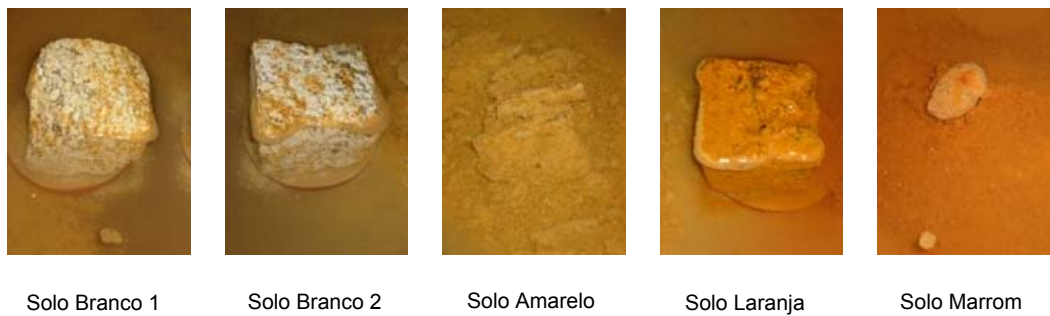


Figura 5.65 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 1 hora



Figura 5.66 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 24 horas

De uma forma geral, pôde-se verificar que as amostras de solo Branco mais inferiores (solo Branco 1) não apresentaram nenhuma alteração na sua forma em nenhum estágio dos ensaios realizados. No entanto, finalizados os ensaios, desagregaram-se muito facilmente ao serem tomados na mão.

Por outro lado, as outras amostras de solo Branco (solo Branco 2) não se desagregaram mesmo quando tomadas na mão e submetidas a fortes pressões dos dedos. Estas amostras apresentaram desagregação apenas após estarem saturadas, muito depois da primeira hora de ensaio. Enquanto no ensaio de imersão progressiva uma parte do canto da amostra tombou para a esquerda, decorridas várias horas de ensaio, no de imersão total desde o início a amostra se dividiu ao meio tombando uma metade para a direita.

O solo Amarelo, quando submetido ao ensaio de imersão progressiva, apenas começou a se desmanchar depois de estar totalmente submerso. Ao final do ensaio se mostrou aproximadamente 50% desmanchado. Já no ensaio de imersão total desde o início, este solo se desmanchou imediatamente após estar submerso, se desmanchando totalmente e permanecendo assim, como o mais desagregado dos solos, até o término das 24 horas.

Por outro lado, o solo Laranja foi o que se comportou de maneira mais intacta nos dois ensaios. Em nenhum deles este solo apresentou qualquer desagregação de partículas. Até mesmo no momento de desmontar o ensaio, quando tomadas na mão, as amostras de solo Laranja permaneceram intactas.

O solo Marrom, no ensaio de imersão progressiva, foi o primeiro a iniciar seu processo de desagregação. Antes mesmo de estar totalmente submerso, com apenas 2/3 de sua altura sob a água, este solo já se apresentava quase que 50% desagregado. Ao término do ensaio era, dentre os solos analisados, o mais desmanchado. No ensaio de imersão total desde o início, o solo Marrom já se apresentava quase que totalmente desagregado logo após o início do ensaio, quando foi todo submerso. No decorrer das 24 horas, o restante da amostra se desfez e o solo se encontrava totalmente desagregado ao término do ensaio.

Conclui-se neste ensaio que, o solo Marrom, o que apresenta maior teor de argila, é o mais erodível dentre os solos estudados, seguido do solo Amarelo e do solo Branco. Visualmente o solo Amarelo pareceu menos coeso que o Branco, mas, quando tomados na mão os corpos-de-prova, esta tendência não se verificou. Os solos Brancos se desmancharam totalmente enquanto o Amarelo permaneceu da maneira como estava na bandeja. O solo Laranja foi o que se mostrou menos erodível.

5.6. Ensaio de cisalhamento direto

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto estão apresentados da Figura 5.67 a Figura 5.71 sob a forma de curvas que mostram a variação da tensão cisalhante e da altura dos corpos-de-prova em função dos deslocamentos horizontais. Nos gráficos, considerou-se redução de altura como sendo positiva, com a expansão correspondendo a valores negativos.

Nos ensaios não é possível distinguir claramente picos de resistência. O comportamento do material é distinto também quanto à variação de volume durante o cisalhamento – a altura da maioria dos corpos-de-prova tendeu a diminuir com a evolução dos deslocamentos.

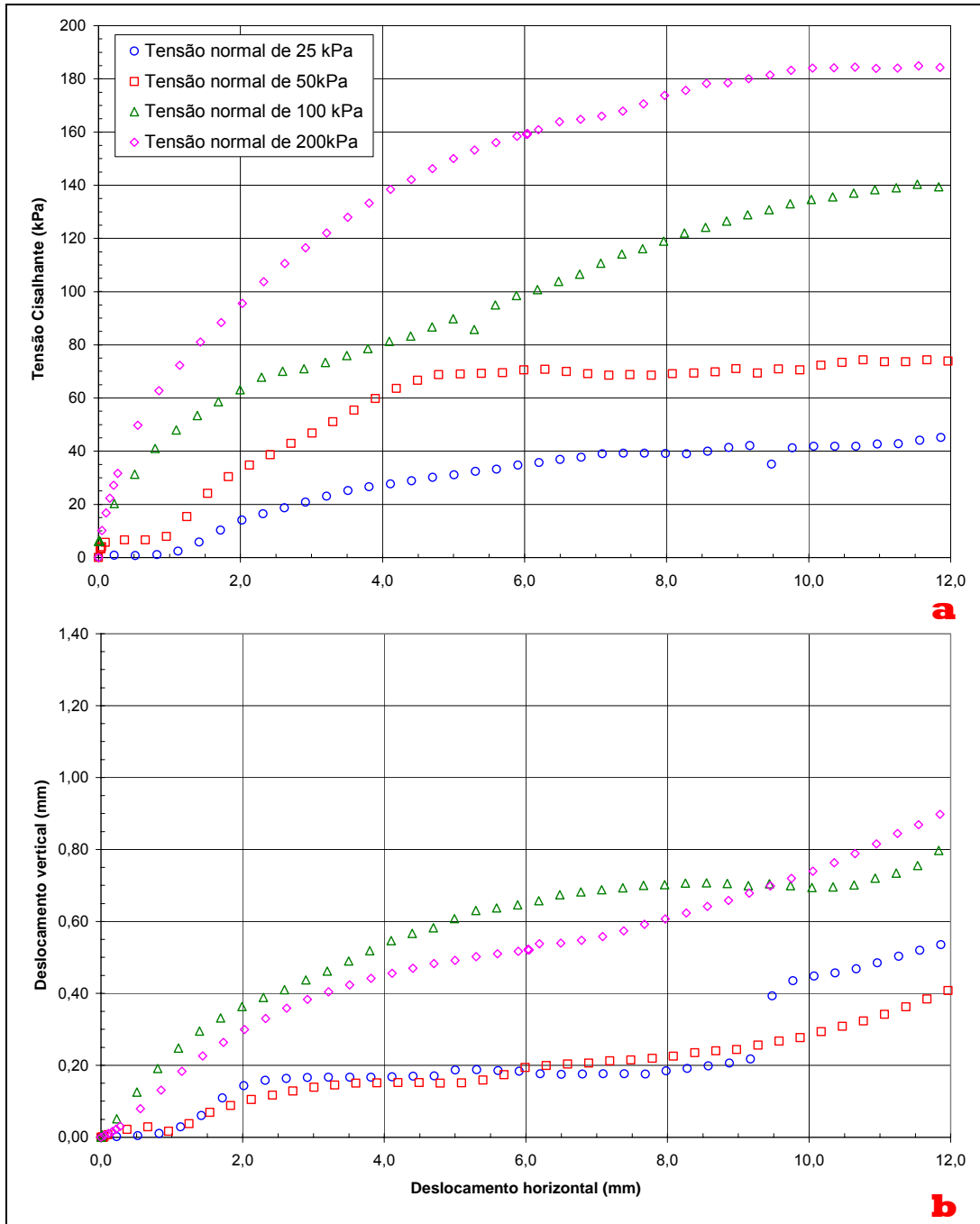


Figura 5.67 – Solo Branco: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

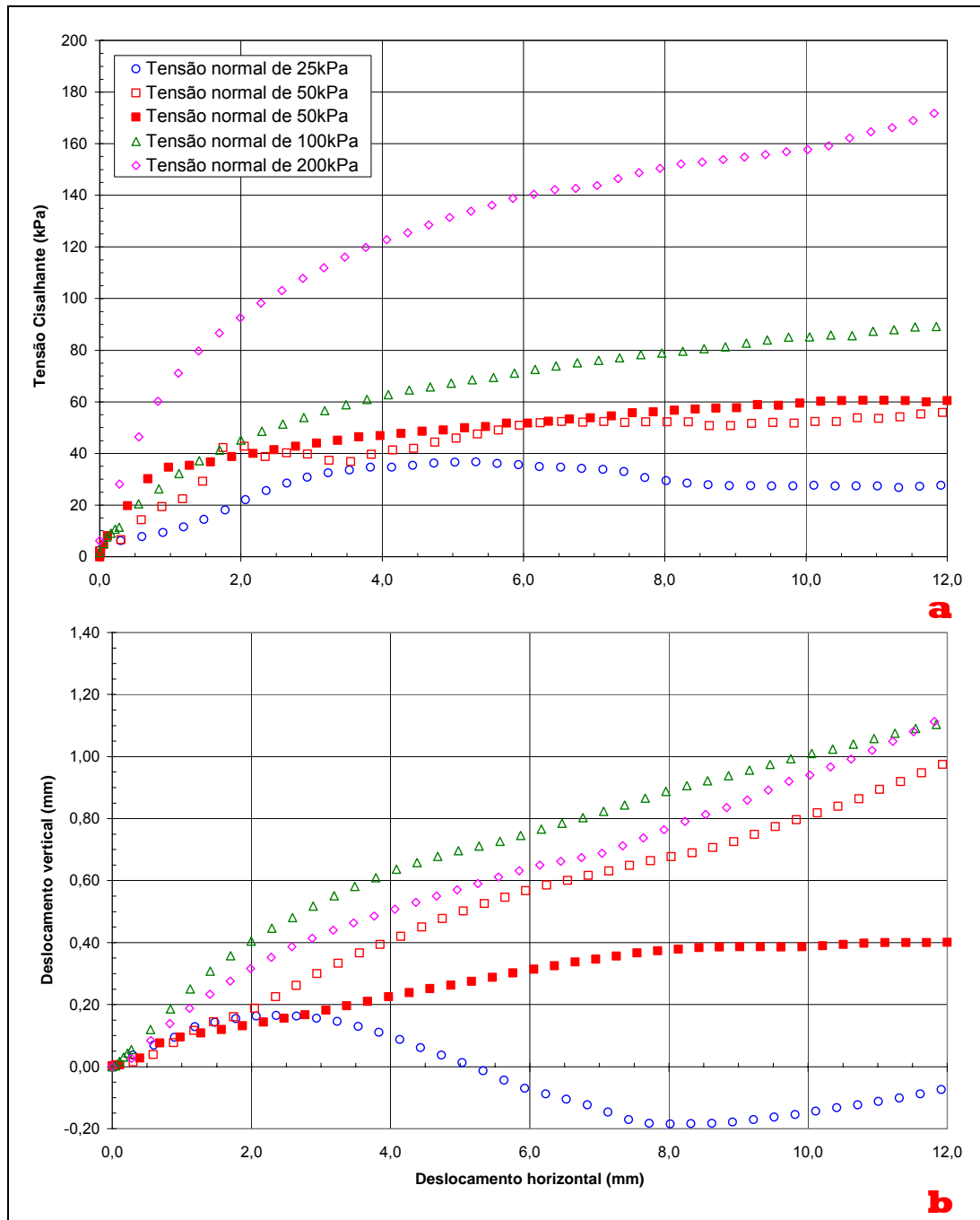


Figura 5.68 – Solo Amarelo: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

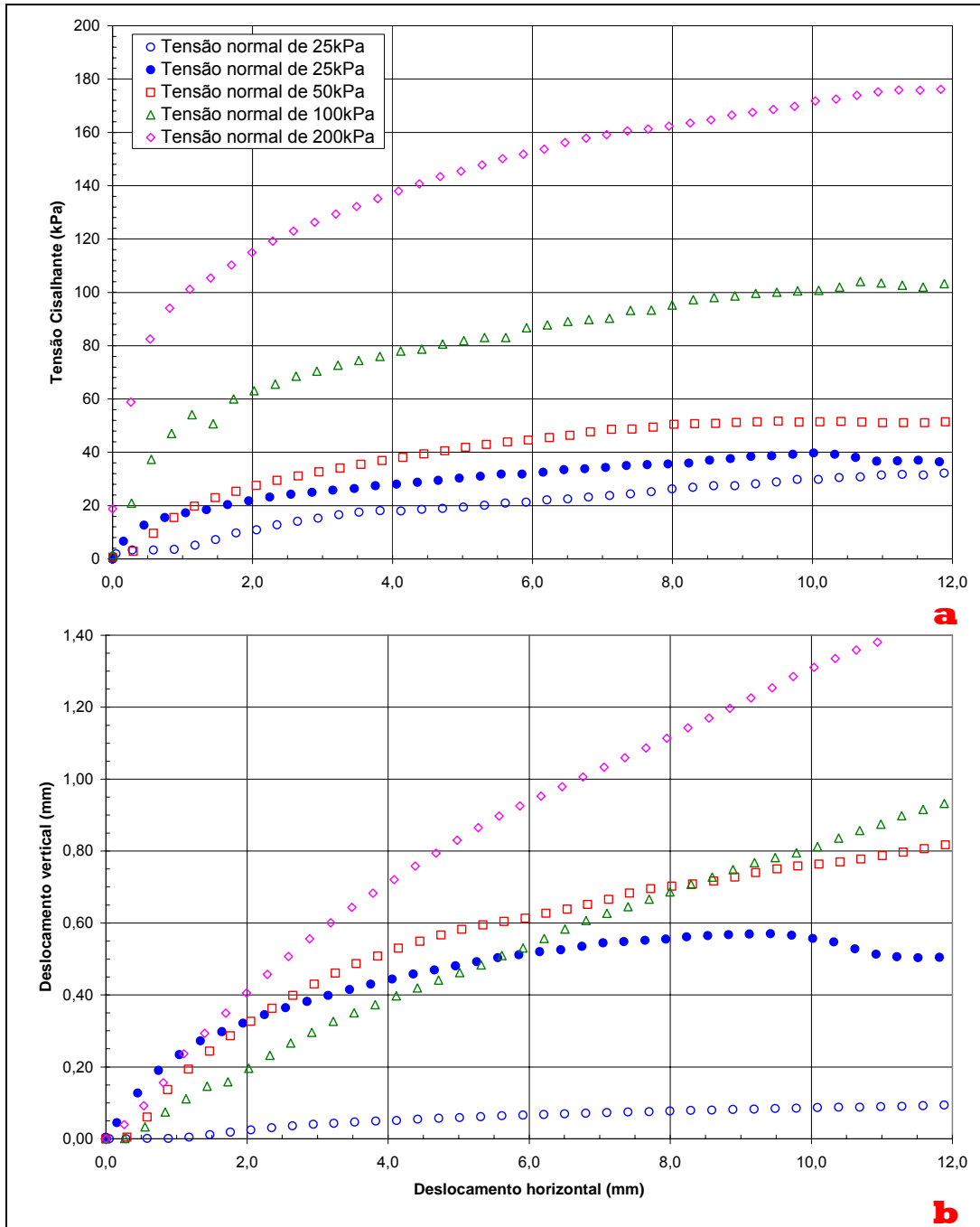


Figura 5.69 – Solo Laranja: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

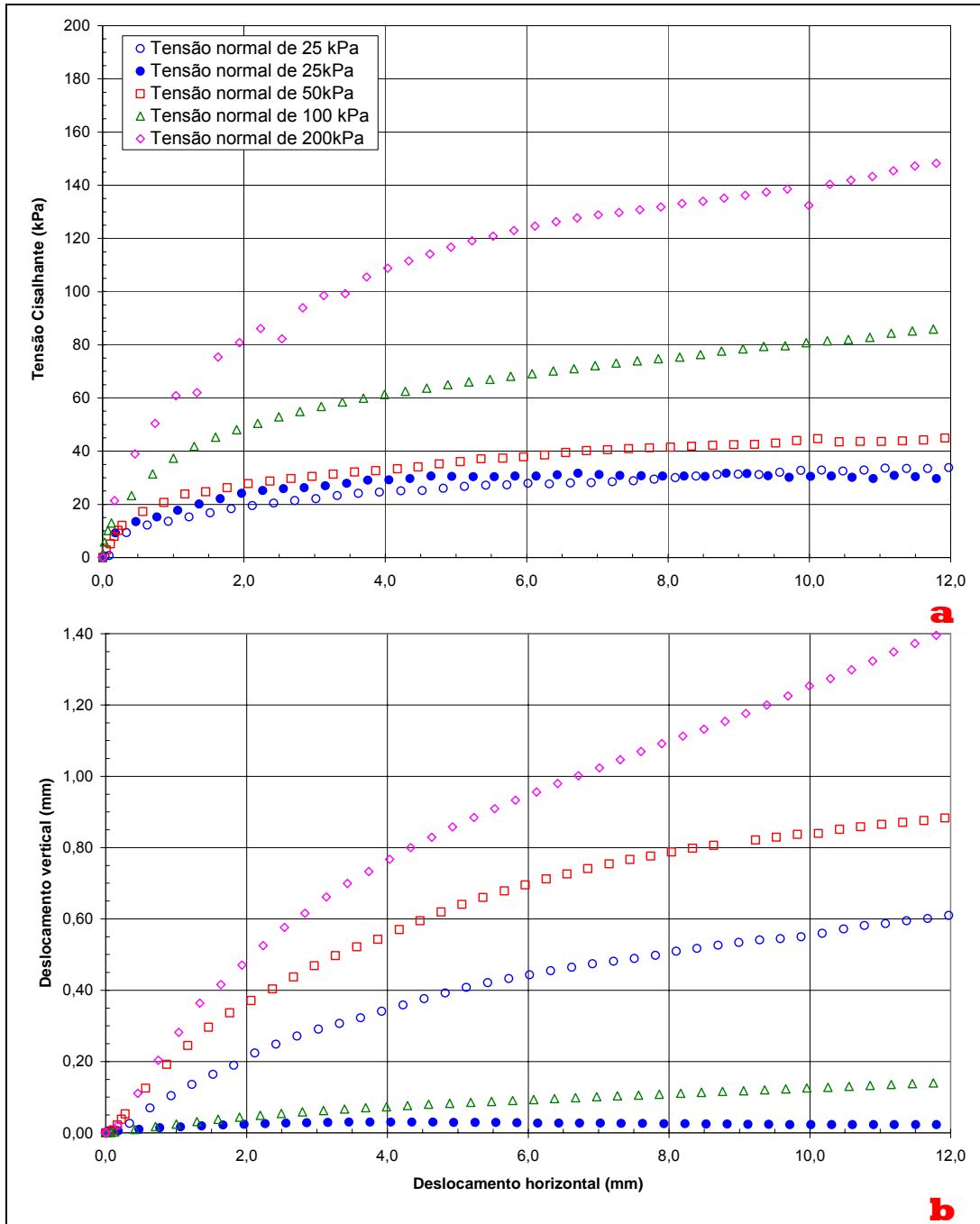


Figura 5.70 – Solo Vermelho: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

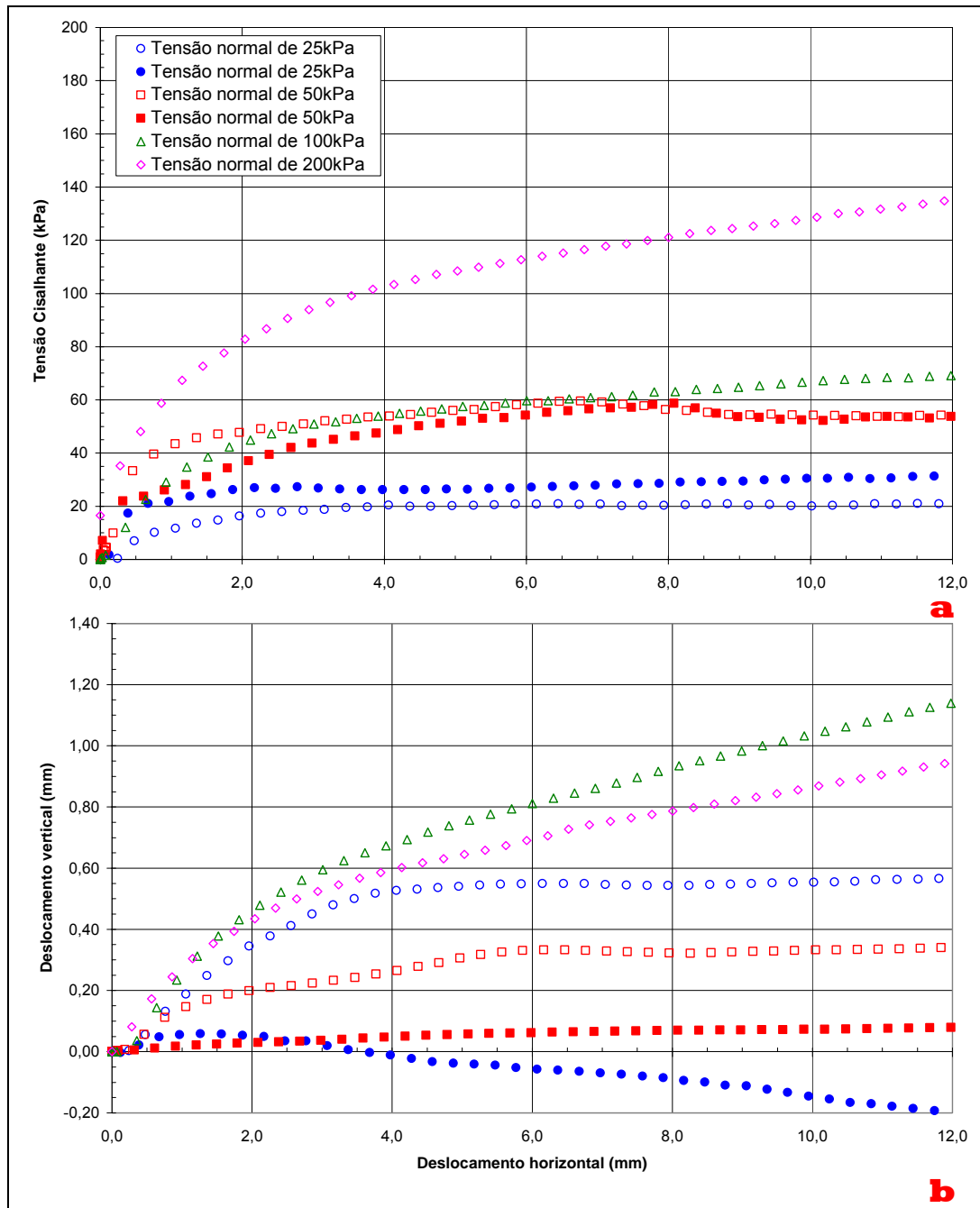


Figura 5.71 - Solo Marrom: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

A Figura 5.72 ilustra o aspecto de um dos corpos-de-prova após o cisalhamento.

Na Figura 5.73 os resultados dos ensaios estão representados como pontos em um diagrama tensão cisalhante máxima versus tensão normal. Para efeito de comparação, são apresentadas as retas (envoltórias assumindo como válido o critério de Mohr-Coulomb) que melhor se ajustam a cada conjunto de ensaios.



Figura 5.72 – Corpo-de-prova após o cisalhamento

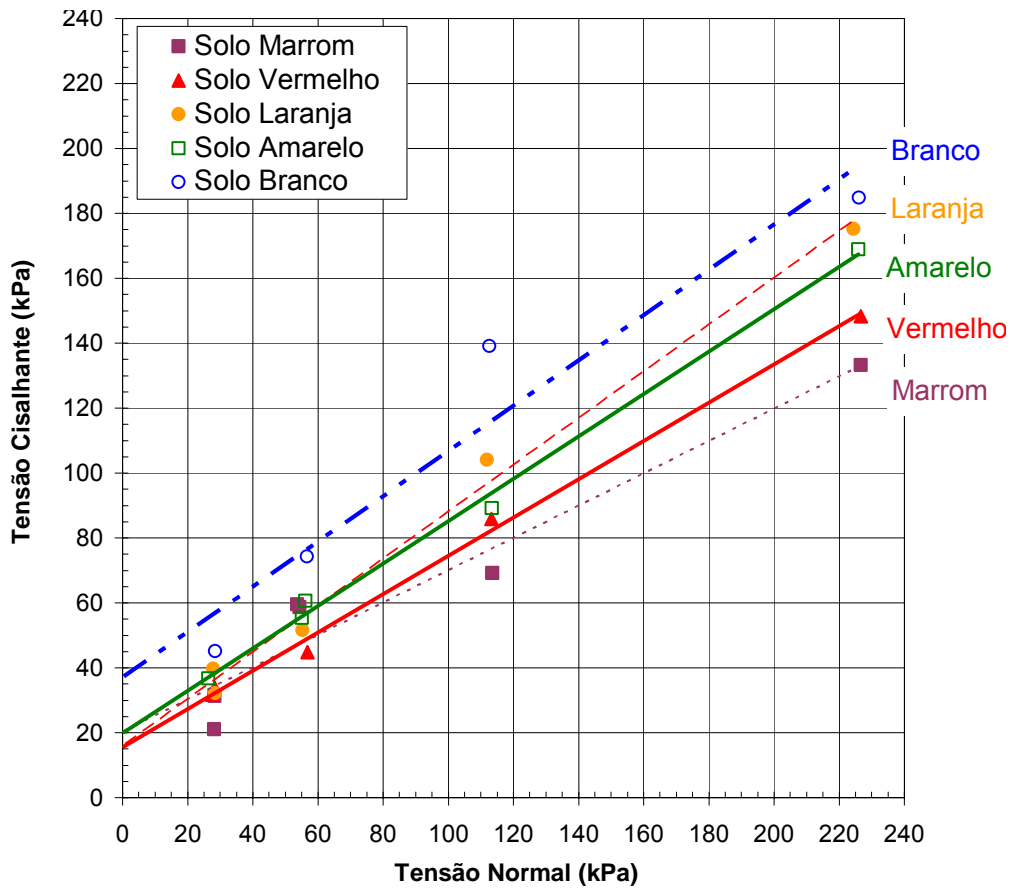
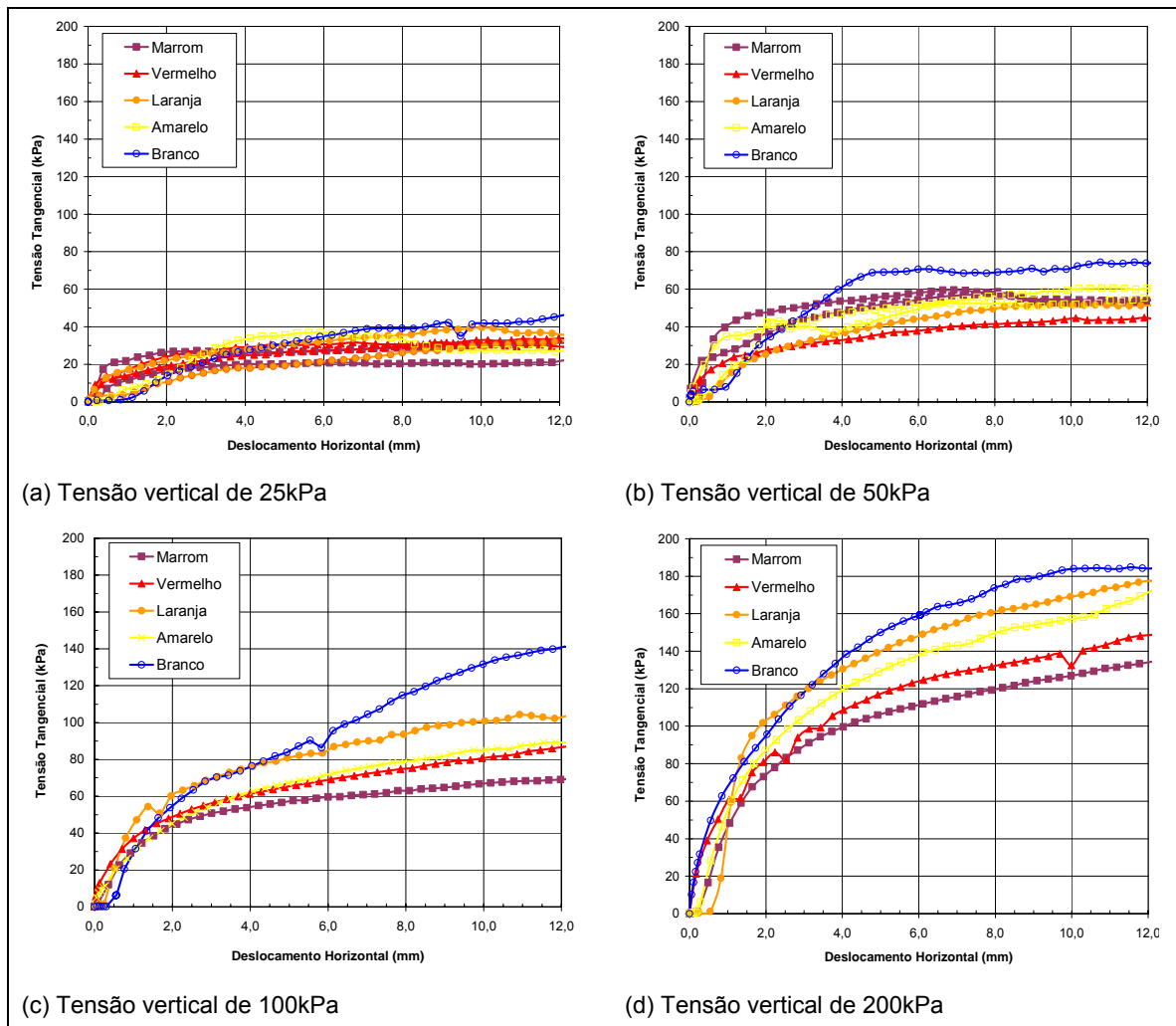


Figura 5.73 – Envoltória de resistência assumindo como válido o critério de Mohr-Coulomb

Tabela 5.16 – Resumo dos ensaios de cisalhamento direto

	Coesão (c')	Ângulo de atrito (ϕ')
Marrom	20,3	26,5
Vermelho	15,6	30,5
Laranja	16,0	35,8
Amarelo	19,9	33,2
Branco	37,0	34,9

Na Figura 5.74, as curvas tensão cisalhante \times deslocamento dos ensaios de cisalhamento direto são comparadas. Os resultados estão agrupados conforme a tensão normal. Analisando-se as informações reunidas na figura, pode-se notar a tendência das curvas dos corpos-de-prova não exibirem pico.

Figura 5.74 – Ensaios de cisalhamento direto – curvas tensão cisalhante \times deslocamento

A Figura 5.75 mostra a variação das alturas dos corpos-de-prova ao longo dos ensaios agrupadas de acordo com a tensão normal aplicada. Observa-se que a maior parte das amostras tende a contrair apesar das curvas tensão

cisalhante x deslocamento apresentar um comportamento de endurecimento, ou seja, um aumento da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal.

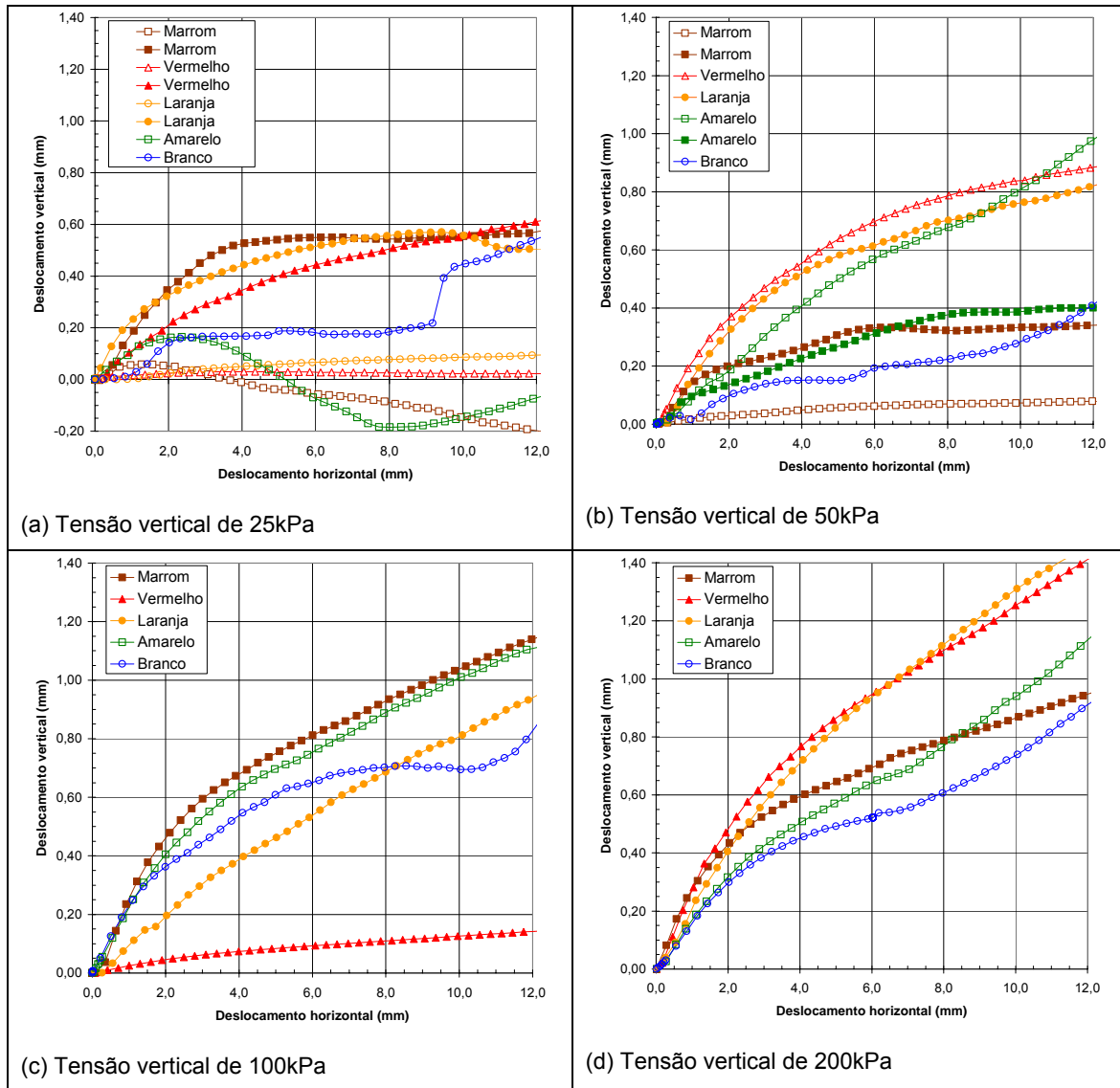


Figura 5.75 – Variação das alturas dos corpos-de-prova ao longo dos ensaios

6 Discussão dos resultados

Muitos autores já sugeriram que as propriedades químicas, mineralógicas, e estruturais de um perfil de solo tropical vão variar com a sua profundidade, muito embora aspectos como cor e textura sejam muitas vezes aparentemente iguais (e.g. Camapum de Carvalho, 2004). Embora existam diversos trabalhos mencionando a existência do intemperismo biológico (e.g. Hall *et al.*, 2004), não se encontram dados na literatura que correlacionem a influência dos microrganismos do solo no seu grau de intemperismo.

Os resultados encontrados nas análises realizadas nesta dissertação sugerem, muitas vezes, que o grau de intemperismo do perfil estudado diminui com o aumento da profundidade. No entanto, a ocorrência de intemperismo diferencial foi confirmada em todas as análises, possivelmente como resultado das fraturas existentes na rocha que originou o perfil. Assim, inclusive concordando com observações táctil-visuais de campo, o grau de intemperismo do perfil estudado pode e deve variar tanto na vertical quanto na horizontal.

Devido à diversidade e quantidade de ensaios implementados na presente dissertação, não se procurou comparar de forma sistemática todos os dados obtidos, optando-se por efetuar comparações apenas entre aqueles que, se espera, propiciem melhores correlações.

6.1. Relação entre propriedades físicas e propriedades químicas

A composição granulométrica dos solos estudados é bastante variável. O teor médio de argila das amostras é decrescente com a profundidade. O mesmo acontece com o teor de silte, menos para o solo Marrom, onde se observa uma queda na parcela desta fração. É possível perceber a partir dos resultados das curvas granulométricas que, à medida que a profundidade aumenta, os teores de pedregulho e areia também aumentam, enquanto os teores das frações mais finas, silte e argila, diminuem. Esta variação está possivelmente associada à ação do intemperismo uma vez que o fato dos teores da fração mais grossa (pedregulho+areia) se reduzirem em direção à superfície sugere que parte do

material granular teria sido intemperizada, aumentando a porcentagem de fração fina (argila+silte) nas camadas mais superficiais.

A Figura 6.1 mostra uma correlação polinomial existente entre as frações dos solos e o índice de intemperismo químico ba_1 . Este gráfico sugere que à medida que o grau de intemperismo aumenta, aumenta também o teor da fração fina e diminui o da fração grossa, ambos de forma polinomial. O R^2 do gráfico representa o coeficiente de correlação da equação com os pontos encontrados e tem seu valor máximo igual a 1 para uma correlação perfeita.

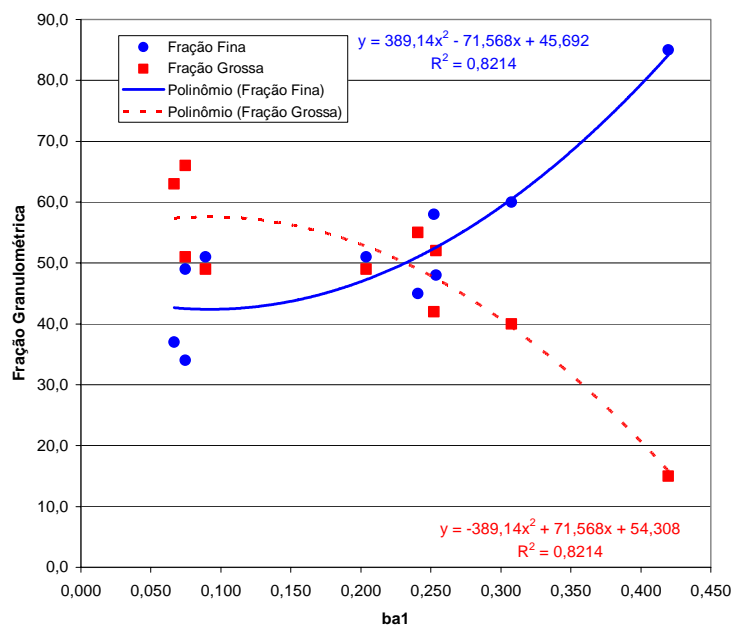


Figura 6.1 – Correlação polinomial entre as frações dos solos e o índice de intemperismo ba_1

O pH mede o índice de acidez do solo. Sabe-se que o perfil de solo estudado na presente dissertação é um perfil de solo ácido. Nesta faixa de pH o alumínio e o ferro são insolúveis, enquanto os elementos alcalinos e alcalinos terrosos (sódio, potássio, cálcio, magnésio etc.) são muitas vezes totalmente lixiviados.

O índice de intemperismo químico ba_1 (Equação II) avalia a quantidade de potássio e sódio dividida pela quantidade de alumínio presente em cada solo. Dessa forma, procurou-se correlacionar estes dois parâmetros (pH x ba_1) esperando-se encontrar uma forma de avaliar como se dá a variação do pH em função do grau de intemperismo. A Figura 6.2 sugere uma correlação hiperbólica entre estes dois parâmetros com coeficiente de correlação R^2 igual a 0,832.

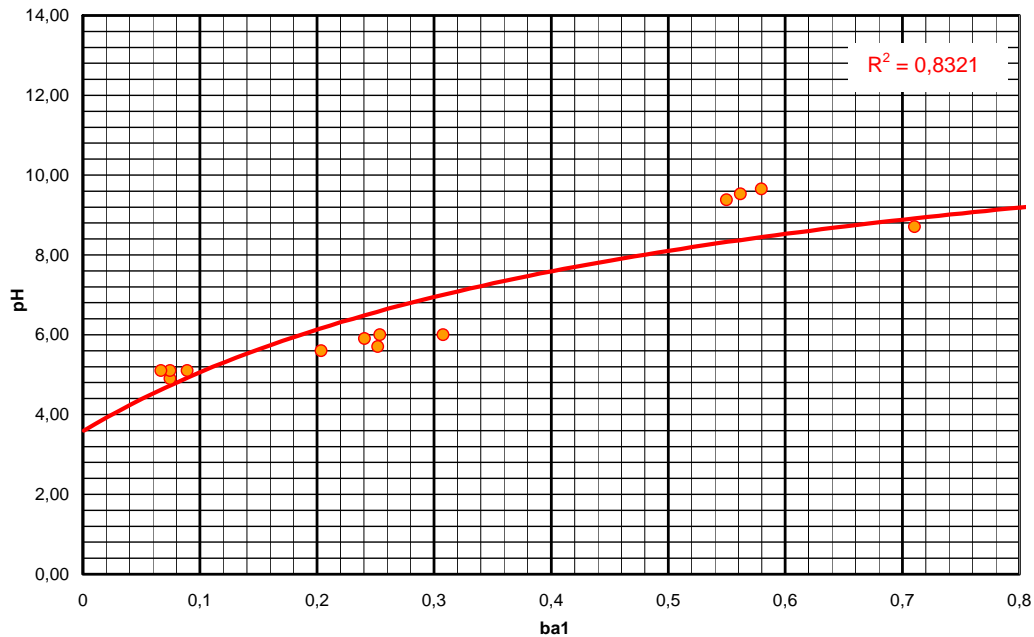


Figura 6.2 – Correlação hiperbólica entre o pH em água dos solos e rochas e o índice de intemperismo químico ba_1

O índice de perda ao fogo está diretamente relacionado ao grau de alteração dos minerais e à formação dos argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio. A variação ao longo da profundidade do índice de perda ao fogo (P.F.) mostra a evolução do intemperismo num dado perfil. Para o perfil estudado nesta dissertação, a variação deste índice indicou uma forte tendência de evolução do intemperismo com a diminuição da profundidade.

A variação do índice de intemperismo químico ba_1 (Equação II), de uma forma geral, também apresentou esta tendência. Assim, estes dois parâmetros foram correlacionados resultando uma curva logarítmica de alto grau de correlação ($R^2 = 0,986$), como mostra a Figura 6.3.

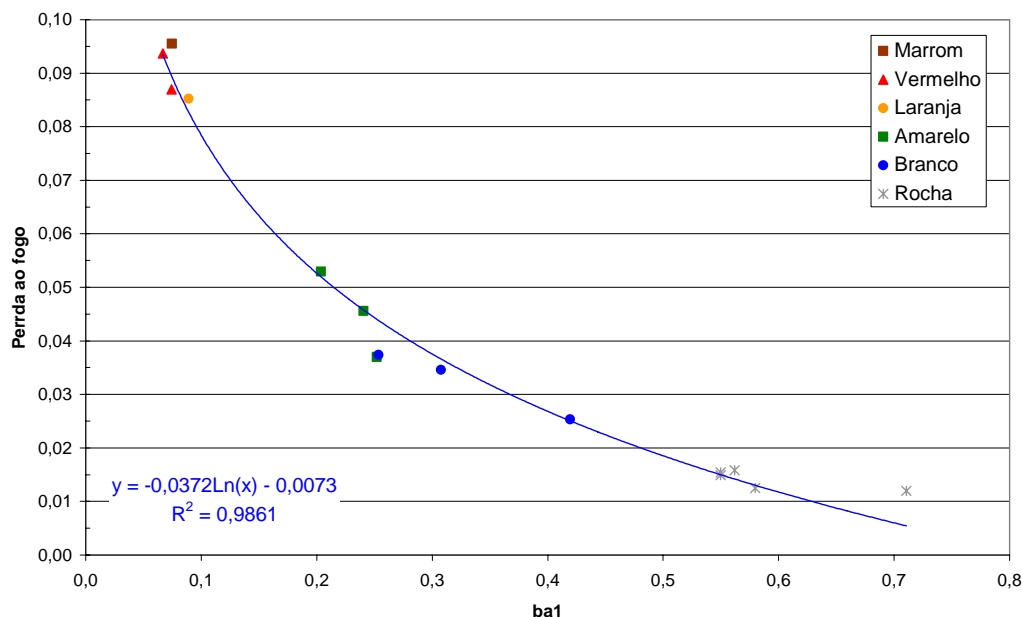


Figura 6.3 – Correlação logarítmica entre o índice de Perda ao fogo dos solos e rochas e o índice de intemperismo químico ba_1

Estas três correlações entre propriedades físicas e propriedades químicas do perfil foram propostas e apresentadas por apresentarem um elevado grau de correlação. No entanto, é possível que outras boas correlações possam também advir de posteriores análises dos dados obtidos.

A Tabela 6.1 mostra um resumo das equações que definem as correlações obtidas entre alguns índices físicos e o índice de intemperismo químico ba_1 , bem como de seus respectivos coeficientes de correlação.

Tabela 6.1 – Correlações físico químicas propostas

Correlação	Equação	Coeficiente de correlação (R^2)
Fração fina x ba_1	$F.f. = 389,14 \times ba_1^2 - 71,568 \times ba_1 + 45,692$	0,8214
Fração grossa x ba_1	$F.g. = -389,14 \times ba_1^2 + 71,568 \times ba_1 + 54,308$	0,8214
pH x ba_1	$pH = 4,2725 + \left\{ \frac{ba_1 - 0,0425}{0,0666 + [0,1156 \times (ba_1 - 0,0425)]} \right\}$	0,8321
Perda ao fogo x ba_1	$P.F. = -0,0372 \times \ln(ba_1) - 0,0073$	0,9861

F.f. = Fração fina (argila + silte)

F.g. = Fração grossa (pedregulho + areia)

P.F. = Perda ao fogo

6.2. Relação entre propriedades físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas

Foi verificado a partir das curvas granulométricas dos solos que, os mais superficiais, Marrom e Vermelho, consistem em silte arenoso, enquanto os subsuperficiais, Laranja, Amarelo e Branco, são areias siltosas. O solo Marrom foi o único a apresentar quantidade significativa de argila.

Através das análises das lâminas delgadas foi possível confirmar que o solo Marrom apresenta quantidade mais significativa de plasma que os solos Amarelo e Branco. No entanto, quando comparado com o solo Laranja, o solo Marrom apresentou menor quantidade de plasma, não confirmando o que foi obtido com as curvas granulométricas. Isto vem demonstrar que, no estudo deste solo residual se faz necessária uma análise conjunta de fatores para melhor avaliação da distribuição granulométrica dos solos.

A Tabela 6.2 apresenta, além da freqüência de plasma observada nas lâminas e das médias das frações argila e argila+silte para cada solo, o índice de vazios médio de cada camada, índice também influenciado pela distribuição granulométrica.

Tabela 6.2 – Porcentagem de plasma observada na microscopia óptica, porcentagem de fração fina obtida nos ensaios granulométricos e índice de vazios médio dos solos

Solo	Freqüência de plasma (%)	Fração argila (%)	Fração fina (argila + silte) (%)	Índice de vazios médio
Marrom	40,89	23,0	66,0	0,88
Vermelho	-	8,0	57,0	1,30
Laranja	47,4	8,0	49,0	1,27
Amarelo	35,3	5,0	48,7	0,85
Branco	30,5	4,0	46,0	0,51

A partir destes dados observa-se que o comportamento do índice de vazios médio está em concordância com o comportamento da freqüência de plasma, como mostra o gráfico da Figura 6.4. O gráfico apresenta uma correlação linear entre estes dois parâmetros com coeficiente de correlação R^2 igual a 0,923.

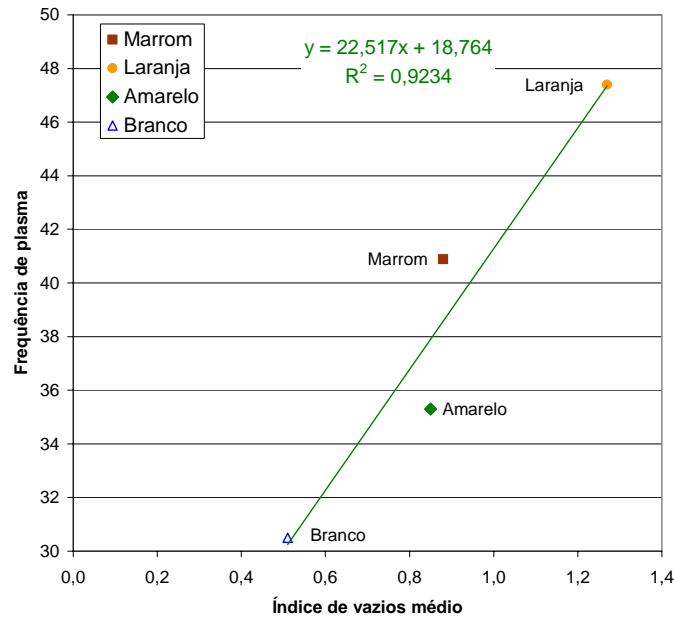


Figura 6.4 – Frequência de plasma (%) x Índice de vazios médio

Através de análises químicas parciais, por meio de complexo sortivo, notou-se que os valores médios de capacidade de troca catiônica (Tabela 6.3), dos solos do perfil estudado, apresentam boa correlação polinomial com as frações argila e as frações argila+silte obtidas nos ensaios granulométricos. A Figura 6.5 mostra esta correlação.

Tabela 6.3 - Valores médios de capacidade de troca catiônica para cada solo

Solo	CTC
Marrom	6,39
Vermelho	3,91
Laranja	4,52
Amarelo	4,95
Branco	3,06

A Figura 6.5 mostra que a capacidade de troca de cátions é maior quanto maior a fração fina do solo, ou seja, ela aumenta juntamente com o grau de intemperismo do solo.

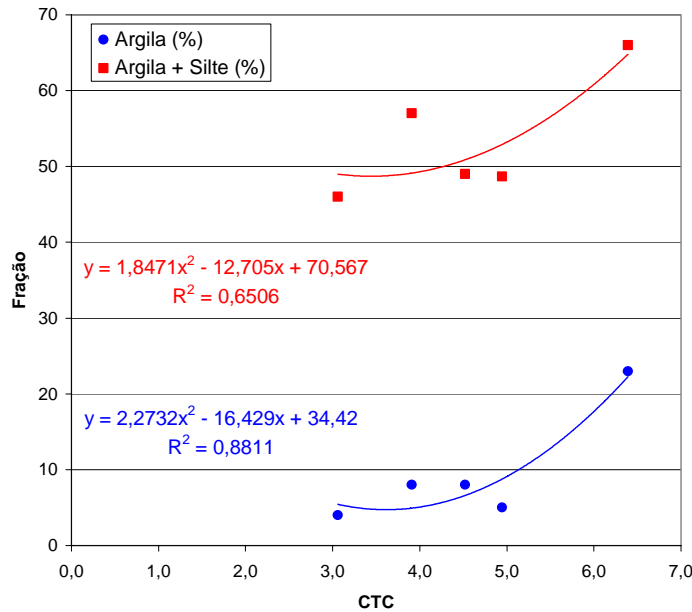


Figura 6.5 – Correlação polinomial entre as frações argila e argila+silte e a capacidade de troca catiônica dos solos

O solo Branco é o que apresenta a maior quantidade de areia e pedregulho. Além disso, apresenta também a menor porosidade média obtida por correlação a partir dos ensaios de caracterização física, a menor porosidade no ensaio de porosimetria de mercúrio e a menor quantidade de poros na contagem por pontos em lâminas delgadas.

A Tabela 6.4 apresenta uma comparação entre estes dados para os cinco solos do perfil estudado.

Tabela 6.4 – Porosidade dos solos obtida por diferentes métodos

Solo	Porosidade média (n) (%)	Porosidade total por Hg (%)	Freqüência de poros em lâmina delgada (%)
Marrom	46	30,17	40,89
Vermelho	56	42,07	-
Laranja	56	43,01	26,40
Amarelo	46	39,09	30,10
Branco	34	33,29	24,40

A Figura 6.6 compara os resultados obtidos pelos três diferentes métodos. Observa-se uma concordância entre os resultados de porosidade dos solos obtida a partir dos ensaios de caracterização física, porosimetria e microscopias ópticas para quantificação de poros.

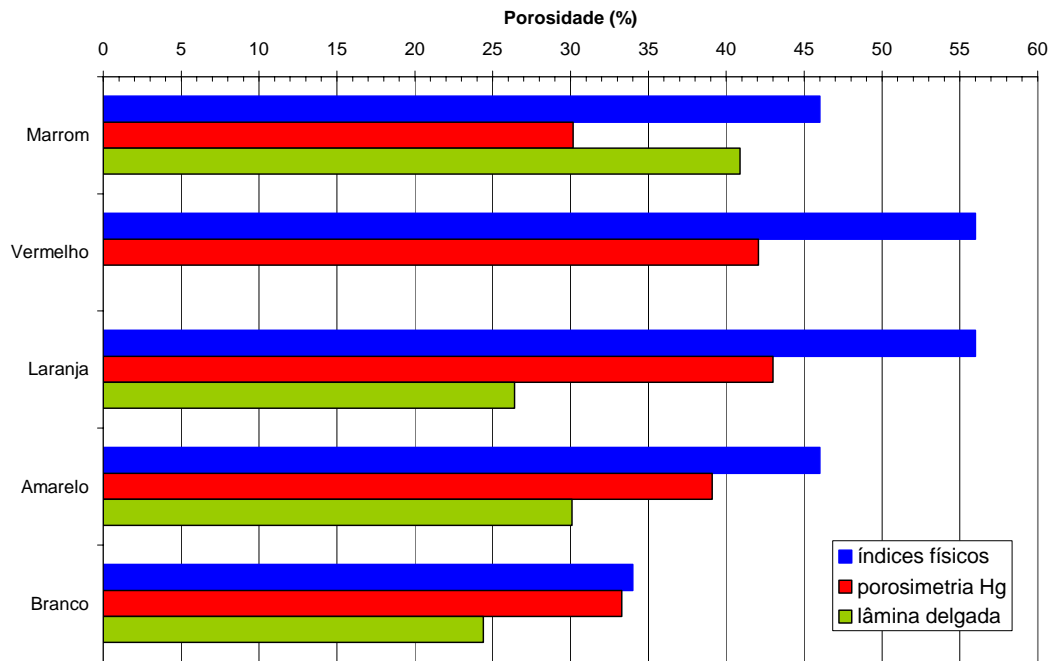


Figura 6.6 – Porosidade dos solos obtida por diferentes métodos

Embora o comportamento da variação da porosidade ao longo do perfil seja semelhante para as 3 metodologias, a porosidade obtida a partir dos ensaios de caracterização física se mostrou sempre superior às demais. Os dados obtidos a partir da contagem de pontos em lâminas delgadas foram os que se mostraram menores, possivelmente pela limitação que se tem nesta metodologia a partir da qual só é possível contabilizar poros com diâmetros maiores que $30\mu\text{m}$. Cabe aqui ressaltar que os ensaios por injeção de mercúrio contabilizam apenas os poros interligados, pois o mercúrio não consegue penetrar no interior de poros isolados. Esta talvez seja uma das razões pelas quais os resultados obtidos por este ensaio são menores do que aqueles obtidos a partir dos ensaios de caracterização física. A vantagem da porosimetria de mercúrio consiste, principalmente, no fornecimento da curva de distribuição do diâmetro dos poros. No entanto, sua principal desvantagem está no custo elevado em relação aos demais.

6.3. Relação entre propriedade físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas e a resistência ao cisalhamento

No Capítulo 5, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto foram interpretados assumindo a existência de envoltórias lineares. Conforme indicado na Figura 7, envoltórias curvas, na forma potencial, se ajustam melhor aos

pontos experimentais obtidos do que as envoltórias lineares propostas no Capítulo 5.

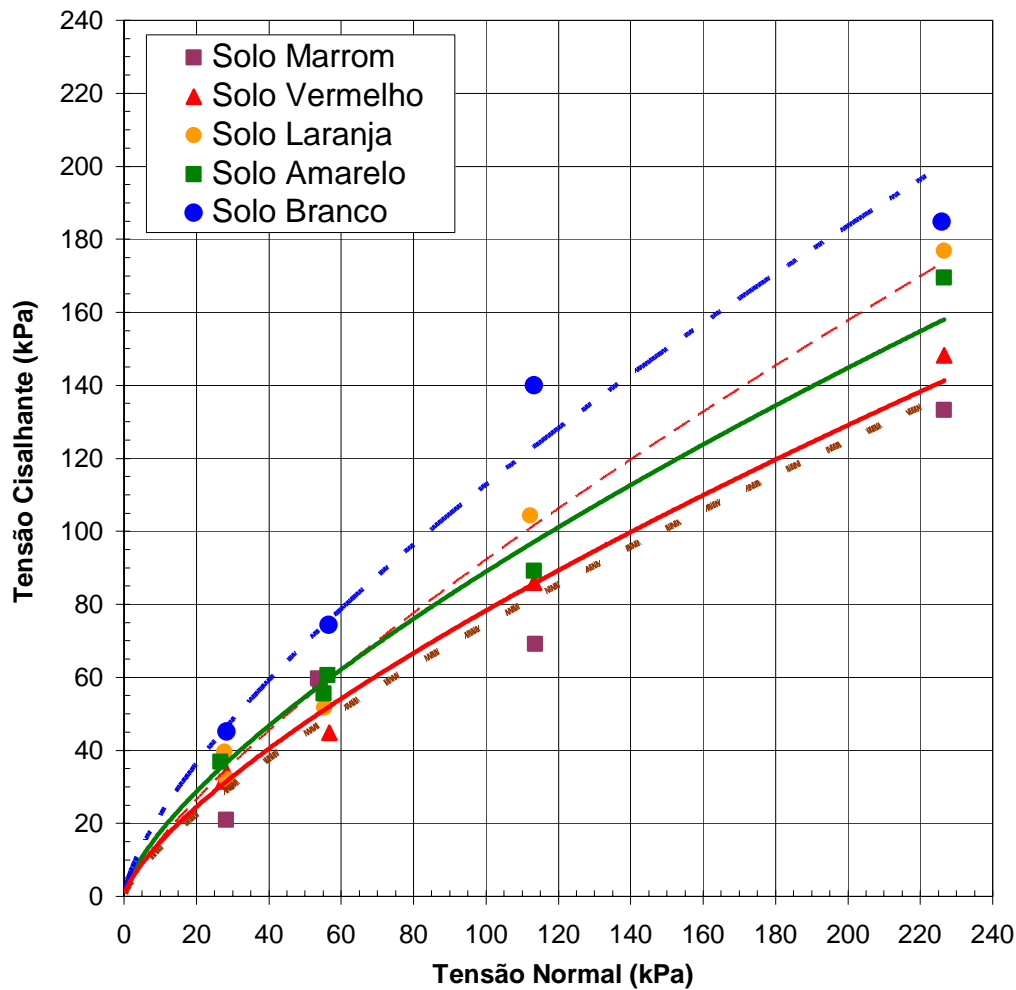


Figura 6.7 – Envoltórias de resistência na forma potencial

As equações propostas para estas envoltórias são da forma:

$$\tau = a \times \sigma^b$$

As equações para os cinco solos estudados, juntamente com os coeficientes de correlação destas envoltórias estão apresentados na Tabela 6.5.

Buscando-se uma correlação entre os parâmetros obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto e o grau de intemperismo dos solos, a seguir estes parâmetros são correlacionados com o índice de intemperismo químico ba_1 , o índice de perda ao fogo, a fração fina e o índice de vazios médio dos solos do perfil.

Tabela 6.5 – Equações potenciais propostas para os ensaios de cisalhamento direto

Solo	Equação	Coeficiente de correlação (R^2)
Marrom	$\tau = 2,4267 \times \sigma^{0,7437}$	0,8825
Vermelho	$\tau = 2,8266 \times \sigma^{0,7212}$	0,9829
Laranja	$\tau = 2,6033 \times \sigma^{0,7746}$	0,9784
Amarelo	$\tau = 3,4983 \times \sigma^{0,7027}$	0,9861
Branco	$\tau = 4,4269 \times \sigma^{0,7031}$	0,9803

A Tabela 6.6 apresenta um resumo dos parâmetros obtidos tanto da envoltória linear (Mohr-Coulomb) quanto da envoltória na forma de potência.

Tabela 6.6 – Resumo dos parâmetros dos ensaios de cisalhamento direto

	Coesão (c')	Ângulo de atrito (ϕ')	Parâmetro a	Parâmetro b
Marrom	20,3	26,5	2,4267	0,7437
Vermelho	15,6	30,5	2,8266	0,7212
Laranja	16,0	35,8	2,6033	0,7746
Amarelo	19,9	33,2	3,4983	0,7027
Branco	37,0	34,9	4,4269	0,7031

A Figura 6.8 mostra que os parâmetros obtidos a partir das envoltórias lineares (c' e ϕ') não apresentam boa correlação com os índices propostos. Foram tentadas correlações de outras formas que não lineares. Algumas até se ajustaram bem aos pontos obtidos, no entanto não apresentavam nenhum sentido físico.

Já na Figura 6.9 observa-se que para os parâmetros a e b, das envoltórias não lineares, as correlações lineares são melhores. Isto vem demonstrar que, para o solo estudado, a envoltória de cisalhamento é não linear. A Tabela 6.7 compara os coeficientes de correlação lineares obtidos.

Tabela 6.7 – Comparação entre os coeficientes de correlação (R^2)

Correlações	Coeficientes de correlação (R^2)	
	c' / ϕ'	a / b
Parâmetros de cisalhamento x ba_1	0,6367 / 0,2723	0,902 / 0,5281
Parâmetros de cisalhamento x P.F.	0,5502 / 0,3367	0,8881 / 0,5232
Parâmetros de cisalhamento x F.f.	0,1715 / 0,9245	0,5008 / 0,0745
Parâmetros de cisalhamento x e_m	0,8116 / 0,0045	0,601 / 0,384

ba_1 = parâmetro de intemperismo químico

P.F. = índice de perda ao fogo

F.f. = Fração fina do solo (argila + silte)

e_m = índice de vazios médio

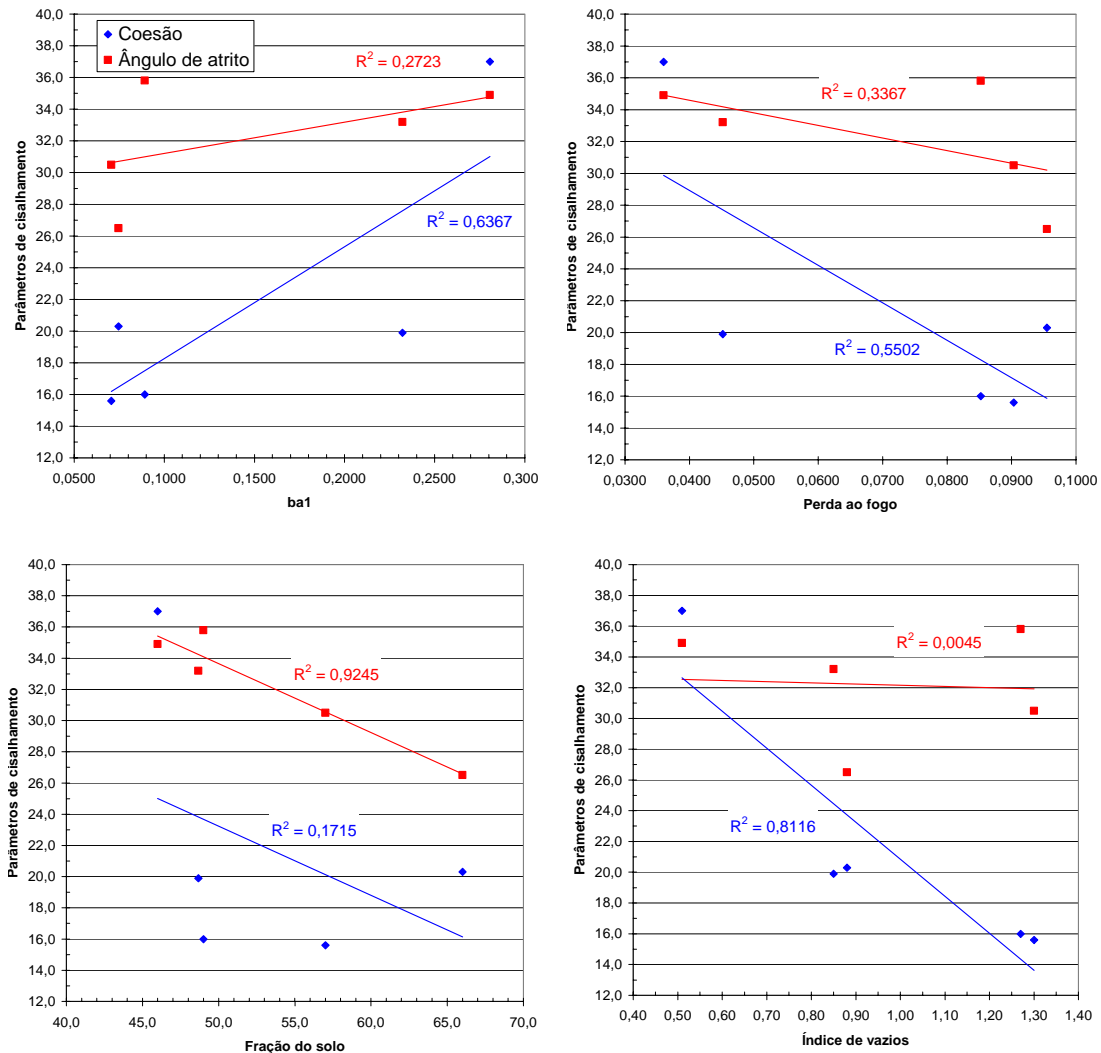


Figura 6.8 – Correlações lineares entre os parâmetros c' e ϕ' e alguns índices propostos de quantificação do intemperismo

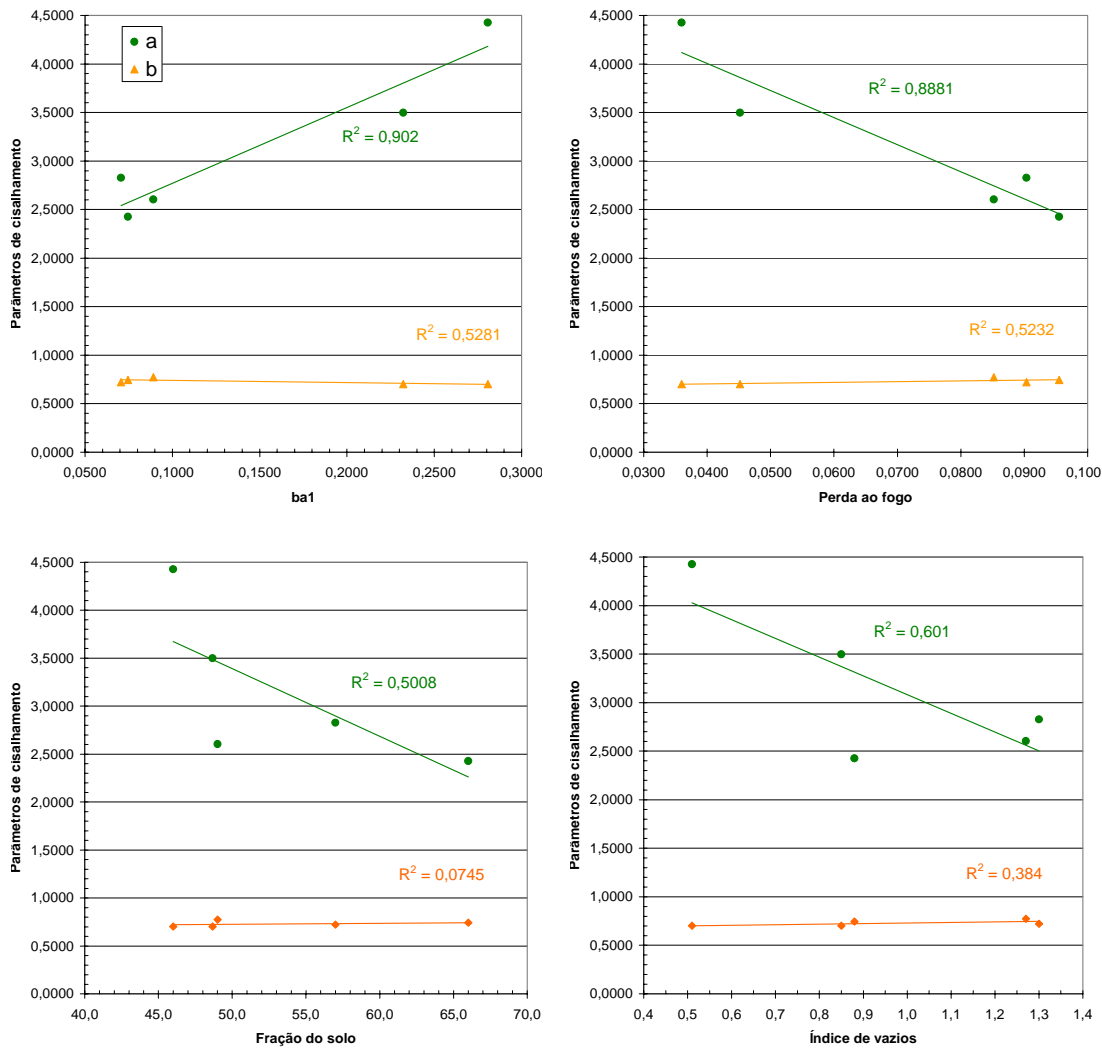


Figura 6.9 - Correlações lineares entre os parâmetros a e b e alguns índices propostos de quantificação do intemperismo

Em relação à resistência, o solo Branco foi o que apresentou maior quantidade de feldspato menos intemperizado na análise micromorfológica, podendo justificar o fato de apresentar uma maior resistência ao cisalhamento. Também a difratometria por raios-X sugere que o solo Branco é o que apresenta a maior quantidade de feldspato pouco alterado.

Por outro lado, o solo Marrom, que se mostrou o mais poroso na micromorfologia, foi o que apresentou uma menor resistência ao cisalhamento, seguido do Vermelho, Amarelo e Laranja, em concordância inversa com o aumento da porosidade.

6.4. Relação entre propriedades físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas e as análises microbiológicas

Objetivando dar o primeiro passo em busca de correlações entre parâmetros microbiológicos do solo com seu grau de intemperismo procurou-se nesta dissertação correlacionar a quantidade de microorganismos e a atividade degradadora total dos solos do perfil com a quantidade de matéria orgânica, o índice de intemperismo químico ba_1 , a superfície específica dos solos, a capacidade de troca catiônica e o pH. Com exceção da matéria orgânica, nenhuma correlação foi encontrada entre estes parâmetros e os parâmetros microbiológicos. Isto evidencia uma real necessidade de se realizarem mais análises desta natureza nos solos deste perfil.

Em relação à quantidade de matéria orgânica, o solo Marrom é o único a apresentar uma quantidade representativa (5,6%). Muito provavelmente, esta quantidade um pouco mais elevada, estimula uma sobrevivência diferenciada de microorganismos heterotróficos.

Nas camadas mais profundas, onde o teor de matéria orgânica é muito baixo (entre 0,7 e 0,9%), os dois parâmetros microbiológicos avaliados também se mostraram baixos. O número de microorganismos nestes solos pode advir da manutenção da população com baixo metabolismo ou da presença de microorganismos quimiossintéticos que usam elementos minerais reduzidos como fonte de poder redutor (energia) provocando sua oxidação e conseqüentemente intemperização do solo.

A Figura a seguir mostra que existe uma relação entre a atividade microbiana degradadora total (Figura 6.10a) e o teor de matéria orgânica (Figura 6.10b). Isto pode ser explicado pelo fato de que o FDA (atividade microbiana degradadora total) está relacionado com a atividade enzimática de esterases, que, por sua vez, são enzimas ligadas à degradação de matéria orgânica. Não foi possível, entretanto fazer uma correlação direta dos parâmetros microbiológicos com o grau de intemperismo, uma vez que o teor de matéria orgânica não apresentou boa correlação com nenhum dos parâmetros propostos. Isto não exclui a possibilidade de existência destas correlações uma vez que, como já mencionado neste trabalho, devido a grande quantidade de ensaios implementados na presente dissertação, não se procurou comparar de forma sistemática todos os dados obtidos, optando-se por efetuar comparações apenas entre aqueles que, se esperava, propiciassem melhores correlações.

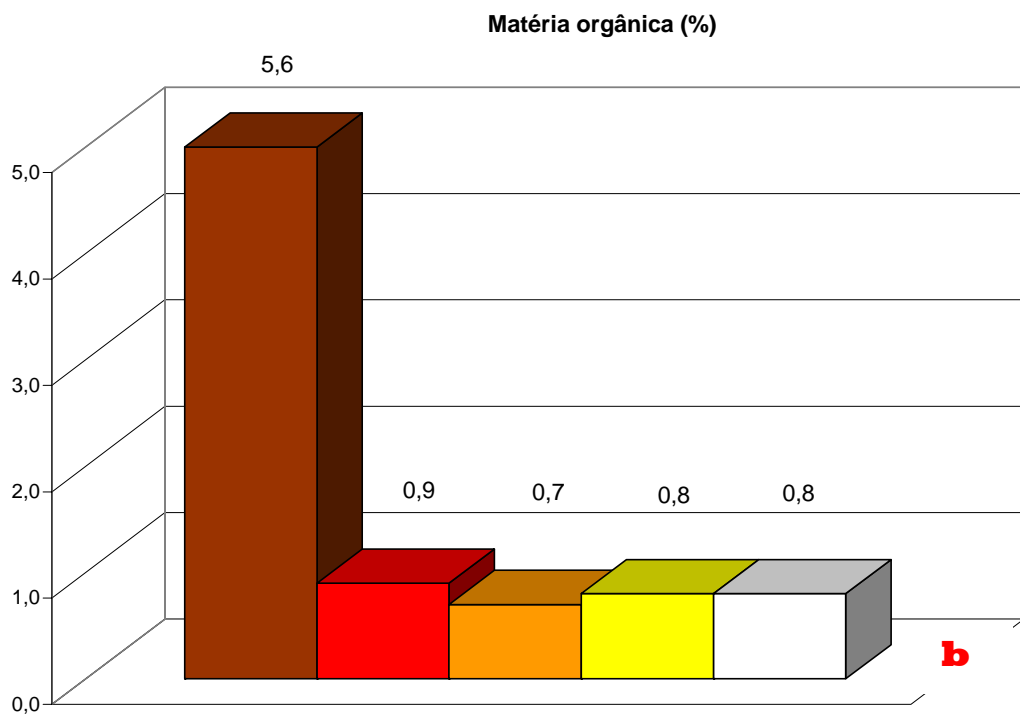
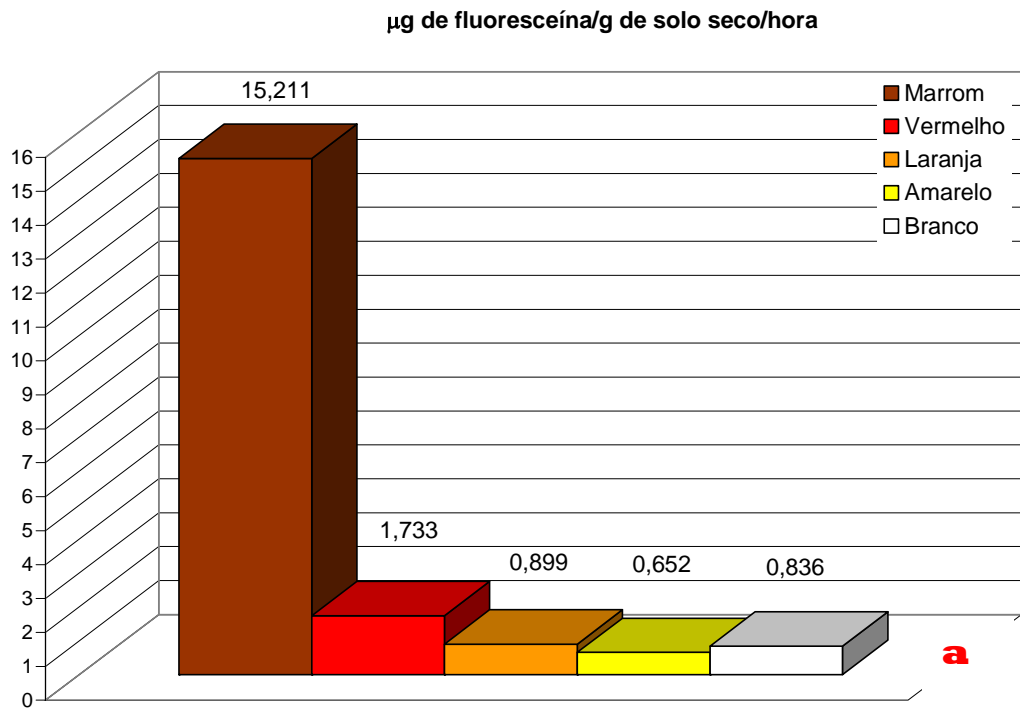


Figura 6.10 – (a) Atividade microbiana degradadora total (FDA); (b) Teor de matéria orgânica – valores médios

7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

7.1. Conclusões

É possível concluir de uma maneira geral que o perfil estudado apresenta propriedades físicas, químicas, mineralógicas, microestruturais e microbiológicas diretamente ligadas ao nível de intemperização.

Na análise dos índices físicos, a partir da correlação entre o peso específico aparente seco (γ_d) e o índice de vazios para as diferentes camadas de solo, foi mostrado que o índice de vazios diminui com o aumento da profundidade para os solos Branco, Amarelo, Laranja e Vermelho. Esta tendência só não foi verificada para o solo Marrom, o mais intemperizado, que apresentou uma faixa de índice de vazios situada abaixo da dos solos Laranja e Vermelho. Sugere-se que esta diminuição do índice de vazios no solo Marrom seja decorrente da migração de partículas sólidas que foram lixiviadas do solo maduro. Considerando uma relação linear do grau de saturação (S) com a umidade (w_{nat}) onde a inclinação da reta é dada pelo inverso do índice de vazios médio, propõe-se nesta dissertação que, num futuro trabalho, os solos de um mesmo perfil sejam classificados não somente segundo seus aspectos morfológicos, mas utilizando também relações tais como esta relação linear.

A técnica de porosimetria de mercúrio mostrou-se bastante adequada para a avaliação do tamanho, volume e distribuição dos poros apresentando resultados coerentes tanto com a avaliação dos índices físicos quanto com as observações provenientes das microscopias ópticas. Os gráficos de porosimetria de mercúrio concordam com a tendência observada nos índices físicos, de que o solo mais intemperizado, ou seja, a camada de solo Marrom apresenta uma porosidade muito próxima a da camada de solo menos intemperizada (solo Branco).

A partir da análise química total foi possível concluir que os índices que melhor refletem o grau de intemperismo deste solo são o índice de intemperismo químico ba_1 e o índice de perda ao fogo P.F.

Os dados obtidos por difratometria de raios-X se mostraram concordantes com a evolução do perfil. Salienta-se o alto grau de cristalinidade da illita nos solos mais superficiais, em decorrência da agudez de seu pico. Salienta-se também o desaparecimento da biotita e do plagioclásio concordante com a evolução do intemperismo. Como a fração argila da amostra de solo que apresentou esmectita (solo Branco) é pequena, sugere-se que a quantidade presente deste mineral seja mínima, não chegando a influenciar no comportamento do solo.

A partir das análises químicas parciais, com a observação das relações moleculares K_i e K_r e sabendo-se que alguns solos lateríticos costumam apresentar valores de K_i da ordem de 0,4, pôde-se concluir que o solo mais intemperizado estudado nesta dissertação é ainda um solo em processo de alteração. Isto foi confirmado nas análises micromorfológicas.

A técnica de microscopia óptica, além da utilização para fins de identificação da composição mineralógica, mostrou-se bastante útil na avaliação do tipo e distribuição dos vazios dentro da massa de solo, bem como na identificação de vazios intra-agregados que são difíceis de identificar com o método de porosimetria por intrusão de mercúrio. Para uma análise efetiva dos vazios, no que diz respeito à classificação, medição de volume e distribuição do tamanho de mesoporos e macroporos, é recomendada a utilização combinada dos métodos de porosimetria de mercúrio e microscopia óptica.

Nas análises petrográficas observou-se que a amostra R 01 era a mais preservada enquanto a amostra R 03 era a mais alterada, discordando do observado nas análises macroscópicas, que indicaram um aumento do grau de intemperismo com a diminuição da profundidade. Dessa forma é possível concluir que a análise macroscópica apresenta limitações sendo necessária então, para melhor avaliar o grau de intemperismo das rochas, uma análise conjunta de descrições macroscópicas e análises petrográficas. A petrografia também indicou que a esmectita encontrada no solo branco não é um mineral neoformado mas sim um mineral de origem hidrotermal que já se encontrava na rocha matriz.

Com exceção da matéria orgânica, nenhuma correlação foi encontrada nesta dissertação entre diversos parâmetros e aqueles obtidos das análises microbiológicas. Isto evidencia uma real necessidade de se realizarem mais análises desta natureza nos solos deste perfil bem como de se tentar uma comparação mais sistemática entre os mais diversos parâmetros. Não foi possível, entretanto, fazer uma correlação direta dos parâmetros microbiológicos

com o grau de intemperismo, uma vez que o teor de matéria orgânica não apresentou boa correlação com nenhum dos parâmetros propostos. Isto não exclui a possibilidade de existência destas correlações.

Os solos apresentaram comportamento de resistência ao cisalhamento diferenciado em função do grau de intemperismo, advindo das propriedades físicas, químicas, mineralógicas, microestruturais e microbiológicas.

Os parâmetros obtidos a partir das envoltórias lineares (c' e ϕ') não apresentaram boa correlação com os índices propostos enquanto para os parâmetros a e b , das envoltórias não lineares, as correlações se mostraram melhores. Conclui-se desta forma que os solos do perfil estudado tem envoltória de cisalhamento não linear.

A partir do ensaio de desagregabilidade foi possível concluir que o solo Marrom, o que apresenta maior teor de argila, é o mais erodível dentre os solos estudados, seguido do solo Amarelo e do solo Branco. O solo Laranja foi o que se mostrou menos erodível.

Como mencionado no início deste trabalho, não se procurou comparar de forma sistemática todos os dados obtidos na presente dissertação em função da diversidade e quantidade de ensaios implementados. Foram efetuadas comparações apenas entre os parâmetros que, se esperava, fornecessem melhores correlações. Assim sendo, conclusões adicionais às aqui apresentadas podem advir de posteriores análises dos dados obtidos.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

Poucos estudos já foram realizados buscando correlacionar parâmetros dos solos residuais com seu grau de intemperismo. O trabalho conduzido, de uma forma geral, evidencia a necessidade da continuidade das pesquisas, abrindo-se uma ampla gama de possibilidades para novos estudos.

Dando continuidade a este trabalho, seria interessante investigar o motivo pelo qual o clima da área estudada, descrito como caracteristicamente úmido, sem estação seca e com temperatura média do mês quente inferior a 22°C gerou um perfil de solo tão espesso, característica de climas tropicais muito quentes.

Estudos dedicados à investigação de outras possíveis correlações entre os índices físicos e químicos dos solos desse perfil podem ser conduzidos

buscando-se algum parâmetro que apresente correlação direta com o grau de intemperismo dos solos.

Como se observou, os ensaios de porosimetria demonstraram serem bons avaliadores da microestrutura do solo, por fornecem a curva de distribuição de diâmetro dos poros, fator diretamente relacionado ao grau de intemperismo dos solos residuais jovens. As análises micromorfológicas também são capazes de identificar de maneira satisfatória a microestrutura dos solos residuais. Portanto, recomenda-se que estes ensaios sejam, sempre que possível, realizados em conjunto com as análises físicas.

Análises mineralógicas quantitativas podem ser realizadas visando a obtenção de índices de intemperismo mineralógicos. Para isto, as quantidades de cada mineral precisam ser determinadas separadamente. Tais índices podem vir a apresentar uma boa correlação com a resistência dos solos.

Para tentar obter um indicador biológico relacionado ao grau de intemperismo dos solos, propõe-se que, num futuro trabalho, sejam realizados mais estudos como os apresentados nesta dissertação. Além disso, sugerem-se análises testando outras atividades enzimáticas de microrganismos do solo, tanto gerais, como a desidrogenase, como também específicas, ligadas aos ciclos biogeoquímicos de elementos presentes nestes solos, como por exemplo, o ferro. Recomenda-se também que a variação da população microbiana ao longo de um perfil de solo seja avaliada por técnicas de biologia molecular. Isto poderá indicar uma distribuição diferencial das espécies, característica que pode ou não vir a se correlacionar com o grau de intemperismo dos solos.

Outros ensaios de resistência podem ser realizados nos solos estudados visando obter melhores correlações entre as propriedades mecânicas dos solos residuais e suas características mineralógicas e microestruturais.

Ensaio de erodibilidade tais como *pinhole* e Inderbitzen podem ser realizados, no intuito de se obter um parâmetro quantitativo da erosão destes solos que possa ser correlacionado com algum índice de intemperismo.

Sugere-se, finalmente, que os dados obtidos da análise completa de um perfil de solo residual sejam correlacionados de forma sistemática, tendo em vista que, por se tratar de algo recente a busca por uma característica que possa indicar a evolução do grau de intemperismo do solo, muito pouco ainda se sabe sobre quais parâmetros podem apresentar boa correlação quando comparados.

Referências bibliográficas

ADAM, G. e DUNCAN, H. **Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils.** Soil Biology and Biochemistry 33(7-8):943-951. 2001.

ANTUNES, F.S. **Comunicação Pessoal.** 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Solo - Análise granulométrica.** NBR 7181/84, Rio de Janeiro, 1984a. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Solo - determinação da massa específica aparente.** NBR 6508/84, Rio de Janeiro, 1984b. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Solo - determinação do limite de liquidez.** NBR 6459/84, Rio de Janeiro, 1984c. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Solo - determinação do limite de plasticidade.** NBR 7180/84, Rio de Janeiro, 1984d. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** NBR 6457/87, Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

BARROSO, E.V. **Estudo das características geológicas e do comportamento geotécnico de um perfil de intemperismo em leptinito.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, RJ, 1993.

BATOLLA JR., F.; CARVALHO, M.A. DA S.; COLANERI, S. e AGUIAR NETO, A. **Ministério das Minas e Energia. Projeto leste do Paraná Folha Curitiba – SG. 22-X-D-I Relatório final – Geologia – Anexos I e II.** São Paulo: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1977. p. 53-164.

BERTOLINO, A.V.F.A. **Influência do manejo na hidrologia de solos agrícolas em ambiente serrano: Paty do Alferes –RJ.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, RJ, 2004. 178 p.

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils.** Huntington, New York: Robert E. Krieger Publications Co., 1976. 482p.

BRITO, A.T.A. **Estudo Químico e Mineralógico de um Perfil de Alteração de Gnaiss Migmatítico do Campo Experimental da PUC-RJ, Gávea, Rio de Janeiro.** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ, 1981. 286p.

BROCK, T.D.; MADIGAN, M.T. e MARTINKO, J.M. **Biology of Microorganisms.** 7 ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall International, 1994. 909p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados.** 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 25 a 27/08/2004, São Carlos/SP, 2004. p.597-616.

CASTRO, S.S. **Micromorfologia de solos: Bases para descrição de lâminas delgadas.** UFG-IESA, UNICAMP-IG-DGEO, Goiânia/Campinas, 2002. 143 p.

DEERE, D.U. e PATTON, F.D. **Slope Stability in Residual Soils.** Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society of Civil Engineers, 1971. p. 87-170.

DELAGE, P.; AUDIGUIER, M.; CUI, Y.J. e HOWAT, M.D. **Microstructure of a compacted silt.** Canadian Geotechnical Journal, 33, 1996. pp. 150-158.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Solos – determinação da densidade real, Norma rodoviária, Método de ensaio.** DNERME 093, 1994

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos. – 2. ed., 1997.

FALCÃO, M.F.G. **Fatores Geológicos e Características de Intemperismo Condicionantes das Propriedades Mecânicas de Solos Residuais.** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ, 1984. 131p.

FIERER, N.; SCHIMEL, J.P. e HOLDEN P.A. **Variations in microbial community composition through two soil depth profiles.** Soil Biol. Biochem. 35, 2002. p. 167-176.

GIBSON, R.E. e HENKEL, D.J. **Influence of Duration of Tests at Constant Rate of Strain on Measured Drain Strength.** Geotechnique, 4 (1), 6-15, 1954.

IRFAN, T.Y. **Fabric variability and index testing of a granitic saprolite.** In: Proceedings of the 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore, 12-14 December 1988 V1, p. 25-35.

KIEFT, T.L. e PHELPS, T.J. **Life in the slow lane: Activities of microorganisms in the subsurface.** Ch. 12. pp. 137-163. In: The Microbiology of the Terrestrial Subsurface, 1997.

LITTLE, A.L. **The engineering classification of residual tropical soils.** Proc. 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico. 1, 1969. p. 1-10.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná.** Liv. José Olympio Editora, 2a. Ed., Curitiba, 1968. 442p.

MAACK, R. **Breves notícias sobre a Geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina.** I.B.P.T. Curitiba, Arq. Biol. e Tecn., vol. II, Art. 7, 1947.

MACHADO, S.L. **Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a Solos não saturados.** Tese de doutorado em geotecnia, USP-SC, São Carlos, SP, 1998.

MAGDALENO, A.C. **Monitoramento de degradação de óleo cru em solo residual.** Trabalho de conclusão de curso. (graduação em ciências biológicas), Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, 2005.

MAIER, R.M.; PEPPER, I.L. e GERBA, C.P. **Environmental Microbiology.** New York: Academic Press, 2000.

MARTINEZ, G.S.S. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Residuais Tropicais Compactados..** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MENEZES FILHO, A.P. **Aspectos Geológico-Geotécnicos de um Perfil de Alteração de Gnaisse Facoidal.** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ, 1993.

MUNECHICA, V.L. **Características Geotécnicas de um Perfil de Solo Residual de Leptinito.** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ, 1992.

MONIZ, A.C. **Elementos de Pedologia.** EDUSP, São Paulo, 1972. 459p.

MOREIRA, F.M.S. e SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do solo.** Lavras: Editora UFLA, 2002. 626 p.

PASTORE, E.L. **Weathering profiles.** 10th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE, Guadalajara, Mexico, 1, 1995. p. 353-364.

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

RAHARDJO, H.; AUNG, K.K.; LEONG, E.C. e REZAUR, R.B. **Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering.** Engineering Geology, Vol. 73, 2004. p. 157-169.

RAMIDAM, M.A.S. **Estudo de um Processo de Voçorocamento Próximo a UHE de Itumbiara-GO**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

ROCHA FILHO, P.; ANTUNES, F.S. e FALCÃO, M.F.G. **Qualitative Influence of the Weathering Degree upon the Mechanical Properties of an Young Gneiss Residual Soils**. In: Proceedings of the 1st. International Conference on Geomechanical in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1985. p. 281-294.

SERTÃ, H.B.C. **Aspectos Geológicos e Geotécnicos do Solo Residual do Campo Experimental II da PUC/RJ**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ, 1986. 185p.

SUEOKA, T. **Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering index**. Proc 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore, 12–14 December 1988 V1, p. 55–61. Publ Rotterdam: A A Balkema, 1988

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.M. e TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000. 558p.

VAUGHAN, P.R.; MACARRINI, M. e MOKHTAR, S.M. **Indexing the engeneering properties of residual soil**. Quaterly Journal of Engineering Geology, vol. 21, 1998. p. 69-84.

VAZ, L.F. **Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais**. In: Rev. Solos e Rochas, v.19, n. 2, ABMS/ABGE, São Paulo, SP, 1996. p. 117-136.

VIEIRA, L.S. **Manual de Ciência do Solo**. 1ed, São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1975

VILES, H.A. **Ecological perspectives on rock surface weathering: towards a conceptual model**. Geomorphology, 13, 1995. p. 21-35.

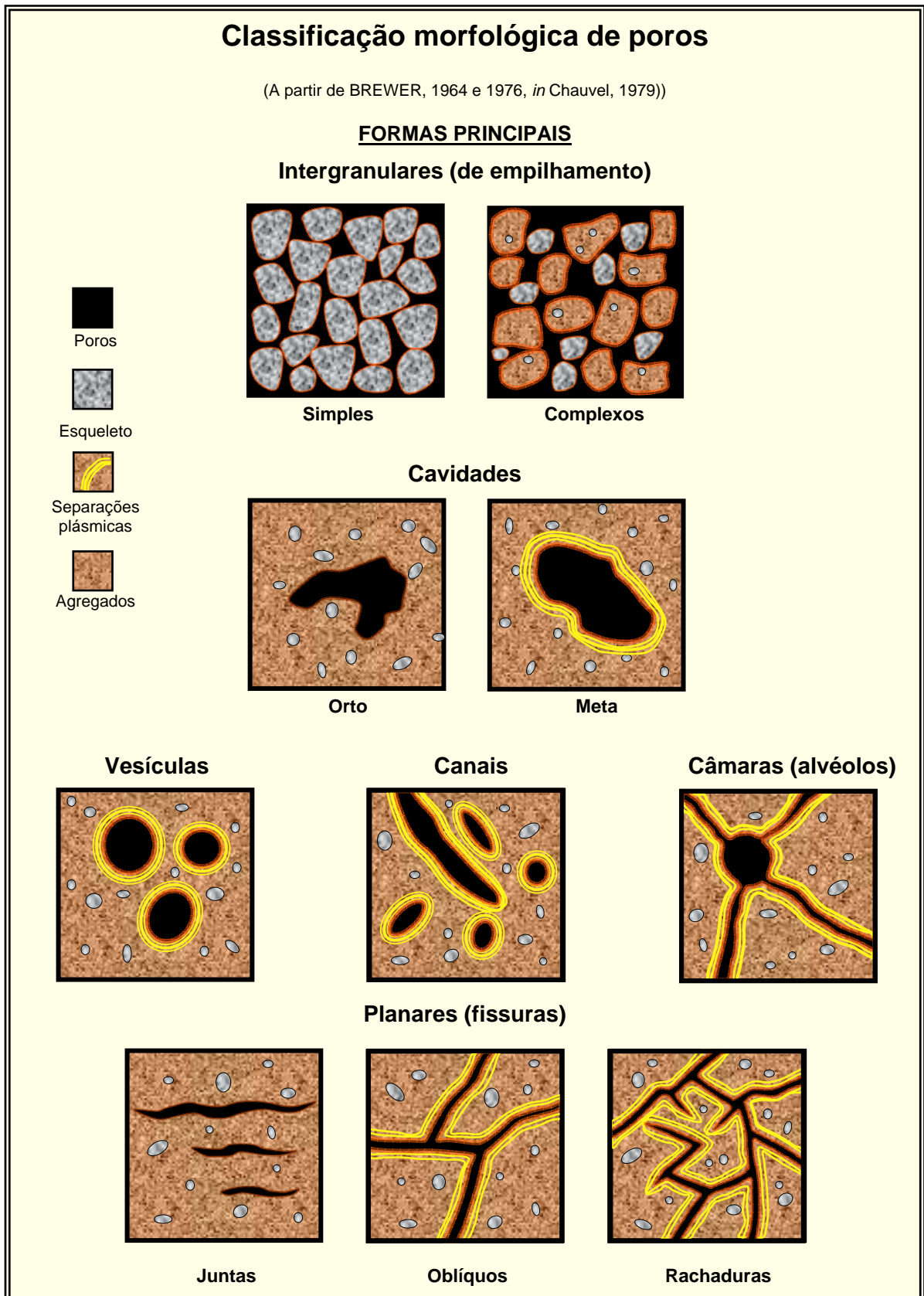
APÊNDICE I

Classificação dos poros

I.1. Dimensão dos Poros (Castro, 2002)

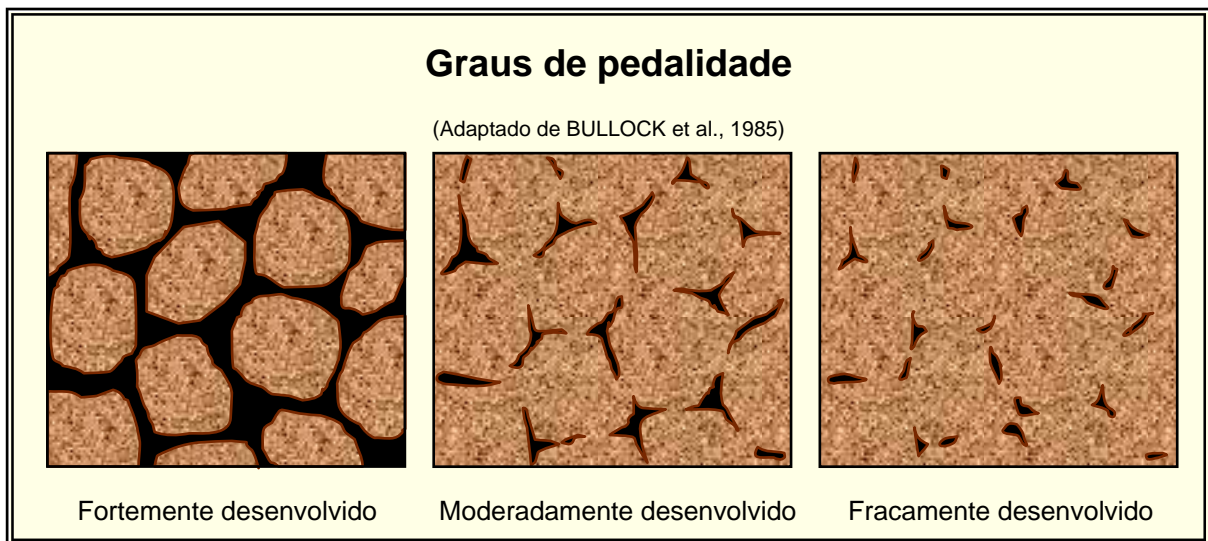
Classificação dimensional de poros					
(Adaptado de BREWER, 1976)					
Classificação	Sub-classificação	Dimensão	Observação		
Macroporos	Grosseiros	> 5000 μm	Olho nu	Microscopia óptica	Ultramicroscopia
	Médios	2000 – 5000 μm			
	Finos	1000 – 2000 μm			
	Muito finos	75 – 1000 μm			
Mesoporos		30 – 75 μm			
Microporos		5 – 30 μm			
Ultramicroporos		0,1 – 5 μm			
Criptoporos		< 0,1 μm			

I.2.
Forma dos poros (Castro, 2002)



APÊNDICE II Pedalidade

II.1. Grau de pedalidade (Castro, 2002)








Pedalidade

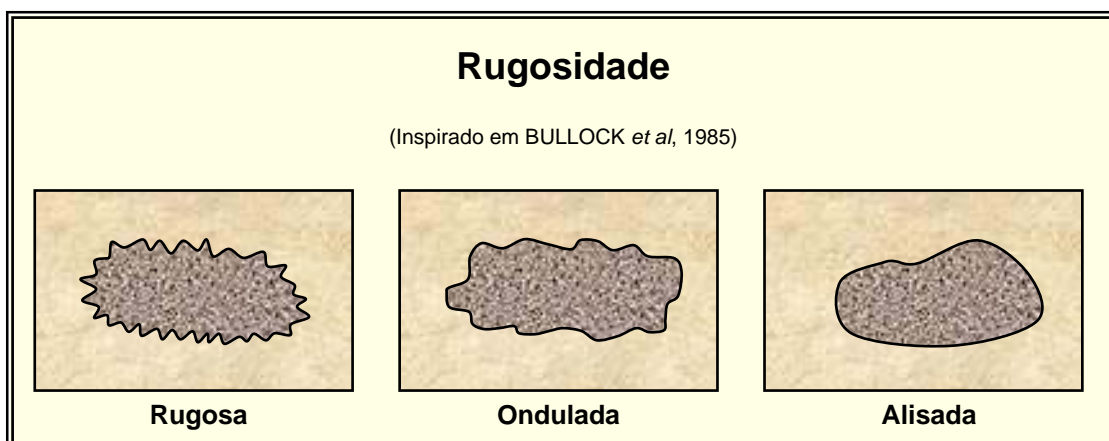
**II.2.
Forma dos pedes (Castro, 2002)**

Graus de arredondamento dos pedes

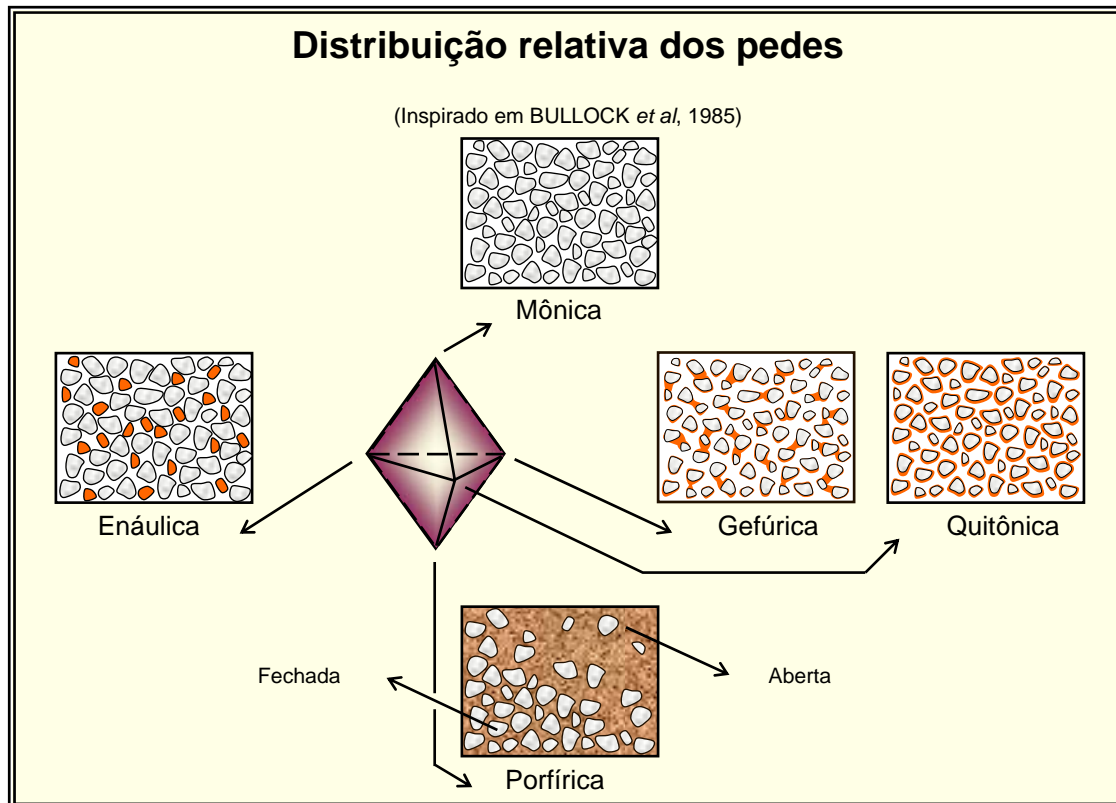
(Simplificado de BULLOCK *et al*, 1985)

Forma	Classificação	Características
	Angular	Facetas com vértices agudos
	Subangular	Facetas com vértices arredondados
	Subarredondado	Curvas intercaladas a facetas
	Arredondado	Curvaturas não concordantes
	Bem arredondado	Curvaturas concordantes

**II.3.
Textura dos pedes (Castro, 2002)**



II.4.
Distribuição relativa dos pedes (Castro, 2002)



ANEXO I

Boletim de sondagem

PERFIL DE SONDAGEM MISTA

07/01/2005 14:16

NÍVEL DE FONDAÇÃO (m)	DEBIL	GOLPES / 30 cm		RECUPERAÇÃO (%)					CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS	Alteração	Coerência	Fraturamento N. de fraturas por metro	R.Q.D.(%)	CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA
		INICIAL	FINAL	INDICE DE RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO (N)										
				0	10	20	30	40						
1	25/3								0,00 - 0,35 m: Silte argiloso, amarelado.					SOLO
2									0,35 - 1,07 m: Silte arenoso (areia fina), amarelado.	A3 C4				
3										A3 C5				
4										A3 C4				
5										A3 C4				
6										A3 C4				
7									1,07 - 13,80 m: Rocha de coloração cinza clara, textura fanerítica equigranular média, estrutura maciça. Composta basicamente por feldspato plagioclásio e quartzo. Apresenta alguns níveis com minerais máficos (piróxênio e/ou anfíbolo) centimétricos e decimétricos aos 12 metros. Medianamente alterada com fraturas ocasionalmente preenchidas por óxido de ferro.	A3 C5			GRANITO	
8										A3 C5				
9										A3 C3 F3 07 23				
10										A3 C3 F3 07 23				
11										A3 C3				
12										A3 C3				
13										A3 C3				
14										A2 C2				
15														
16														
17														
18														
19														
20														

Diâmetro da perfuração: 0,00-13,80 m BW
 Revestimento: 2,30 m
 Limite da sondagem: 13,80 m

CLIENTE: FACULDADES CATÓLICAS
 LOCAL: RUA YOLANDA ROMEU LUGARINI, 311
 ASSAÍMA - CAMPO MAGRO - PR
 RESPONSÁVEL TÉCNICO: CREA:
 JOMILDO A. BAUMEL FILHO PR-23358/D
 DATA INÍCIO: 27/01/05
 QSPR: 2184-05

LEGENDA:
 Alteração:
 A1-Rocha Sã
 A2-Pouco Alterada
 A3-Med. Alterada
 A4-Muito Alterada
 Coerência:
 C1-Muito/extremamente resistente
 C2-Resistente
 C3-Medianamente resistente
 C4-Baixa Resistência
 C5-Extremamente/muito fraca

SONDACEL
 Rua Antonio Abreu Pinto, 115 Jd
 Anzóla - Araucária - Paraná
 Fone: (41) 273-2306

SONDAGEM: SM-01
 ESCALA: 1:100
 COORDENADAS:
 COTA: (+) 0,96 m