UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

NELCÍ HELENA MAIA GUTIERREZ

Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná

São Carlos 2005

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

NELCÍ HELENA MAIA GUTIERREZ

Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos 2005

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Gutierrez, Nelcí Helena Maia
G984i Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do Norte do Paraná / Nelcí Helena Maia Gutierrez. São Carlos, 2005.
Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005. Área: Geotecnia. Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar.
1. Solos colapsíveis. 2. Solos tropicais.
3. Microestrutura. 4. Micromorfologia. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira NELCI HELENA MAIA GUTIERREZ

Tese defendida e julgada em 19-08-2005 perante a Comissão Julgadora:

ach

APROVADA

Prof. Titular ORENCIO MONJE VILAR (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Titular **JOSÉ EDUARDO RODŘIGUES** (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. HERALDO UIZ GIACHETI

(UNESP/Baura)

Profa. Dra. MARIA TEREZA DE NÓBREGA (Universidade Estadual de Maringá/UEM)

Prof Dr JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO (Universidade de Brasília/UnB)

APROVADA C

Prof. Associado LAZARO ALENTIN ZUQUETTE Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Profa. Titular MARIA DO CARMO CALIJURI

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

APROVADA

OVADA

APROVA DA

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Avelino Maia (*in memoriam*), meu grande incentivador na busca de desafios e do saber.

AGRADECIMENTOS

Durante vários anos dedicados à elaboração desta tese, várias pessoas e entidades colaboraram, direta ou indiretamente, no desenvolvimento deste trabalho, às quais registro os meus agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Orencio Monje Vilar pela confiança, orientação, incentivo e amizade que sempre marcaram o nosso relacionamento.

À Profa. Dra. Maria Teresa de Nóbrega pela orientação, discussões técnicas e colaboração nas análises micromorfológicas e, acima de tudo pela amizade e constante estímulo na realização deste trabalho.

À Profa. Dra. Maria Luiza Melchert de Carvalho e Silva pelo apoio recebido nos momentos mais difíceis, na interpretação das análises mineralógicas e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Andrea Paesano pela enorme contribuição na realização e interpretação dos ensaios de espectroscopia Mössbauer.

Ao Prof. Dr. Nelson Vicente Lovatto Gasparetto pelo auxílio na obtenção das fotomicrografias.

À Empresa Solo Sondagem, por ter possibilitado a realização dos ensaios de penetração de cone elétrico (CPT) em uma das áreas estudadas.

Ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti pelo acompanhamento durante a realização dos ensaios CPT e auxílio na sua interpretação.

À Universidade Estadual de Maringá (UEM), por ter permitido o meu aprimoramento científico e disponibilizado os laboratórios na realização de grande parte dos ensaios e análises desta pesquisa. Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil da UEM: David Leon de Agüero, Cipriano José de Azevedo Freire, Aparecido da Silva e Celso Rodrigues pela colaboração na execução dos trabalhos de campo e laboratório.

Aos colegas professores do Departamento de Engenharia Civil da UEM: Antonio Belincanta, Jeselay Hemetério dos Reis, Roberto Lopes Ferraz, José Wilson Assunção, Daniel das Neves Martins, José Aparecido Canova, Júlio César Pigozzo e Nara Villanova Menon pelo convívio, discussões técnicas e amizade.

À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) pela acolhida e ensinamentos.

À todos os professores e colegas da pós-graduação do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, em particular aos professores Dr. Nelson Aoki, Dr. Osni José Pejon e Dr. Lázaro Valentim Zuquette e aos amigos Gilmar, Costa Branco, Russo, Adriana, Edmundo, Cristina, Ana Carina, Giuliano, Cláudio, Túlia, Irahy e Igor, pelos bons momentos de convívio e troca de experiências.

Aos funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, em especial à Maristela, Neiva, Álvaro, Erivelto, José Luís, Oscar e Benedito pela amizade, receptividade e atenção manifestadas em todos os momentos.

Ao meu marido Gutierrez, aos meus filhos Isabella e Alexandre e à minha mãe Deolinda, pela imensa paciência, apoio e compreensão em todos os momentos.

E especialmente a Deus, que sempre iluminou o meu caminho.

RESUMO

GUTIERREZ, N. H. M. Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná. 2005. 311p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento colapsível, sob o aspecto estrutural, de três perfis de solos tropicais típicos, que ocorrem na região norte do Paraná e que podem ser considerados representativos do território brasileiro. Dois desses perfis são classificados pela pedologia como Latossolos Vermelhos, um de textura argilosa e outro de textura média e o terceiro perfil, de textura argilosa, como Nitossolo Vermelho. Tem por objetivo, também, em função da abordagem pedológica adotada para a caracterização dos solos, poder associar comportamentos característicos observados para as diferentes classes estudadas, visando a extrapolação e aplicação desses conhecimentos a outros solos de ocorrência em zona tropical que se enquadrem nas mesmas classes dos materiais estudados. Ensaios edométricos simples e duplos foram conduzidos para a avaliação da colapsibilidade dos solos. O acompanhamento da evolução da macro e da microestrutura dos solos, antes e após colapso, através de análises micromorfológicas, permitiu estabelecer correlações com a dinâmica do colapso. Os resultados apontam um comportamento colapsível em todos os níveis dos perfis dos Latossolos enquanto que, para o horizonte característico do Nitossolo, as deformações volumétricas por inundação não foram suficientes para classificá-lo como colapsível. Os resultados ressaltam, ainda, a influência da tensão de pré-adensamento virtual e dos fatores pedogenéticos na variabilidade das características físicas dos solos analisados e na magnitude do colapso. Os maiores coeficientes de colapso parecem estar associados principalmente à presença, em maior proporção, de plasma microagregado com porosidade intermicroagregado fortemente comunicante; porosidade total elevada e existência de macroporos.

Palavras-chaves: solos colapsíveis, solos tropicais, microestrutura, micromorfologia.

ABSTRACT

GUTIERREZ, N. H. M. Influences of structural aspects in soil collapse on the North of Paraná. 2005. 311p. Thesis (Doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Collapsible soils behavior, under the structural aspect, of three typical tropical soil profiles that occur in the region of North Paraná, considered representative in the national territory, are analysed at this thesis. Two of these profiles are classified by the pedology as Red Oxisoil, one of clayey texture and the other of medium texture. The third profile, of clayey texture is classified as Red Nitosols. The objective of this study is also to be able to extrapolate the result and behavior observed at this soil profiles for other sites which present similar characteristics on a pedological point of view. Double and simple oedometric tests were conducted for soil collapsibility evaluation. The evolution of the macro and microstructure of the soil were observed, before and after the collapse, through micromorphological analysis, allowing the establishment of correlations with the collapse dynamics. Test results point out to a collapsible behavior in all the levels of Oxisoil profile while for the characteristic horizon on Nitosol the volumetric deformation because of soaking was not sufficient to classify it as collapsible. Test results also highlight the influence of virtual preconsolidation and pedogenetic factors in the variability of the physical characteristics of soil and in collapse magnitude. Highest collapsibility coefficient may to be mainly associated to the presence. in greater proportion, of microaggregate plasma with strongly communicating intermicroagregated void; high total porosity and the presence of macropores.

Keywords: collapsible soils, tropical soils, microstructure, micromorphology.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1	Danos causados pelo recalque – área externa da galeria de comando de filtros na Estação de Tratamento de Água (Maringá, 1998)27
Capítulo 2	
Figura 2.1	Estrutura do solo colapsível carregada: a) antes da inundação; b) depois da inundação. (JENNINGS; KNIGHT, 1957)
Figura 2.2	Pressão de contato produzida pela capilaridade (DUDLEY, 1970)41
Figura 2.3	Arranjo esquemático dos grãos de areia e silte (DUDLEY, 1970)42
Figura 2.4	Arranjo esquemático dos grãos de areia com vínculos de argila por autogênese (DUDLEY, 1970)42
Figura 2.5	Arranjo esquemático dos grãos de areia com vínculos de argila resultante do processo de lixiviação (DUDLEY, 1970)43
Figura 2.6	Arranjo esquemático de agregados de argila interligados por pontes de argila (CLEMENCE; FINBARR, 1981)44
Figura 2.7	Curvas e versus log σ_v obtidas no ensaio edométrico duplo (JENNINGS; KNIGHT, 1957)
Figura 2.8	Curvas e x log σ_v ajustadas (JENNINGS; KNIGHT, 1957)49
Figura 2.9	Curvas e x log σ_V do ensaio edométrico simples (JENNINGS; KNIGHT, 1957)
Figura 2.10	Câmara edométrica desenvolvida por Escário e Saez (1973)52
Figura 2.11	Conjuntos ligados (connectors) – areia de Transvaal (COLLINS; MCGOWN, 1974)
Figura 2.12	Sistema parcialmente discernível de partículas – argila de Tucson – EUA (COLLINS; MCGOWN, 1974)
Figura 2.13	Agregação regular – areia de Transvaal (COLLINS; MCGOWN, 1974)56

Figura 2.14	Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio óptico com luz polarizada (CARVALHO et al, 1981)
Figura 2.15	Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio eletrônico de varredura com pequeno aumento (CARVALHO et al., 1981)59
Figura 2.16	Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio eletrônico de varredura com aumento de 13.000 (CARVALHO et al., 1981)
Figura 2.17	Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio eletrônico de varredura com aumento de 18.000 (CARVALHO et al., 1981)
Figura 2.18	Obtenção do colapso no ensaio edométrico duplo (JENNINGS; KNIGHT, 1957)72
Figura 2.19	Obtenção do colapso no ensaio edométrico simples (KNIGHT, 1963 <i>apud</i> LUTENEGGER; SABER, 1988)
Figura 2.20	Estimativa do grau de colapsibilidade (BASMA; TUNCER, 1992)78
Canítulo 3	
Capitulo 5	
Figura 3.1	Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo – Perfil I.83
Figura 3.1 Figura 3.2	Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo – Perfil I.83 Retirada de amostras (blocos) na área de estudo – Perfil III
Figura 3.1 Figura 3.2 Figura 3.3	Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo – Perfil I.83 Retirada de amostras (blocos) na área de estudo – Perfil III
Figura 3.1 Figura 3.2 Figura 3.3 Figura 3.4	Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo – Perfil I.83 Retirada de amostras (blocos) na área de estudo – Perfil III
Figura 3.1 Figura 3.2 Figura 3.3 Figura 3.4 Capítulo 4	Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo – Perfil I.83 Retirada de amostras (blocos) na área de estudo – Perfil III
Figura 3.1 Figura 3.2 Figura 3.3 Figura 3.4 Capítulo 4 Figura 4.1	Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo – Perfil I.83 Retirada de amostras (blocos) na área de estudo – Perfil III
Figura 3.1 Figura 3.2 Figura 3.3 Figura 3.4 Capítulo 4 Figura 4.1 Figura 4.2	Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo – Perfil I.83 Retirada de amostras (blocos) na área de estudo – Perfil III

Capítulo 5

Figura 5.1	Latossolo Vermelho distroférrico observado em trincheira (Maringá, PR)105
Figura 5.2	Perfil de solo típico – Latossolo Vermelho distroférrico (Maringá, PR) 108
Figura 5.3	Resultados dos ensaios de penetração de cone elétrico (CPT) – Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)109
Figura 5.4	Variabilidade das características físicas do solo – Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)
Figura 5.5	Micromorfologia do solo natural (indeformado) – Perfil I119
Figura 5.6	Difratogramas característicos dos dois conjuntos de solo - Perfil I 122
Figura 5.7	Ajustes das curvas experimentais – materiais constituintes do Perfil I (Espectroscopia Mössbauer – temperatura ambiente)
Figura 5.8	Ajustes das curvas experimentais – materiais constituintes do Perfil I (Espectroscopia Mössbauer – temperatura de 80 K)127
Figura 5.9	Curvas de distribuição de poros - solo natural (Perfil I)128
Figura 5.10	Histogramas de freqüência de poros - solo natural (Perfil I)128
Figura 5.11	Influência da umidade inicial na magnitude do colapso – Ensaios Simples (Perfil I – material profundidade 0,50 m)
Figura 5.12	Efeito da inundação do solo para os diferentes níveis do Perfil I – Ensaios simples
Figura 5.13	Curvas de compressão normalizadas (umidade natural) – Perfil I135
Figura 5.14	Curvas de compressão normalizadas (solo inundado) – Perfil I135
Figura 5.15	Tensões geostáticas e de pré-adensamento e índices de compressão do solo – Perfil I
Figura 5.16	Comparação entre os coeficientes de colapso (ensaios simples e duplos) – Perfil I
Figura 5.17	Variações dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples) – Perfil I

Figura 5.18	Variações dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios duplos) – Perfil I
Figura 5.19	Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade (Perfil I) – ensaios simples
Figura 5.20	Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade (Perfil I) – ensaios duplos
Figura 5.21	Coeficientes de colapso estrutural em função de (σ_i/σ_{pn}) para as amostras do Perfil I
Figura 5.22	Coeficiente de colapsibilidade do solo – Perfil I (REGINATTO; FERRERO, 1973)
Figura 5.23	Solo natural: zona microagregada com porosidade muito aberta – Perfil I (prof. de 7,80m)165
Figura 5.24	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 0,50 m)
Figura 5.25	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 0,50 m)
Figura 5.26	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 1,60 m)
Figura 5.27	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 1,60 m)
Figura 5.28	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 3,20 m)
Figura 5.29	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 3,20 m)
Figura 5.30	Curvas de distribuição de poros – material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 4,70 m)
Figura 5.31	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 4,70m)
Figura 5.32	Nitossolo Vermelho eutroférrico observado em corte (Maringá, PR) 182
Figura 5.33	Perfil de solo típico – Nitossolo Vermelho eutroférrico (Maringá – PR) 184

Figura 5.34	Variabilidade das características físicas do solo – Perfil II (Nitossolo Vermelho eutroférrico)
Figura 5.35	Arranjos poliédricos observados no Perfil II - Nitossolo Vermelho (Maringá, PR)
Figura 5.36	Micromorfologia do solo natural (indeformado) – Perfil II192
Figura 5.37	Difratogramas característicos dos dois conjuntos de solo – Perfil II 194
Figura 5.38	Ajustes das curvas experimentais - materiais constituintes do Perfil II (Espectroscopia Mössbauer – temperatura ambiente e 80K)
Figura 5.39	Curvas de distribuição de poros - solo natural (Perfil II)197
Figura 5.40	Histogramas de freqüência de poros - solo natural (Perfil II)198
Figura 5.41	Efeito da inundação do solo para os diferentes níveis do Perfil II - Ensaios simples
Figura 5.42	Curvas de compressão normalizadas (umidade natural) - Perfil II
Figura 5.43	Curvas de compressão normalizadas (solo inundado) - Perfil II202
Figura 5.44	Tensões geostáticas e de pré-adensamento e índices de compressão do solo – Perfil II
Figura 5.45	Comparação entre os coeficientes de colapso (ensaios simples e duplos) – Perfil II
Figura 5.46	Variações dos coeficientes de colapso estrutural (ensaios simples) – Perfil II
Figura 5.47	Variação dos coeficientes de colapso estrutural (ensaios duplos) – Perfil II
Figura 5.48	Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade – ensaios simples
Figura 5.49	Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade – ensaios duplos
Figura 5.50	Coeficiente de colapso estrutural em função de (σ_i/σ_{pn}) para as amostras do Perfil II

Figura 5.51	Coeficiente de colapsibilidade do solo – Perfil II (REGINATTO; FERRERO, 1973)
Figura 5.52	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 0,50m)
Figura 5.53	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 0,50m)
Figura 5.54	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 1,15m)
Figura 5.55	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 1,15m)
Figura 5.56	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 2,15m)
Figura 5.57	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 2,15m)
Figura 5.58	Latossolo Vermelho distrófico observado em trincheira (Iguatemi, PR)232
Figura 5.59	Perfil de solo típico – Latossolo Vermelho distrófico (Iguatemi, PR) 234
Figura 5.60	Variabilidade das características físicas do solo – Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)
Figura 5.61	Micromorfologia do solo natural (indeformado) – Perfil III243
Figura 5.62	Difratogramas característicos dos materiais constituintes do Perfil III245
Figura 5.63	Curvas de distribuição de poros (solo natural) – Perfil III
Figura 5.64	Histogramas de freqüência de poros (solo natural) – Perfil III247
Figura 5.65	Efeito da inundação do solo para os diferentes níveis do Perfil III – Ensaios simples
Figura 5.66	Curvas de compressão do solo normalizadas (umidade natural) – Perfil III
Figura 5.67	Curvas de compressão do solo normalizadas (solo inundado) – Perfil III

Figura 5.68	Tensões geostáticas e de pré-adensamento e índices de compressão do solo – Perfil III
Figura 5.69	Comparação entre os coeficientes de colapso obtidos (ensaios simples e duplos) – Perfil III
Figura 5.70	Variações dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples) - Perfil III
Figura 5.71	Variações dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios duplos) - Perfil III
Figura 5.72	Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade – (Perfil III) - ensaios simples
Figura 5.73	Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade (Perfil III) - ensaios duplos
Figura 5.74	Coeficientes de colapso estrutural em função de (σ_i/σ_{pn}) para as amostras do Perfil III
Figura 5.75	Coeficiente de colapsibilidade do solo – Perfil III (REGINATTO; FERRERO, 1973)
Figura 5.76	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil III – prof. 0,65 m)
Figura 5.77	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil III - prof. 0,65 m)
Figura 5.78	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil III – prof. 1,45 m)
Figura 5.79	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil III – prof. 1,45 m)
Figura 5.80	Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil III – prof. 5,15 m)
Figura 5.81	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil III – prof. 5,15 m)275
Figura 5.82	Curvas de distribuição de poros – material natural e ensaiado (Perfil III – prof. 9,35 m)

Figura 5.83	Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfi	il III
	– prof. (9,35m)	.276

Capítulo 6

Figura 6.1	Coeficiente de	colapso do	solo para	os perfis	estudados	(REGINATTO;
	FERRERO, 197	′3)				

LISTA DE TABELAS

Cap	ítulo	2
-----	-------	---

Tabela 2.1	Critérios baseados em índices físicos e Limites de Atterberg71
Tabela 2.1	Classificação da Colapsibilidade nas Obras de Engenharia (JENNINGS; KNIGHT, 1975)
Tabela 2.1	Grau de Gravidade do Colapso (LUTENEGGER; SABER, 1988)75
Tabela 2.1	Coeficiente de colapso (REZNIK, 1989)79
Capítulo 3	
Tabela 3.1	Identificação das amostras estudadas
Tabela 3.2	Classificações de tamanhos de poros de acordo com vários autores97
Capítulo 4	
Tabela 4.1	Localização e identificação dos perfis estudados
Capítulo 5	
Tabela 5.1	Caracterização física do Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)111
Tabela 5.2	Variabilidade das características físicas do solo – Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)
Tabela 5.3	Análise estatística das características físicas do solo – Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)
Tabela 5.4	Mineralogia do Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)122
Tabela 5.5	Parâmetros hiperfinos e áreas subespectrais (Perfil I)125
Tabela 5.6	Classificação dos poros de acordo com Brewer (1976) – Solo natural (Perfil I)
Tabela 5.7	Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos - Perfil I

Tabela 5.8	Tensões e índices de compressão obtidos nos ensaios simples e duplos (Perfil I)
Tabela 5.9	Coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples e duplos) - Perfil I143
Tabela 5.10	Características físicas dos corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas - Perfil I
Tabela 5.11	Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria – Perfil I
Tabela 5.12	Classificação dos poros segundo Brewer (1976) – Perfil I (solo natural e ensaiado)
Tabela 5.13	Caracterização física do Perfil II (Nitossolo Vermelho eutroférrico) 187
Tabela 5.14	Análise estatística das características físicas – Perfil II
Tabela 5.15	Mineralogia do Perfil II (Nitossolo Vermelho eutroférrico)
Tabela 5.16	Parâmetros hiperfinos e áreas subespectrais (Perfil II)196
Tabela 5.17	Classificação dos poros de acordo com Brewer, 1976 – Solo natural (Perfil II)
Tabela 5.18	Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos (Perfil II)
Tabela 5.19	Tensões e índices de compressão obtidos nos ensaios simples e duplos (Perfil II)
Tabela 5.20	Coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples e duplos) - Perfil II .207
Tabela 5.21.	Características físicas dos corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas - Perfil II
Tabela 5.22	Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria (Perfil II)
Tabela 5.23	Classificação dos poros de acordo com Brewer, 1976 – solo natural e ensaiado (Perfil II)228
Tabela 5.24	Caracterização física do Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)236

Tabela 5.25	Variabilidade das características físicas do solo – Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)
Tabela 5.26	Análise estatística das características físicas do solo – Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)
Tabela 5.27	Mineralogia do Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)
Tabela 5.28	Classificação dos poros de acordo com Brewer, 1976 – Solo natural (Perfil III)
Tabela 5.29	Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos - Perfil III
Tabela 5.30	Tensões e índices de compressão obtidos nos ensaios simples e duplos (Perfil III)
Tabela 5.31	Coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples e duplos) - Perfil III 256
Tabela 5.32	Características físicas dos corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas - Perfil III
Tabela 5.33	Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria – Perfil III
Tabela 5.34	Classificação dos poros de acordo com Brewer (1976) – Perfil I (solo natural e ensaiado)

LISTA DE PRANCHAS

Prancha I	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distroférrico – Profundidade de 1,60m)156
Prancha II	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distroférrico – Profundidade de 3,20m)159
Prancha III	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distroférrico – Profundidade de 4,70m)162
Prancha IV	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distroférrico – Profundidade de 6,25m)
Prancha V	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distroférrico – Profundidade de 7,80m)
Prancha VI	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distroférrico – Profundidade de 9,25m)169
Prancha VII	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Nitossolo Vermelho eutroférrico – Profundidade de 0,50m)
Prancha VIII	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Nitossolo Vermelho eutroférrico – Profundidade de 1,15m)
Prancha IX	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Nitossolo Vermelho eutroférrico – Profundidade de 2,15m)
Prancha X	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distrófico – Profundidade de 0,65m)
Prancha XI	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distrófico – Profundidade de 1,45m)
Prancha XII	Micromorfologia do solo natural e ensaiado (Latossolo Vermelho distrófico – Profundidade de 5,15m)
Prancha XIII	Micromorfologia do solo natural (Latossolo Vermelho distrófico – Profundidade de 14,15m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 SOLOS COLAPSÍVEIS	
2.2 COLAPSO	31
2.3 OCORRÊNCIA DE SOLOS COLAPSÍVEIS	
2.4 MECANISMOS DO COLAPSO	
2.5 ESTUDO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS	45
2.5.1 Ensaios de Laboratório	46
2.5.1.1 Ensaios edométricos	47
2.5.1.1.1 Ensaio edométrico duplo	47
2.5.1.1.2 Ensaio edométrico simples	49
2.5.1.1.3 Ensaio edométrico com controle de sucção	51
2.5.1.2 Microscopia	53
2.5.1.3 Análises mineralógicas	64
2.5.1.4 Ensaio de porosimetria	65
2.5.2 Ensaios de Campo	66
2.5.2.1 Provas de carga	66
2.5.2.2 Expansocolapsômetro	68
2.5.2.3 Standart Penetration Test (SPT) e Cone Penetration Test	(CPT) 69
2.6 IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS	70

2.6.1 Critérios Baseados em Índices Físicos e Limites de Atterberg	70
2.6.2 Critérios Baseados em Ensaios Edométricos	72
2.6.2.1 Critério de Jennings & Knight (1957)	72
2.6.2.2 Critério de Knight (1963)	73
2.6.2.3 Critério de Lutenegger & Saber (1988)	75
2.6.2.4 Critério de Reginatto & Ferrero (1973)	76
2.6.3 Critério de Basma & Tuncer (1992)	77
2.6.4 Critério Baseado em Ensaio de Campo	78
3 MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 SELEÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS	81
3.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO	
3.3 AMOSTRAGENS	
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	
3.5 ENSAIOS EDOMÉTRICOS	
3.6 ANÁLISES MICROMORFOLÓGICAS	
3.7 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	91
3.8 ENSAIOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	95
4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS ÁREAS DE ESTUDO	98
4.1 CARACTERÍSTICAS DO MEIO FÍSICO	98
4.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS	99
4.3 ASPECTOS PEDOLÓGICOS	101
4.4 LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS	

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	104
5.1 O PERFIL I (LATOSSOLO VERMELHO distroférrico)	
5.1.1 Caracterização do Material Natural	
5.1.1.1 Descrição morfológica	
5.1.1.2 Caracterização geotécnica	
5.1.1.3 Caracterização física	110
5.1.1.4 Micromorfologia do perfil de solo	115
5.1.1.5 Caracterização mineralógica	
5.1.1.6 Porosimetria	
5.1.2 Ensaios Edométricos	
5.1.2.1 Curvas de compressão	
5.1.2.2 Tensão de pré-adensamento	140
5.1.2.3 Colapsibilidade do solo	142
5.1.3 Micromorfologia do Material Ensaiado (evolução da micro carregamentos e inundação)	oestrutura sob 150
5.1.4 Porosimetria do Material Ensaiado	
5.1.5 Síntese de Resultados	
5.2 O PERFIL II (NITOSSOLO VERMELHO eutroférrico)	
5.2.1 Caracterização do Material Natural	
5.2.1.1 Descrição morfológica	
5.2.1.2 Caracterização geotécnica	
5.2.1.3 Caracterização física	
5.2.1.4 Micromorfologia do perfil de solo	

5.2.1.5 Caracterização mineralógica	
5.2.1.6 Porosimetria	
5.2.2 Ensaios Edométricos	
5.2.2.1 Curvas de compressão	
5.2.2.2 Tensão de pré-adensamento	
5.2.2.3 Colapsibilidade do solo	
5.2.3 Micromorfologia do Material Ensaiado (evolução da r carregamentos e inundação)	nicroestrutura sob 213
5.2.4 Porosimetria do Material Ensaiado	
5.2.5 Síntese dos Resultados	
5.3 O PERFIL III (Latossolo Vermelho distrófico)	
5.3.1 Caracterização do Material Natural	
5.3.1.1 Descrição morfológica	
5.3.1.2 Caracterização geotécnica	
5.3.1.3 Caracterização física	
5.3.1.4 Micromorfologia do perfil de solo	
5.3.1.5 Caracterização mineralógica	244
5.3.1.6 Porosimetria	
5.3.2 Ensaios Edométricos	
5.3.2.1 Curvas de compressão	
5.3.2.2 Tensão de pré-adensamento	
5.3.2.3 Colapsibilidade do solo	

5.3.3 Micromorfologia do Material Ensaiado (evolução da microestrutur carregamentos e inundação)	a sob 261
5.3.4 Porosimetria do Material Ensaiado	270
5.3.5 Síntese dos resultados	278
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	280
6.1 PERFIS I e II	280
6.1.1 Caracterização Geotécnica	281
6.1.2 Caracterização Física – Solos Evoluídos	282
6.1.3 Micromorfologia dos Solos Constituintes da Camada Evoluída – Na	atural 283
6.1.4 Porosidades Predominantes – Solos Evoluídos	
6.1.5 Mineralogia	287
6.1.6 Solo Ensaiado (Comportamentos Observados com Carregamentos Inundação)	e 288
6.1.7 Comportamentos Observados através das Diferentes Técnicas de E Empregadas e suas Associações	studo 290
6.2 PERFIS I e III	293
7 CONCLUSÃO	294
7.1 Resultados do Estudo do Colapso com Ênfase nos Aspectos Estruturais	294
7.2 Metodologia Empregada	296
REFERÊNCIAS	298
ANEXO – Terminologia micromorfológica	310

1 INTRODUÇÃO

Todos os solos, quando sujeitos a carregamentos, se deformam. Os tipos e a magnitude das deformações, bem como os tempos necessários para a sua estabilização dependem, entre outros fatores, das tensões aplicadas, das condições de umidade e das propriedades inerentes a cada tipo de solo. Entretanto, alguns solos não saturados, quando umedecidos, experimentam reduções de volume adicionais e repentinas, sob tensões totais praticamente constantes. Esse umedecimento induz o fenômeno denominado de colapso e os solos que os apresentam de colapsíveis, metaestáveis ou subsidentes.

Na prática, as deformações por colapso têm sido observadas em diversas partes do mundo, especialmente nas de clima tropical, envolvendo uma grande variedade de materiais geológicos, mas que se caracterizam fundamentalmente por apresentar estruturas porosas instáveis e um teor de umidade aquém do necessário para a sua completa saturação.

No norte e noroeste do Paraná, por exemplo, uma série de edificações construídas sobre fundações por sapatas ou estacas, apoiadas na camada porosa (solo evoluído), vem apresentando problemas de recalques, ocasionados pelo umedecimento do solo, com o aparecimento de trincas e rachaduras, causando muitas vezes o comprometimento da estabilidade das mesmas.

Em Maringá, situada no norte do estado, no ano de 1998, recalques diferenciais por colapso ocorreram após um período de intensas chuvas, na Estação de Tratamento de Água (ETA) – SANEPAR, com o surgimento de anomalias tais como: deslocamento da estrutura do

decantador, deslocamento de pisos, fissuras, trincas e rachaduras na região da galeria de comando, e esmagamento de alvenaria, como mostra a Figura 1.1, com sérios riscos de segurança da estrutura.



Figura 1.1 - Danos causados pelo recalque – área externa da galeria de comando de filtros na Estação de Tratamento de Água (Maringá, 1998)

Nas regiões de clima tropical, o fenômeno geralmente se manifesta, em função dos processos pedogenéticos e geoquímicos que atuam intensamente. Os processos pedogenéticos são os responsáveis pelas transformações dos constituintes, transferências, permanentes ou temporárias, de matérias sólidas, líquidas e gasosas, levando a uma evolução e transformação, ao longo do tempo, das propriedades químicas, mineralógicas, físicas e mecânicas dos solos. Essas relações entre os constituintes, sólidos e líquidos principalmente, estão expressas na estrutura do solo (aspecto morfológico), que exprime, também, a sua dinâmica atual e pretérita (RUELLAN; DOSSO, 1993).

O resultado desses processos leva a formação de solos espessos (>5,0 m), como é o caso dos Latossolos, que recobrem cerca de 50% do território brasileiro. Ocorrem praticamente em

todas as regiões do país, sobre diferentes tipos de rochas. São altamente evoluídos, laterizados, ricos em argilominerais 1:1 e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2000), com microagregação característica (MELFI, 1997), apresentando condições flagrantes para a manifestação do colapso.

No Paraná, os latossolos ocupam cerca de 30% do território e apresentam tanto textura predominantemente arenosa (noroeste) quanto argilosa (norte). São solos espessos, muito porosos, de coloração amarelada ou avermelhada em função do conteúdo e da natureza dos compostos de ferro (FASOLO et al., 1986).

O comportamento colapsível exibido por alguns solos deve estar associado à sua estrutura, determinada, em última análise, pelos vários processos que condicionaram a sua formação. Especificamente, o conhecimento da microestrutura dos solos tropicais, onde a manifestação do colapso tem sido mais evidente, é ainda muito escasso quando comparado com aquele dos solos das regiões de clima temperado (COLLINS, 1985).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento colapsível, sob o aspecto estrutural, de três perfís de solos tropicais típicos, que ocorrem na região norte do Paraná e que podem ser considerados representativos do território brasileiro. Dois desses perfís são classificados pela pedologia como Latossolos Vermelhos, um de textura argilosa e outro de textura média. O terceiro perfíl, de textura argilosa, é classificado como Nitossolo Vermelho. O objetivo ainda mais amplo é o de poder associar comportamentos característicos observados para as diferentes classes de solos, sob o ponto de vista pedológico, de tal forma que permita a extrapolação e a aplicação desses conhecimentos a outros solos de ocorrência em zona tropical e que se enquadrem nas mesmas classes dos materiais estudados.

Ensaios edométricos duplos e simples (inundados em diferentes tensões) foram realizados, buscando verificar a existência de colapso e sua magnitude. Observações em lupa binocular e análises micromorfológicas por microscopia óptica em lâminas delgadas, em seções verticais e horizontais, confeccionadas a partir de amostras indeformadas e de amostras ensaiadas (antes e após colapso), permitiram correlacionar as modificações da macro e/ou da microestrutura e sua influência no colapso dos solos.

No desenvolvimento desse estudo, algumas análises complementares foram necessárias para um melhor entendimento das modificações estruturais. As análises mineralógicas auxiliaram na caracterização dos materiais, em particular da fase argilosa, tendo em vista a sua influência no comportamento e arranjo microestrutural do solo e as análises porosimétricas permitiram acompanhar as transformações das porosidades estrutural e textural do solo, a partir de sua condição natural, durante e após a evolução do colapso.

Na apresentação do trabalho procurou-se inicialmente na revisão bibliográfica, que compõe o capítulo 2, expor alguns conceitos e informações essenciais ao entendimento das questões relativas ao colapso com ênfase nos aspectos estruturais.

O capítulo 3 aborda os critérios adotados para a seleção dos materiais estudados (em perfis típicos e representativos da região norte do Paraná) e detalha os métodos e técnicas empregadas na caracterização, no estudo da colapsibilidade e no acompanhamento das modificações estruturais dos solos.

As características do meio físico, os aspectos geológicos e pedológicos e a localização das áreas de estudo são apresentados no capítulo 4.

O capítulo 5 relata o desenvolvimento do trabalho, constando as análises efetuadas e os resultados encontrados, de maneira independente, para os materiais constituintes de cada perfil estudado. Ao final de cada uma das partes, uma síntese dos resultados é elaborada.

A discussão conjunta dos resultados encontrados, para os três perfis analisados, e as conclusões são apresentadas nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS COLAPSÍVEIS

Alguns solos não saturados se caracterizam por sofrerem um recalque suplementar, brusco e de grandes proporções, quando submetidos a um aumento do grau de saturação, sob tensões totais praticamente constantes, ocasionado pelo colapso da estrutura do solo. Por esta razão, tais solos são normalmente denominados colapsíveis, metaestáveis ou subsidentes.

Há solos colapsíveis que, ao serem inundados, entram em colapso apenas pelo próprio peso da camada. Em outros, o colapso está associado a uma sobrecarga, isto é, o mesmo só ocorre se for atingida uma carga limite ou crítica. Mais freqüentemente, o fenômeno ocorre por uma combinação do efeito da sobrecarga e do acréscimo ocasional do grau de saturação (VILAR, 1979; CINTRA, 1998).

Vilar, Rodrigues e Nogueira (1981) afirmam que o fator estrutura é altamente determinante do comportamento e das características que os solos colapsíveis exibem.

Os casos estudados mostram que esses solos têm uma estrutura tal como considerado por Casagrande¹ apud Clemence e Finbarr (1981), em que os grãos são mantidos no lugar por algum vínculo ou força. Quando o suporte é removido, os grãos são capazes de deslizar uns sobre os outros, movendo-se nos espaços vazios.

¹ Casagrande, A. (1932). *The structure of clay and its importance in foundation engineering*. J.Boston Soc. of Civ. Engrs., 19(4), 168-209.

2.2 COLAPSO

Colapso é o fenômeno decorrente da perda de resistência ao cisalhamento de um solo poroso e não saturado, quando inundado sob uma determinada tensão aplicada, ocasionando uma espécie de desmoronamento de sua estrutura.

Considerando o arranjo estrutural dos grãos de areia numa areia siltosa fofa de Transvaal, a partir da demonstração de Casagrande, Jennings e Knight (1957) fornecem uma hipótese para o fenômeno do colapso: "a estrutura do solo, na natureza, está em equilíbrio sob as tensões de peso próprio existentes. Quando o solo é carregado, no seu teor de umidade natural, a estrutura permanece praticamente inalterada: o material vinculado comprime suavemente, sem grandes movimentos relativos dos grãos, como mostra a Figura 2.1.a. Porém, quando o solo carregado ganha umidade e um teor de umidade crítico é excedido, as pontes (bridges) de silte fino alcançam um estágio onde elas podem não resistir por muito tempo às forças de deformação e a estrutura colapsa", como ilustra a Figura 2.1.b.



Figura 2.1 - Estrutura do solo colapsível carregada: a) antes da inundação; b) depois da inundação. (JENNINGS; KNIGHT, 1957)

Nas obras civis, o colapso se manifesta com o surgimento de trincas e rachaduras nas construções, rupturas de aterros, deslizamentos de taludes e de túneis, danos estruturais em

pavimentos, deformações excessivas de maciços compactados durante enchimentos de reservatórios, colapso nas fundações e outros.

A magnitude do colapso e sua velocidade dependem da mineralogia dos materiais presentes, da porcentagem de cada tipo de mineral argílico, da forma dos grãos maiores e sua distribuição granulométrica, do teor de umidade na natureza, do índice de vazios, dos tamanhos e formas dos poros, dos agentes cimentantes, dos íons adsorvidos, dos tipos de íons e suas concentrações na água dos poros, da história de tensões, da espessura da camada de solo envolvida e das sobrecargas aplicadas (DUDLEY, 1970) e da estrutura do solo.

O aumento do grau de saturação do solo acima de um valor mínimo (crítico) requerido implica maiores recalques de colapso até atingir um valor limite superior do grau de saturação, a partir do qual o recalque de colapso deixa de aumentar (CINTRA, 1998).

Segundo Vargas (1973), "a colapsibilidade dos solos porosos parece ser desprezível para baixas tensões aplicadas, aumenta com as tensões aplicadas até um máximo e diminui para um mínimo para uma alta tensão aplicada".

2.3 OCORRÊNCIA DE SOLOS COLAPSÍVEIS

Os solos colapsíveis são encontrados em diversos países do mundo, principalmente em regiões áridas e semi-áridas e abrangem uma grande variedade de materiais geológicos (CLEMENCE; FINBARR, 1981). Os vários locais e climas de suas ocorrências podem ser consultados em Vilar, Rodrigues e Nogueira (1981).

Dentre os casos documentados na literatura, incluem solos eólicos, aluvionares, coluvionares, residuais, corridas ou fluxos de lama (mud flows) e vulcânicos.

Os solos colapsíveis provavelmente se originam de uma evolução pedogênica de solos superficiais pré-existentes, quer sejam esses residuais ou transportados. Caracterizam-se por apresentar estruturas porosas (índices de vazios elevados) e um teor de umidade menor do que o necessário para a sua completa saturação.

Sob o ponto de vista da Pedologia, de acordo com Toledo, Oliveira e Melfi (2000), o solo não é um corpo inerte, que reflete unicamente a composição da rocha que lhe deu origem, mas é um material que evolui no tempo sob ação dos fatores ativos do ciclo supérgeno (clima, vegetação, topografía e biosfera). Portanto, a pedogênese ocorre quando as modificações causadas nas rochas pelo intemperismo, além de serem químicas e mineralógicas, tornam-se, sobretudo estruturais, com importante reorganização e transferência de substâncias orgânicas, inorgânicas e minerais formadores do solo (principalmente argilominerais e oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio – entre os níveis superiores do manto de alteração). Nessa organização, a fauna e a flora, ao realizarem suas funções vitais, desempenham papel fundamental, modificando e movimentando enormes quantidades de material, mantendo o solo aerado e renovado em sua parte mais superficial.

Dessa forma, ainda de acordo com Toledo, Oliveira e Melfi (2000), o intemperismo e a pedogênese levam à formação de um perfil de alteração ou perfil de solo. O perfil é estruturado verticalmente, apresentando dois conjuntos sobrepostos a partir da rocha fresca: saprolito (inferior) e o solum (superior), que constituem juntos, o manto de alteração ou regolito. Os materiais do perfil vão se tornando tanto mais diferenciados com relação à rocha de origem em termos de composição, estruturas e texturas, quanto mais afastados se encontram dela. Sendo dependentes do clima e do relevo, o intemperismo e a pedogênese ocorrem de maneira distinta nos diferentes compartimentos morfo-climáticos do globo, levando à formação de perfis de alteração compostos de horizontes de diferentes espessuras e composição.

Nas regiões tropicais, como é o caso do Brasil, cada tipo de solo possui propriedades físicas, químicas e morfológicas específicas, mas seu conjunto apresenta certo número de

atributos comuns como, por exemplo, composição mineralógica simples (quartzo, caulinita, oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio), grande espessura e horizontes com cores dominantemente amarelas ou vermelhas (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2000).

Os depósitos eólicos colapsíveis são característicos de regiões áridas onde o lençol freático se encontra a grandes profundidades abaixo da superfície do terreno. Quando úmidos, a água contida nos poros tende a evaporar devido às condições climáticas e os solos passam a apresentar elevada resistência a baixos teores de umidade. Sob inundação, as cimentações entre as partículas enfraquecem, reduzindo sua resistência, tornando a estrutura susceptível ao colapso.

Grandes áreas da superfície do globo terrestre, particularmente no oeste dos Estados Unidos, partes da Ásia e sul da África, são cobertas com loess. O loess é um material depositado pelo vento, de coloração amarela a marrom avermelhada, constituído por partículas bem selecionadas, de dimensões equivalentes à fração silte, ligadas por filmes de argila, formando uma estrutura fofa típica. Apresenta elevada capacidade de carga sem sofrer grandes deformações, porém, quando inundado, torna-se susceptível a grandes decréscimos de volume (HOLTZ; HILF, 1961; HOUSTON; HOUSTON; SPADOLA,1988).

Segundo Clemence e Finbarr (1981), os loesses cobrem aproximadamente 17% dos Estados Unidos, 17% da Europa (incluindo os países baixos), partes da França, Alemanha e Europa Oriental, 15% da Rússia e Sibéria e grandes áreas da China. Podem ser também encontrados na Nova Zelândia e nas regiões planas da Argentina e do Uruguai.

Os depósitos eólicos associados às condições climáticas existentes nos desertos do sudoeste dos Estados Unidos constituem a combinação de fatores mais favoráveis para a formação de solos colapsíveis. O clima árido do deserto do sudoeste gera um ambiente em que o potencial de evaporação excede grandemente às precipitações. Nessa região os depósitos de solos colapsíveis são formados principalmente por areias siltosas, siltes arenosos
e areias argilosas de baixa plasticidade, em que somente próximo à superfície os solos tornam-se úmidos durante a precipitação (HOUSTON; HOUSTON; SPADOLA, 1988).

Knight² apud Dudley (1970) pesquisando dez areias eólicas do sul da África concluiu que, embora estes depósitos não tivessem a mesma origem, existia considerável semelhança entre eles, em sua estrutura e composição. Das análises verificou também que essas areias apresentavam um teor de argila considerável.

Os depósitos colapsíveis aluvionares (transportados por enchentes) e os depositados por corrida de lama (mud flow) são característicos de regiões que apresentam curtos períodos de chuvas intensas. Após deposição, permanecem por longos períodos de estiagem, superficialmente não saturados, até a chegada de um novo fluxo. Constituem-se de materiais mal consolidados, contendo um considerável teor de argila.

Segundo Bull³ apud Dudley (1970), o teor de argila tem grande importância no comportamento desses solos. A máxima subsidência ocorre quando a argila representa aproximadamente 12% do total dos sólidos. Abaixo de 5% há pouca subsidência e acima de 30% as argilas expandem. Em relação ao tamanho dos poros do solo afirma que, em alguns casos, para um mesmo índice de vazios, as maiores deformações foram observadas para os solos que apresentaram tamanhos de poros maiores.

Os depósitos de solos residuais colapsíveis são constituídos por grãos ou partículas de diferentes tamanhos, resultantes do intemperismo, produzidos pela desintegração mecânica e decomposição química das rochas locais. As estruturas porosas das camadas superficiais se originam da intensa lixiviação dos elementos solúveis e da concentração de óxidos de ferro e de alumínio, que formam as frações finas do solo, pela ação das águas de percolação. Disso resultam altos índice de vazios, baixas massas específicas e estrutura instável do solo.

² Knight, K. (1962). *Collapsing of partially saturated soils of south Africa*. Unpublished Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.

³ Bull, W. B. (1964). Alluvial fans and near-surface subsidence in Western Fresno Country, California. *Geological Survey Professional Paper 437-A*, Washington, p.71.

No Brasil, os solos colapsíveis foram identificados pela primeira vez em São Paulo, por volta de 1940 (VARGAS, 1977; 1993). Atualmente, encontram-se registrados vários casos de sua ocorrência, recobrindo particularmente uma grande área da região centro-sul do Brasil. Constituem principalmente depósitos aluvionares, coluvionares e residuais (VARGAS, 1977; FERREIRA; LACERDA, 1995).

Solos colapsíveis foram encontrados e estudados para a construção de barragens brasileiras de Três Marias (QUEIROZ, 1960), Promissão (DECÓURT, 1971), Ilha Solteira (VARGAS, 1977) e sete barragens localizadas no Vale de Jequitinhonha (CARVALHO, 1994).

No estado de Minas Gerais foram também identificados solos colapsíveis ao longo do canal de irrigação do Projeto Jaíba (WOLLE et al., 1978) e em Uberlândia (COSTA, 1986).

Na cidade de São Carlos os sedimentos modernos (solos superficiais) colapsíveis foram analisados por Vilar (1979).

Ferreira e Lacerda (1995) apresentam vários registros de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil.

Seraphim (1997) comprovou, através de ensaios de laboratório, maiores colapsos em solos submetidos à lavagem, decorrentes do efeito da lixiviação e do carreamento de finos, quando comparados com amostras de mesma distribuição granulométrica, mas sem lavagem da fração graúda. O autor acredita que este seja o fator relevante responsável pelo potencial de colapso de camadas superficiais de solos, em que o carreamento de finos para horizontes mais profundos, ocasionados pelas chuvas, resultam solos superficiais altamente porosos e susceptíveis ao colapso.

Vários autores acreditam na contribuição da origem do solo, transportado ou residual, no potencial de colapso.

Cardoso, Carvalho e Martins (1998) analisaram solos de origens residual e alóctone do Distrito Federal e demonstraram que o potencial de colapso é mais influenciado pelos fatores pedogenéticos do que simplesmente pela origem transportada ou residual. A colapsibilidade é conseqüência do arranjo estrutural dos solos e que por sua vez é resultado direto de sua química e mineralogia, originada basicamente durante evolução intempérica. O processo de alitização que os solos do Distrito Federal e região sofreram é responsável pela forte agregação das partículas de solo com conseqüente geração de grandes vazios e elevado potencial de colapso.

O fenômeno do colapso está normalmente associado a solos que apresentam estruturas porosas, com índices de vazios elevados e baixo peso específico seco. Entretanto, alguns solos compactados, quando umedecidos, sob certas condições de carregamento, podem exibir recalques adicionais (colapso).

Ensaios realizados com o solo de Transvaal (África) mostraram que o material compactado no ramo seco da curva de compactação (AASHO Modificado), apresentou colapso maior do que o mesmo material compactado no ramo úmido (KNIGHT, 1962 apud DUDLEY, 1970).

Barden e Sides (1969) desenvolveram um estudo com argilas compactadas em laboratório. Os resultados evidenciaram que o colapso parece estar relacionado com a estrutura floculada e macroporosa apresentada por essas argilas, quando compactadas no teor de umidade abaixo do teor de umidade ótimo de compactação.

A estrutura de uma argila compactada é fortemente influenciada pela umidade de moldagem e pelo método de compactação empregado. A passagem da estrutura floculada para estrutura dispersa que ocorre quando a argila passa do ramo seco para o ramo úmido da curva de compactação, acarreta mudança de comportamento nesse tipo de solo (BARDEN; MADEDOR; SIDES, 1969).

Basma e Tuncer (1992) pesquisaram os parâmetros que afetam o potencial de colapso de um solo, utilizando diferentes tipos de solos, compactados. Os corpos de prova compactados, sob distintas condições de umidade e densidade, foram submetidos a ensaios edométricos simples, com diferentes carregamentos e tensão de inundação. Os resultados acusaram o peso específico seco inicial como sendo o parâmetro mais significativo, sendo este inversamente proporcional ao colapso. Constataram também nos ensaios que aumentando o teor de umidade inicial do solo, o potencial de colapso decresce.

Vilar, Machado e Bueno (1998) estudaram o comportamento colapsível de um solo laterítico compactado. Os ensaios edométricos com inundação mostraram para os solos mal compactados (baixo grau de saturação e teor de umidade menor do que o teor de umidade ótimo), grandes deformações de colapso, que tenderiam a aumentar com as tensões aplicadas. As amostras ensaiadas no teor de umidade ótimo e peso específico seco máximo, correspondentes ao Proctor Normal, não foram susceptíveis às deformações de colapso.

Guimarães e Ferreira (1998) avaliaram o comportamento colapsível de solos dos municípios de Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia, compactados estaticamente em laboratório, com diferentes graus de compactação e diferentes desvios do teor de umidade em relação à umidade ótima. Concluíram que os potenciais de colapso reduzem significativamente com o acréscimo do grau de compactação e do teor de umidade inicial, sendo que os maiores valores dos potenciais de colapso estão associados a menores graus de compactação e maiores desvios do teor de umidade em relação à umidade ótima.

Lawton, Fragaszy e Hardcastle (1992) concluíram, com base em suas experiências e em ampla revisão da literatura, que os solos compactados contendo entre 10% e 40% de partículas de argila, tendem a exibir maiores potenciais de colapso.

Vargas (1977) analisando resultados de ensaios edométricos com materiais compactados das áreas de empréstimo, que seriam empregados na construção de barragens na

região centro-sul do Brasil, concluiu que os recalques provenientes do colapso estrutural do solo por efeito da inundação provavelmente só seriam observados nos trechos em que a barragem fosse de pequena altura.

Cruz (1996) afirma que os recalques por colapso de solos porosos não saturados, em aterros de barragens brasileiras, causados pelo enchimento dos reservatórios, têm-se mostrado suficientemente pequenos e em nenhuma obra chegaram a causar qualquer tipo de "acidente". No entanto, admite que o mesmo não possa ser dito em relação a pequenos aterros para a implantação de canais de irrigação, particularmente na região nordeste, onde centenas de metros desses canais têm exigido reparos, devido a problemas ocasionados por colapso das estruturas dos solos.

Souza, Cintra e Vilar (1995) executaram provas de carga em placas e em protótipos de fundações por sapatas em solo poroso natural e compactado. As provas de carga em placas mostraram que a compactação reduziu o recalque por colapso do solo de aproximadamente 87% e aumentou a carga admissível de 110%. Os recalques por colapso observados nos protótipos indicaram uma redução de aproximadamente 80% devido ao efeito da compactação do solo. Esses resultados comprovam que a compactação é um método alternativo de melhoria do solo, capaz de reduzir os recalques por colapso, melhorando o desempenho de fundações superficiais em solos colapsíveis.

2.4 MECANISMOS DO COLAPSO

Os solos colapsíveis possuem uma estrutura altamente porosa (macroporosa) em que as partículas maiores presentes são mantidas em suas posições por meio de vínculos capazes de lhes conferir uma resistência adicional temporária. Essa resistência temporária tem sido atribuída à sucção (forças capilares e de adsorção) e à presença de alguma substância cimentante, como os óxidos de ferro e os carbonatos.

A introdução de algum agente (geralmente a água) em sua estrutura causa um enfraquecimento dos vínculos entre as partículas e pequenos deslizamentos entre elas, provocando um desequilíbrio metaestável, com conseqüente colapso da sua estrutura (DUDLEY,1970; NUÑES, 1975).

Barden, McGown e Collins (1973), Mitchell (1976) e Basma e Tuncer (1992) consideram três condições fundamentais para que um solo apresente um colapso apreciável:

(1) uma estrutura porosa, parcialmente saturada e potencialmente instável;

(2) uma componente de tensão existente ou aplicada, suficientemente elevada, para desenvolver uma condição metaestável e

(3) uma forte vinculação do solo ou agente cimentante para estabilizar os contatos intergranulares e que, sob umedecimento são reduzidas, provocando o colapso.

Dudley (1970) relata as causas do fenômeno e explica os mecanismos de colapso que podem estar envolvidos numa massa de solo, mostrando alguns modelos estruturais de composições granulométricas variadas e vínculos ou forças existentes predominantes ou combinadas, que permitem melhor visualização e compreensão do problema.

Para um solo constituído por areia, a resistência temporária é devido à tensão capilar. À medida que o solo seca, a água tende a ocupar os espaços capilares, como mostrado na Figura 2.2.

A tensão capilar aumenta com a redução dos raios de curvatura dos meniscos da interface ar-água. A água fica submetida a tensões de tração (poropressão negativa) e a tensão efetiva torna-se maior do que a tensão total aplicada pela carga, aumentando a resistência aparente do solo. Se, eventualmente ocorrer a entrada de água na estrutura do solo, os efeitos

benéficos das tensões capilares são destruídos e o solo pode sofrer um rápido decréscimo de volume.



Figura 2.2 - Pressão de contato produzida pela capilaridade (DUDLEY, 1970)

Segundo Aitchison e Donald⁴ apud Clemence e Finbarr (1981), a máxima tensão adicionada devido ao efeito da capilaridade, quando se considera um pacote cúbico de solo composto por grãos esféricos uniformes, no estado fofo, ocorre para um teor de umidade de aproximadamente 32%. Para o pacote mais compacto destes grãos esféricos uniformes, a máxima tensão ocorre para 10% de umidade. Ensaios conduzidos com diversos solos colapsíveis indicaram que os valores de pico da tensão efetiva ocorrem para teores de umidade acima de 10% e menores do que o correspondente a total saturação do solo.

Para solos colapsíveis constituídos de areia com vínculos de silte, a estrutura é mantida por forças capilares aplicadas entre os contatos silte com silte e os contatos silte com areia, como representado na Figura 2.3.

⁴ Aitchison,G.D. & Donald,I.B. (1956). Effective stresses in unsaturated soils. Proceedings, Second Australia-New Zealand Soils Mechanics Conference, p.192-199.

Quando os grãos maiores (areias e siltes) são envolvidos por argila, as forças de osmose, Van der Waals e atração molecular devem representar uma importante parcela de resistência e uma variedade de arranjos são possíveis.



Figura 2.3 - Arranjo esquemático dos grãos de areia e silte (DUDLEY, 1970)

Um dos arranjos que poderiam ser originados quando a argila é formada por autogênese é mostrado na Figura 2.4, onde as placas de argila envolvem os grãos maiores numa disposição paralela. Sob condições de secagem o solo pode apresentar uma resistência considerável. Com a adição de água, os filmes tornam-se mais espessos e separam as partículas de argila, provocando uma perda de resistência.



Figura 2.4 – Arranjo esquemático dos grãos de areia com vínculos de argila por autogênese (DUDLEY, 1970).

Em áreas com grandes precipitações, muitas argilas formadas por autogênese podem ser lixiviadas. Mas, quando as precipitações são pequenas, é possível que a lixiviação seja menor e as partículas de argila sejam dispersas no fluido intersticial, mantendo-se uniformemente distribuídas pelo efeito do movimento Browniano (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Arranjo esquemático dos grãos de areia com vínculos de argila resultante do processo de lixiviação (DUDLEY, 1970)

Knight⁵ apud Dudley (1970) observou através de microscópio que, quando a água intersticial é evaporada, as partículas de argila se agrupam ao redor das junções em um arranjo floculado aleatório devido à alta concentração de íons dissolvidos no fluido intersticial remanescente. Assim, os contrafortes ou pontes de argila suportam os grãos formando uma estrutura onde prevalecem as forças de superfície, embora as tensões capilares possam também estar presentes.

Quando a água é adicionada, as tensões capilares são aliviadas e a concentração de íons no fluido é reduzida, provocando um aumento da força repulsiva existente entre as partículas.

⁵ Knight, K. (1962). *Collapsing of partially saturated soils of south Africa*. Unpublished Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.

A alteração na concentração de íons provoca uma mudança na estabilidade dos contrafortes de argila, resultando uma perda de resistência do solo.

A estrutura apresentada na Figura 2.5 também poderia ser formada por argilas agregadas que funcionariam como grãos, e poderiam desenvolver suas próprias tensões capilares similares aos grãos de silte.

Clemence e Finbarr (1981) apresentaram um outro tipo de estrutura, mostrada na Figura 2.6, formada por agregados de argila, interligados por pontes de argila (clay-bridges ou connectors). Esse tipo de estrutura foi encontrada por Jennings e Knight (1957) numa areia siltosa vermelha de Transvaal, no sul da África.

Agentes cimentantes, tais como óxidos de ferro, carbonatos de cálcio, silicatos, aluminatos, gipsita e sais podem fixar os grãos originando assim uma estrutura mais densa. A perda de sua efetividade dependerá da natureza dos contaminantes dissolvidos na água adentrada na estrutura do solo e a solubilidade do material cimentante envolvido. Esta ação cimentante é freqüentemente o principal agente em solos loéssicos (CLEMENCE; FINBARR, 1981).



Figura 2.6 – Arranjo esquemático de agregados de argila interligados por pontes de argila (CLEMENCE; FINBARR, 1981)

"Nos solos lateríticos e mesmo em solos saprolíticos, a cimentação entre partículas é um fato comprovado. Alguns dos cimentos presentes são mais ou menos solúveis na água" (CRUZ, 1996).

A resistência temporária devido às ligações interpartículas ocorre, na maioria das vezes, de forma combinada, prevalecendo um ou outro.

O consenso geral de opinião é de que a tensão capilar é o principal fator que contribui na resistência temporária dos solos colapsíveis (DUDLEY, 1970).

Desta forma, o tempo para processar o colapso de um solo dependerá dos tipos de ligação e suas combinações que mantêm a estrutura do solo.

Barden, Mcgown e Collins (1973) consideram colapso instantâneo para estruturas mantidas pela sucção, colapso com velocidade intermediária para ligações por pontes de argila, quando estas são quebradas ou removidas, e colapso mais lento para quebras de agentes cimentantes.

Clemence e Finbarr (1981) consideram que o colapso é mais imediato no caso onde os grãos estão mantidos pela sucção capilar, reduz no caso de cimentante químico e reduz ainda mais no caso de contrafortes de argila.

Porém, independente das ligações ou vínculos que mantêm essas estruturas, os solos susceptíveis ao colapso apresentam uma grande sensibilidade à ação da água sendo o aumento do teor de umidade o mecanismo detonador ou o efeito gatilho no processo do colapso (DUDLEY, 1970; CLEMENCE; FINBARR, 1981; CINTRA, 1998).

2.5 ESTUDO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS

Alguns ensaios de campo e de laboratório permitem observar as mudanças de comportamento do solo mediante alterações de seu teor de umidade e/ou das cargas aplicadas.

Essas mudanças de comportamento são manifestadas devido às modificações da estrutura do solo causadas por enfraquecimento das ligações.

Dentre esses ensaios tem-se buscado verificar a existência do colapso, obter informações quantitativas para a estimativa da magnitude dos recalques e observar e acompanhar as modificações da estrutura do solo, mesmo que de maneira qualitativa, visto que a instabilidade da estrutura é o principal fator que interfere nas mudanças de comportamento dos solos não saturados.

Como os solos a serem estudados possuem estruturas porosas, cuidados devem ser tomados quando da coleta das amostras indeformadas para a realização de ensaios de laboratório, evitando o amolgamento e a variação do seu teor de umidade. Por esta razão, quanto à representatividade das amostras, os ensaios de campo apresentam-se como uma forma mais segura de identificação do colapso.

2.5.1 Ensaios de Laboratório

Jennings e Knight (1957) comprovaram que durante a coleta de amostras indeformadas com utilização de amostradores de parede fina, um solo poroso colapsível pode sofrer uma compressão, resultando numa redução de sua altura. Para os casos estudados, esses valores chegaram a atingir 30% da altura. Constataram, então, que as amostras indeformadas em forma de blocos, talhadas no fundo de poços, são preferíveis para obter amostras representativas de campo para estudos de solos colapsíveis em laboratório.

Day (1990) realizou ensaios edométricos em amostras de um solo colapsível aluvionar da Califórnia, classificado como silte argiloso inorgânico, visando comparar o seu comportamento quando sujeito à diferentes processos de amostragem. Amostras coletadas na forma de bloco e amostras coletadas em amostradores Shelby foram analisadas. As amostras coletadas no tubo Shelby apresentaram fraturas, levando à uma dispersão maior dos resultados dos ensaios. Os resultados obtidos com as amostras do tipo bloco foram bastante repetitivos, sendo que o percentual de colapso apresentado nesse tipo de amostra foi de aproximadamente 50% em relação àquele obtido para as amostras coletadas nos amostradores Shelby.

Dudley (1970) considera que os ensaios de laboratório não reproduzem completamente as condições de campo e sugere a aplicação de fatores de correção baseados em experiências na área. Esses fatores podem não ser transferíveis de uma área para outra.

Dentre os ensaios de laboratório, serão abordados os ensaios edométricos, microscopia, porosimetria e análises mineralógicas.

2.5.1.1 Ensaios edométricos

Os ensaios edométricos têm sido os mais utilizados em laboratório para avaliar a possibilidade de ocorrência do colapso, além de fornecerem informações quantitativas que permitem a estimativa da magnitude dos recalques.

Existem duas maneiras de condução desses ensaios: o ensaio edométrico simples e o ensaio edométrico duplo.

2.5.1.1.1 Ensaio edométrico duplo

Jennings e Knight (1957) propuseram a realização de dois ensaios edométricos concomitantemente, sobre amostras do mesmo solo. Os corpos de prova talhados, com características similares, são submetidos inicialmente a uma tensão de assentamento de 1kPa, permanecendo até a estabilização das deformações. Em um dos corpos de prova é mantido o

teor de umidade natural, enquanto que o outro é inundado no equipamento até a sua completa saturação.

Os ensaios são conduzidos aumentando a carga progressivamente, sendo que cada incremento é aplicado somente após a estabilização das deformações, sobre o carregamento anterior.

Após a aplicação da máxima tensão de interesse e a estabilização das deformações, procede-se ao descarregamento dos corpos de prova.

Concluídos os ensaios, as interpretações dos resultados são feitas através das curvas traçadas e *versus* log σ_v , para cada corpo de prova, conforme mostra a Figura 2.7.



Pressão aplicada - $\sigma_V(\log)$

Figura 2.7 - Curvas e *versus* log σ_v obtidas no ensaio edométrico duplo (JENNINGS; KNIGHT, 1957)

Observa-se, de um modo geral, que as curvas apresentam-se deslocadas, o que pode ser considerado comum, e se deve, principalmente, à heterogeneidade das características físicas iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios edométricos.

Os autores propuseram um ajuste das curvas, por translação das mesmas, de forma a obter aproximadamente uma média das condições de campo, no início do ensaio. Esses

ajustes são permitidos somente nos casos em que o solo não sofre colapso, sob condições de tensão de campo (peso próprio), quando submetido a variações de umidade.

Com as curvas ajustadas, Figura 2.8, é possível obter as deformações verticais (recalques) do corpo de prova ensaiado na umidade de natural (campo) e também os recalques adicionais (colapso) devido a saturação, para o corpo de prova inundado.



Pressão aplicada - $\sigma_V(\log)$

Figura 2.8 – Curvas e versus log σ_v ajustadas (JENNINGS; KNIGHT, 1957)

2.5.1.1.2 Ensaio edométrico simples

O ensaio é executado de maneira convencional, com apenas um corpo de prova, no teor de umidade natural (campo), até atingir a tensão de interesse. Após a estabilização das deformações, inunda-se o corpo de prova e medem-se as deformações adicionais (colapso). Prossegue-se o ensaio, aplicando-se incrementos de carga até a máxima tensão de interesse; fazendo-se as leituras de deformação vertical. Ao final do ensaio a amostra é descarregada, retirando as cargas em incrementos. A curva e *versus* log σ_v obtida pode ser visualizada na Figura 2.9.

O ensaio edométrico simples apresenta vantagem sobre o ensaio edométrico duplo, devido à eliminação dos problemas quanto à similaridade dos corpos de prova talhados. Durante o processo de talhagem pode ocorrer perturbação da amostra, alterando as condições de campo, além do problema de heterogeneidade dos corpos de prova.



Figura 2.9 – Curvas e versus log σ_v do ensaio edométrico simples (JENNINGS; KNIGHT, 1957)

Os resultados obtidos para uma mesma amostra de solo, com os corpos de prova submetidos à ensaios edométricos simples e duplo podem apresentar variações.

Lutenegger e Saber (1988) afirmam que, dependendo do tipo de solo, poderá haver diferenças significativas no potencial de colapso obtidos através de edométricos simples e duplos. Para os solos loéssicos estudados, as dispersões nos resultados de ensaios parecem estar relacionadas com as dimensões dos corpos de prova e com a técnica de ensaio empregada. Reznik (1989) observou, para os solos estudados, que o valor do potencial de colapso obtido no ensaio edométrico simples é aproximadamente 10 a 20% menor do que o mesmo parâmetro determinado através do ensaio edométrico duplo.

Basma e Tuncer (1992) desenvolveram um programa laboratorial envolvendo oito diferentes tipos de solos, submetidos à ensaios edométricos simples e duplos. Os resultados encontrados pelos dois procedimentos foram similares.

Dada a importância da sucção no comportamento dos solos não saturados, a determinação das suas propriedades exigiu o desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos que permitissem a realização dos ensaios com controle de sucção.

Por esta razão, muitos equipamentos convencionais da geotecnia vêm sendo desenvolvidos ou adaptados para esta finalidade, dentre eles as câmaras edométricas.

2.5.1.1.3 Ensaio edométrico com controle de sucção

Várias câmaras edométricas com controle de sucção foram desenvolvidas, destacandose as de Escario (1967, 1969), Barden, Madedor e Sides (1969), Chang (1969), Atchison e Woodburn (1969), Escario e Saez (1973) e Fredlund e Morgenstern (1976).

A câmara edométrica desenvolvida por Escario e Saez (1973) contém uma membrana semi-permeável ou pedra porosa de alto valor de entrada de ar, adaptada na base do equipamento para implementação da sucção no solo.

Para a realização do ensaio, o corpo de prova contido no anel é colocado em contato, na base, com uma membrana semi-permeável ou pedra porosa de alto valor de entrada de ar e no topo, com uma pedra porosa, Figura 2.10. A aplicação das sobrecargas é feita de maneira análoga aos ensaios edométricos convencionais e a sucção $(u_a - u_w)$ desejada é medida utilizando a técnica de translação de eixos de Hilf.

A técnica introduzida por Hilf (1956) é empregada por uma razão muito simples. Em um solo não saturado, tomando a pressão atmosférica como referência e igual a zero, a pressão na água é considerada negativa. Nos ensaios de laboratório aplicar uma pressão negativa na água para obter a sucção desejada pode ser problemático. As pressões negativas na água são limitadas a 1 atm (100 kPa), pois acima deste valor normalmente ocorre a cavitação do sistema.



Figura 2.10 – Câmara edométrica desenvolvida por Escario e Saez (1973)

O artificio empregado nesta técnica consiste em aplicar a pressão de ar maior do que a pressão atmosférica, ajustando as pressões de modo a obter a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água $(u_a - u_w)$ ou sucção desejada, mantendo a pressão da água sempre positiva.

As membranas semipermeáveis ou pedras porosas de alto valor de entrada de ar permitem a passagem da água, porém impedem a passagem do ar, sendo consideradas, portanto, elementos fundamentais para a realização desses ensaios. No Brasil, Machado (1995) desenvolveu uma câmara edométrica que permite a realização de ensaios edométricos com controle de sucção e medida de tensões laterais. Essa câmara possui a vantagem de ser facilmente encaixada na prensa de Bishop, devido às suas dimensões, dispensando maiores adaptações.

2.5.1.2 Microscopia

Embora os termos "microestrutura" e "microfabrica" sejam freqüentemente empregados, de maneira intercambiável, no campo da engenharia, a microfabrica é a componente da microestrutura que leva em conta o arranjo espacial, a distribuição das partículas e os vazios do solo associados; enquanto que a microestrutura engloba a microfabrica, a composição e as forças interpartículas (COLLINS; MCGOWN, 1974).

Nos estudos microestruturais uma variedade de técnicas podem ser empregadas, como o uso do microscópio eletrônico de varredura e a microscopia óptica, que permitem obter muitas informações qualitativas e quantitativas. É também possível estudar uma mesma seção delgada seqüencialmente por microscopia óptica e eletrônica de varredura, e a quantificação da porosidade usando técnicas de análise de imagens do microscópio eletrônico de varredura. A utilização dessas técnicas requer o emprego de diferentes métodos de impregnação e secamento de amostras de solos.

A microscopia eletrônica de varredura permite a observação do arranjo, dos contatos dos grãos, do tipo de estrutura, da orientação das partículas e dos poros (WOLLE, 1974).

A microscopia óptica, através do estudo de lâminas delgadas, permite a análise qualitativa da microestrutura do solo.

O microscópio petrográfico óptico permite um aumento das imagens ≤ 1.000, sobre lâminas delgadas fabricadas a partir de materiais endurecidos. O microscópio eletrônico de varredura permite obter imagens, com ampliações de 30 a 140.000, cujas escalas variam entre aquela do agregado e a das partículas argilosas e, além disso, mostram o relevo (CARVALHO et al., 1981).

No estudo da colapsibilidade do solo, as análises micromorfológicas permitem acompanhar a evolução da microestrutura do solo (modificação da porosidade, das formas dos agregados e das suas relações, desenvolvimento de orientações e fissuras, etc) em função dos diferentes carregamentos e condições de saturação, antes e após o colapso.

Mitchell (1956) desenvolveu um estudo envolvendo 14 argilas provenientes de vários locais dos Estados Unidos, sendo 7 argilas de origem marinha e 7 argilas originadas em água doce, com o objetivo de pesquisar a influência da estrutura no comportamento do solo. As estruturas das argilas no estado indeformado e remoldado, observadas através de microscópio petrográfico óptico, permitiram correlacionar as mudanças das propriedades, obtidas em ensaios específicos, com as mudanças das estruturas desses solos. As correlações encontradas entre as propriedades e as estruturas das argilas permitiram ao autor concluir que a orientação da argila é a componente mais importante da estrutura que influencia nas suas propriedades.

Collins e Mcgown (1974) desenvolveram um estudo detalhado da microfabrica de argilas, siltes e areias, com emprego do microscópio eletrônico de varredura. Os solos estudados eram provenientes de diversos locais geográficos, que foram depositados por diferentes processos, em distintos ambientes de deposição.

As observações microscópicas mostraram para os solos colapsíveis, tais como a argila siltosa de Tucson, a areia de Transvaal, os solos loéssicos e certos depósitos glaciais, arranjos de partículas elementares envolvendo partículas de silte fino e argila em várias configurações, sistemas parcialmente discerníveis de partículas e contatos grão-grão cobertos. Alguns contatos limpos foram observados nos depósitos, particularmente no loess da Bélgica. Conjuntos ligados (connectors) foram frequentemente encontrados, consistindo-se de arranjos

compactos argila-silte e de sistemas parcialmente discerníveis de partículas, como mostra a Figura 2.11.



Figura 2.11 – Conjuntos ligados (connectors) – areia de Transvaal (COLLINS; MCGOWN, 1974)

Matrizes de partículas granulares foram observadas em todos os solos, enquanto que, matrizes de partículas de argila foram relativamente raras. Matrizes de partículas consistindo de sistemas parcialmente discerníveis de partículas foram comuns no solo de Tucson, conforme se observa na Figura 2.12.

Agregações regulares atuando como unidades individuais, em uma microfabrica essencialmente granular, como exemplificado na Figura 2.13, foram encontradas nos solos colapsíveis, embora suas ocorrências nos solos loéssicos fossem relativamente raras.

Na argila siltosa de Tucson e na areia de Transvaal, os poros observados foram relativamente grandes comparados com aqueles encontrados nos depósitos loéssicos e glaciais.



Figura 2.12 – Sistema parcialmente discernível de partículas – argila siltosa de Tucson – EUA (COLLINS; MCGOWN, 1974)



Figura 2.13 - Agregação regular - areia de Transvaal (COLLINS e MCGOWN, 1974)

Os autores concluíram que as características dominantes das microfabricas observadas nesses solos, que pareciam estar associadas com o mecanismo do colapso, eram as matrizes de partículas granulares cobertas, os conjuntos de ligações (connectors) formados por arranjos parcialmente discerníveis de partículas e as agregações regulares atuantes em microfabricas essencialmente granulares. Altos potenciais de colapso deveriam também estar associados com a presença de poros relativamente grandes intra-agregados ou interagregados que ocorreram nesses solos.

Wolle, Benvenuto e Carvalho (1981) realizaram análises de microscopia eletrônica de varredura para os solos de fundações de canais de irrigação na região central do Brasil. As análises revelaram uma microestrutura típica de solos arenosos colapsíveis: os grãos de areia geralmente não têm contato direto entre eles, mas são ligados por partículas menores de argila ou silte.

Carvalho et al. (1981) estudaram a relação entre a micromorfologia dos solos lateríticos e o seu comportamento hídrico e mecânico.

Um dos solos lateríticos estudados, mais representativo, foi o "Latossolo Roxo" (atualmente denominado Latossolo Vermelho), desenvolvido a partir das rochas basálticas da Bacia do Paraná, constituindo um horizonte B, caracterizado freqüentemente por espessas camadas, chegando a atingir 10 a 15 metros de espessura, de cor vermelha escura e de textura predominantemente argilosa (fração argila $\geq 60\%$). Nas frações grosseiras encontram-se minerais residuais da rocha, formando aproximadamente 10% de areias. Sua estrutura é maciça, porosa a granular fina e muito frágil.

Através de análises micromorfológicas fez-se o reconhecimento dos tipos de plasma (de tamanho coloidal), representados pela fração argilosa e dos tipos de distribuição relativa do plasma em relação aos grãos do esqueleto, correspondente às areias. Foram reconhecidos também o tamanho, a forma e o arranjo dos agregados e dos vazios que os separam.

Esses arranjos geométricos, em diversos níveis de organização, foram observados com o auxílio de microscópios petrográfico óptico e eletrônico de varredura.

"Na Figura 2.14, obtida no microscópio óptico em luz polarizada, se reconhece alguns grãos do esqueleto: minerais opacos dispersos, essencialmente magnetita e ilmenita, do tamanho das areias e dos siltes (M.O.) e pequenos quartzos (Q). O plasma (P) é constituído por um conjunto relativamente homogêneo, de aspecto floculado, tinto de vermelho escuro, não apresentando orientações ópticas preferenciais, salvo faixas muito finas, claras, que delimitam localmente os vazios (V)".



Figura 2.14 – Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio óptico com luz polarizada (CARVALHO et al., 1981)

O conjunto do esqueleto e do plasma se distribui sob a forma de microagregados (M) grosseiramente esféricos de aproximadamente 100 µm de diâmetro, mais ou menos individualizados e unidos uns aos outros. Representam as unidades de organização mais estáveis contidas nesses Latossolos.

Os vazios visíveis nessa escala estão, na maioria, compreendidos entre esses microagregados. São comunicantes e apresentam diâmetros da ordem de 30 µm.

A Figura 2.15, obtida no microscópio eletrônico de varredura, com pequeno aumento, põe em evidência o aspecto particular desta "arquitetura contínua", formada pela união dos microagregados, estáveis e grosseiramente isodiamétricos.



Figura 2.15 – Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio eletrônico de varredura com pequeno aumento (CARVALHO et al., 1981)

As Figuras 2.16 e 2.17, obtidas com um aumento maior, através de microscópio eletrônico de varredura, mostram que o plasma (P) destes microagregados é, ele próprio constituído por grãos muito finos (diâmetro da ordem de 0,1 µm), orientados de qualquer maneira, formados pela assembléia de micropartículas de caulinita e gibbsita, envelopadas e cimentadas por oxi-hidratos férricos que asseguram a estabilidade dessa organização.

Entre os grãos muito finos são observados "criptovazios (CV)", com diâmetro da ordem de 0,1 µm, representando uma parte importante da porosidade.

A microestrutura do material estudado aparece, portanto, caracterizada pela existência de uma "armação contínua", sensivelmente isotrópica, formada pela união dos microagregados, compostos principalmente por um plasma argilo-férrico. A estabilidade desses microagregados parece devido, não à natureza das partículas que os constituem, mas à sua cimentação pelos óxidos-hidratos férricos.



Figura 2.16 – Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio eletrônico de varredura com aumento de 13.000 (CARVALHO et al., 1981)



Figura 2.17 – Material natural – Horizonte B de latossolo roxo observado ao microscópio eletrônico de varredura com aumento de 18.000 (CARVALHO et al., 1981)

"A porosidade do conjunto é muito elevada (aproximadamente 65% do volume total); se compõe de uma porosidade média interagregado (diâmetro médio 30 μ m) e de uma porosidade muito fina intra-agregado (diâmetro da ordem de 0,1 μ m)" (CARVALHO et al., 1981).

Segundo os autores, os comportamentos hídrico e mecânico do latossolo roxo revelados pelos resultados de testes e medidas físicas parecem ser mais dependentes de sua morfologia do que da natureza e da abundância dos seus constituintes argilosos, já que estes últimos se associam sob forma de microagregados estáveis, que reagem como areias sob esforços hídricos e mecânicos fracos.

Collins (1985) considera que a microestrutura dos solos residuais tropicais é um fator extremamente importante que influencia o seu comportamento. Entretanto, afirma que muito pouco se conhece sobre a estrutura desses solos e, em particular, dos solos lateríticos e saprolíticos, quando comparados com a estrutura dos solos de climas temperados; e que nenhum sistema de terminologia ou caracterização da fabrica encontra-se disponível ou em uso no campo da engenharia que permita avaliar as diversidades e heterogeneidades da microfabrica dos solos tropicais.

O autor propõe um sistema de caracterização da microfabrica, adaptado para o uso em estudos de solos lateríticos e saprolíticos, levando em conta os modelos de fabrica e conceitos propostos anteriormente por vários pesquisadores, considerados adequados para utilização em estudos na engenharia. Três níveis de organização da fabrica são identificados e descritos à seguir:

1- Nível elementar - um pequeno número de partículas interage na forma de arranjos de partículas elementares. Partículas elementares são partículas de dimensões de argila, silte e areia ou grupos de dimensões de argila, blocos ou aglomerados de partículas de argila. Dois tipos principais de arranjos são identificados; os arranjos de argila e os arranjos

granulares, sendo ainda possível uma subdivisão para cada caso. Por exemplo, os arranjos de argila podem ser aleatórios, paralelos ou aglomerados na natureza. Collins e Mcgown (1974) revisaram uma série de modelos possíveis. Em muitos casos a natureza dos arranjos de partículas podem ser parcialmente discerníveis devido à presença de sesquióxidos amorfos. Em relação aos arranjos granulares, estes podem também ser subdivididos em contatos grão-grão limpos e contatos grão-grão cobertos ou cimentados. Os poros que ocorrem dentro dos vários arranjos de partículas elementares são denominados intra-elementares.

2- Nível de conjunto - um grande número de partículas elementares de argila ou granulares associa-se para formar vários tipos de conjuntos de partículas. Estes são unidades (grupos) de organizações de partículas com limites físicos definíveis em que três tipos principais são identificados: matrizes, agregações e connectors. Os poros ocorrem dentro e entre conjuntos e estes são denominados intra-aglomerados e interaglomerados, respectivamente. As matrizes compreendem arranjos de partículas elementares tridimensionalmente ordenados, podendo ser subdivididas em matrizes de argila e matrizes granulares. O primeiro deve ser provavelmente encontrado em solos lateríticos, enquanto que o segundo, em solos saprolíticos. As agregações são conjuntos em forma de unidades (grupos) separadas ou grãos individuais. Eles interagem mutuamente e possivelmente com os grãos minerais de formação da rocha, exibindo uma fabrica com uma aparência evidentemente granular. Consistem de arranjos granulares ou de argila (parcialmente discerníveis em alguns casos), podendo apresentar dimensões de silte ou areia, com forma arredondada, subangular ou irregular. Tais características são provavelmente encontradas em muitos solos lateríticos. É possível também que as agregações possam estar presentes como grãos dentro de matrizes granulares de solos saprolíticos. Connectors são conjuntos que agem como pontes (bridges) ou contrafortes (buttresses) entre grãos de dimensões de

silte e areia, usualmente compreendendo arranjos de argila elementares. Aqui também, alguns detalhes podem estar ocultos pela presença de sesquióxidos amorfos.

3- Nível composto (complexo) - Exatamente como os arranjos elementares se combinam para formar conjuntos de partículas, estes conjuntos individuais se combinam de várias maneiras para formar a microfabrica composta. O nível composto de organização da fabrica tem três facetas principais; a morfologia da microfabrica composta; a relativa abundância de formas individuais refletindo heterogeneidade da microfabrica; e em diferentes níveis de graus de anisotropia. As microfabricas compostas, normalmente esperadas para solos lateríticos e saprolíticos, são complexas e variadas na natureza.

O autor salienta as dificuldades na obtenção de amostras representativas de solos residuais tropicais, dada a não homogeneidade inerente a esses solos, sendo necessário, por esta razão, realizar uma descrição preliminar macroestrutural.

Nos solos argilosos as partículas geralmente se encontram sob a forma de grupos ou agregações, resultando grandes poros interagregados. As mudanças de volume nesses solos se devem essencialmente às mudanças de volume dos grandes poros existentes, enquanto que as mudanças de volume entre partículas dentro de um grupo ou agregação são relativamente insignificantes (VATSALA; MURTHY; HERKAL, 1998).

Palocci, Carvalho e Castro (1999) analisaram a microestrutura de solos empregados na construção da Barragem da UHE Corumbá, no centro-oeste do Brasil, na condição natural e compactada, com o uso do microscópio óptico, buscando estabelecer correlações entre a microestrutura e o comportamento geotécnico desses solos, quando compactados.

Rodrigues e Lollo (2004) desenvolveram um estudo para a avaliação da colapsibilidade de dois perfis de solo laterítico arenoso fino de Ilha Solteira com o uso de diferentes fluidos para a inundação das amostras. A caracterização da estrutura do solo e a identificação dos

óxidos e hidróxidos foram efetuadas através de microscópio eletrônico de varredura associado a um espectrômetro de energia dispersiva.

A microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura são técnicas que vêm sendo exploradas no meio geotécnico por alguns pesquisadores para os estudos de detalhe da microestrutura dos solos, se constituindo numa ferramenta muito importante para o entendimento do comportamento mecânico dos solos.

2.5.1.3 Análises mineralógicas

No estudo da estrutura dos solos colapsíveis, as análises mineralógicas podem ser empregadas para identificar os minerais presentes e auxiliar no entendimento da formação da estrutura do solo, bem como suas interações que podem interferir no processo do colapso.

As análises mineralógicas por difração de raios-X têm sido as mais comumente empregadas. Porém, para muitos solos, em função da presença de minerais ferruginosos, como é o caso dos solos tropicais, essas análises ficam prejudicadas, necessitando de estudos complementares para a sua adequada interpretação. Alguns pesquisadores já vêm incorporando estudos específicos da caracterização da mineralogia dos óxidos de ferro utilizando a espectroscopia Mössbauer associada a outras técnicas.

Alekseeva e Alekseev (1999) desenvolveram um estudo sobre os fatores que afetam a estabilidade estrutural de solos da China. As análises mostraram que, para um determinado tipo de solo estudado, o Latossolo, o papel dos minerais de óxidos de ferro presentes é o de agregação do que o de cimentação.

2.5.1.4 Ensaio de porosimetria

A distribuição espacial dos vazios do solo, que compreende a geometria dos poros e a maneira com que eles estão conectados (AL-MUKHTAR, 1995), é a responsável pela parcela da capilaridade, que controla o potencial matricial da água do solo, interferindo no seu comportamento (EDIL; MOTAN, 1984).

Assim, a obtenção da curva de distribuição de vazios é de particular interesse na determinação de propriedades do solo e no entendimento de diversas manifestações, como por exemplo, o colapso e a expansão (VILAR et al.,1995).

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, empregados com esta finalidade, são conduzidos injetando o mercúrio sob pressão dentro dos poros do solo seco. A pressão aplicada e o volume de mercúrio entremetido são monitorados continuamente durante o ensaio. As pressões aplicadas inicialmente são baixas, preenchendo os poros maiores, e na medida em que são aumentadas gradativamente, permitem o preenchimento dos poros menores. Os raios dos poros são estimados usando a equação de Young-Laplace. Esta técnica permite medir somente os poros interconectados com a superfície, devido ao bloqueio do mercúrio pelos poros fechados.

Cui, Delage e Alzoghbi (1998) observaram as mudanças na microestrutura, antes e após colapso, de um solo loéssico da França, através do uso de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e de microscópio eletrônico de varredura. As observações microscópicas mostraram que no estado natural os grãos pareciam limpos, as argilas representavam uma pequena porcentagem ($15\% < 2\mu$ m), formando placas agregadas. Existiam poucos poros interagregados, em consequência da pequena quantidade de argilas agregadas observadas. Como os recalques por colapso foram pequenos (2,3%), obtidos no ensaio edométrico, com tensão de inundação de 200 kPa, as imagens microscópicas obtidas não registraram grandes

diferenças, antes e após colapso. Os resultados mostraram que a redução do volume ocorreu devido ao colapso dos macroporos.

Collares (2002) analisando o comportamento colapsível de dois solos típicos do estado de São Paulo, também associou ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio com análises micromorfológicas por microscopia óptica e concluiu que as deformações por colapso resultam de uma redução do volume de macroporos.

2.5.2 Ensaios de Campo

Em virtude das dificuldades de amostragens de solos e da representatividade das condições de campo, diversos ensaios de campo têm sido empregados no estudo do comportamento dos solos colapsíveis. A realização de provas de carga, o uso do expansocolapsômetro, as sondagem de simples reconhecimento com SPT e os ensaios de penetração de cone elétrico CPT, com e sem inundação do solo, descritos a seguir, são alguns ensaios que tem permitido acompanhar e avaliar o comportamento dos solos não saturados metaestáveis.

2.5.2.1 Provas de carga

As provas de carga sobre placas e em estacas são executadas de maneira similar aos ensaios edométricos em laboratório, com e sem inundação, e permitem a quantificação dos recalques para diferentes profundidades do terreno, se constituindo atualmente num ensaio de campo muito utilizado.

Inicialmente, esses ensaios empregados para o estudo do comportamento de fundações em solos colapsíveis visavam a constatação ou não da ocorrência do colapso na carga admissível da fundação. Porém, a prática mostrou, posteriormente, que esta forma de condução dos ensaios *in situ* era inadequada para a verificação do comportamento colapsível dos solos. Tornou-se evidente que, além do solo atingir um grau de saturação mínimo (crítico) deve também estar submetido à uma carga mínima. Assim, "toda prova de carga que não houvesse ocorrência do colapso do solo deveria ser prosseguida para novos estágios de carga até atingir a carga de colapso. Da mesma forma, nos casos de ocorrência de colapso na carga admissível o ensaio deveria ser refeito com inundação em estágios inferiores à carga admissível para quantificar a carga de colapso" (CINTRA, 1998).

Cintra (1998) define a carga de colapso como sendo "a carga crítica que, aplicada pela fundação, deflagra o colapso em um solo colapsível suficientemente inundado".

Ferreira e Teixeira (1989) executaram ensaios de campo em placas de 0,40 X 0,40m e provas de carga em pequenas estacas escavadas em várias cidades do Pernambuco, para a verificação da colapsibilidade dos solos. Concluíram que o colapso do solo nas condições de campo é menor do que os observados em laboratório.

Agnelli (1992) estudou a colapsibilidade do solo da cidade de Bauru através de provas de carga sobre placas, adotando diferentes tensões iniciais de inundação. Os resultados mostraram um crescimento do recalque por colapso com o aumento da tensão de inundação.

Terzariol e Abbona (1999) executaram ensaios em placa em Córdoba – Argentina e concluíram que os recalques medidos são superiores aos estimados em função dos ensaios de laboratório.

Nadeo e Videla (1975) realizaram provas de carga em estacas escavadas na cidade de Córdoba, Argentina, na fase de projeto de um viaduto. O grau de colapsibilidade encontrado no campo foi muito inferior ao esperado com base em ensaios edométricos realizados no laboratório. Monteiro (1985) realizou provas de carga em estacas tipo broca, nos solos porosos das proximidades das Hidrelétricas de Ilha Solteira e Jupiá. O ensaio com inundação prévia do terreno, em volta das estacas, reduziu a capacidade de carga em 50%.

Fernandes e Cintra (1997) estudaram o efeito da inundação de um solo colapsível na capacidade de carga de grupos de estacas escavadas de pequeno diâmetro. Os resultados mostraram que a inundação do solo provocou uma redução na capacidade de carga de 25% a 42%, e que esta redução diminui com os aumentos da área de contorno das estacas, do número de estacas e da carga última do grupo obtida na umidade natural. Diante da comprovação de que os grupos de estacas também são afetados pela colapsibilidade do solo, os autores concluíram que são necessários estudos de fatores de segurança apropriados para fundações em solos colapsíveis.

Diversos registros históricos sobre o tema, com ênfase a trabalhos publicados sobre provas de carga estática podem ser encontrados em Cintra (2004).

2.5.2.2 Expansocolapsômetro

Ferreira (1993) e Ferreira e Lacerda (1993; 1995) desenvolveram e construíram um equipamento de campo que permite obter a curva carga-deslocamento e a partir desses resultados a relação tensão-deformação do solo, em diferentes profundidades, com controle da vazão de inundação. Assim, é possível realizar em campo ensaios similares aos edométricos simples e duplos de laboratório. O equipamento Expansocolapsômetro é composto de duas partes, uma semelhante a um ensaio de placa (diâmetro da placa 100 mm) e outra de controle da vazão de inundação. A principal vantagem desse equipamento é a possibilidade de executar o ensaio no campo, onde o estado original de tensões praticamente se mantém.

Segundo Ferreira e Lacerda (1993; 1995), os valores das deformações volumétricas específicas, medidos com o expansocolapsômetro, são em média 10% inferiores aos valores mínimos medidos em laboratório. A diferença está associada a não uniformidade da umidade e da pressão transmitida no campo, as quais reduzem com a profundidade.

Ferreira, Fucale e Amorim (1998) realizaram diversos ensaios edométricos simples e duplos em laboratório e ensaios de campo, em placa e com o uso do Expansocolapsômetro, em solos de alguns municípios do estado de Pernambuco. Concluíram que os valores dos potenciais de colapso medidos através de ensaios de campo são inferiores aos de laboratório em cerca de 20%.

2.5.2.3 Standard Penetration Test (SPT) e Cone Penetration Test (CPT)

As sondagens de simples reconhecimento do solo, com medidas do índice de resistência a penetração (SPT) e o ensaio de penetração de cone, realizados sem e com inundação do solo, podem auxiliar na avaliação da colapsibilidade do solo.

Ferreira *et al.* (1998) realizaram ensaios SPT em solos de alguns municípios do estado de Pernambuco. Concluíram que os valores do índice de resistência à penetração (SPT) altos ou baixos não indicam se o solo é ou não colapsível. Valores altos do SPT em solos colapsíveis estão associados à baixa umidade (w< 5%) ou altas sucções.

Camapum de Carvalho et al.(2001) analisaram a influência da sucção nos resultados de SPT e SPT-T em solos porosos colapsíveis do Distrito Federal, determinados em diferentes épocas do ano. As amostras foram coletadas indeformadas em poços e perturbadas no amostrador SPT, e a sucção foi determinada utilizando a técnica do papel filtro. Os resultados mostram que o SPT depende da sucção, mas o SPT-T é menos afetado por ela, embora seja influenciado pela umidade do solo. Esse comportamento se justifica pelo fato dos valores serem afetados pelo estado do solo no momento do ensaio, isto é, o SPT é realizado sobre amostra intacta, enquanto que o SPT-T é realizado sobre amostra rompida. Diante disso, os autores ressaltam a importância de se levar em conta os aspectos relativos à morfologia no estudo do comportamento dos solos tropicais.

2.6 IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS

Vários critérios têm sido propostos com o objetivo de qualificar ou quantificar a colapsibilidade de um solo, fundamentados em resultados de diferentes tipos de ensaios de laboratório ou de campo.

Ressalta-se que esses critérios nem sempre se aplicam a todos os tipos de solos, já que na maioria das vezes foram desenvolvidos e estabelecidos para determinadas ocorrências de solos ou locais específicos.

2.6.1 Critérios Baseados em Índices Físicos e Limites de Atterberg

Para possibilitar uma melhor visualização e com o intuito de facilitar a comparação entre alguns critérios estabelecidos por diversos autores, optou-se por agrupá-los na forma de tabela.

A Tabela 2.1 apresenta o autor do critério, as expressões propostas, o critério empregado para qualificar a colapsibilidade de um solo e a referência bibliográfica.

O critério de Gibbs e Bara (1962) foi utilizado na identificação da subsidência de solos para a construção do Canal San Luis, no Vale de San Joaquim, na California. Este critério se baseia no seguinte conceito: se um solo apresenta um volume de vazios maior do que o necessário para conter o volume de água correspondente ao teor de umidade no limite de
liquidez, ao saturar ele não mais apresentará plasticidade e nem resistência, sendo, portanto, susceptível ao colapso (Gibbs e Bara, 1967).

AUTOR	EXPRESSÃO	CRITÉRIOS CONSIDERADOS PARA OS SOLOS	FONTE DE REFERÊNCIA
DENISOV (1951)	$K = \frac{e_L}{e_O}$	$0,5 < K < 0,75 \rightarrow$ muito colapsíveis $k = 1,0 \rightarrow$ margas não colapsíveis $1,5 < k < 2,0 \rightarrow$ não colapsíveis	FEDA (1966)
PRIKLONSKIJ (1952)	$K = \frac{W_{L} - W_{O}}{W_{L} - W_{P}}$	K < 0 → altamente colapsíveis K > 0,5 → não colapsíveis K > 1,0 → expansivos	FEDA (1966)
Código de Obras da URSS (1962)	$K = \frac{e_{\rm O} - e_{\rm L}}{1 + e_{\rm O}}$	Válido para solos com $S_r \le 60\%$ $K \ge -0,1 \rightarrow colapsíveis$	FEDA (1966)
GIBBS e BARA (1962)	$K = \frac{W_{sat}}{W_{L}}$	$K > 1 \rightarrow colapsíveis$	KNODEL (1981)
FEDA (1966)	$K = \frac{\begin{pmatrix} w_0 \\ S_{r0} \end{pmatrix} - w_p}{w_L - w_p}$	Solos com Sr < 1 (\cong 60%) K > 0,85 \rightarrow colapsíveis	FEDA (1966)
KASSIF e HENKIN (1967)	$K = \gamma_d \times w_O$	K < 15 → colapsíveis	ARMAN e THORNTON (1973)

Tabela 2.1 - Critérios Baseados em Índices Físicos e Limites de Atterberg

Nas expressões contidas na Tabela 2.1, tem-se:

- K = coeficiente de colapso ou subsidência;
- e_L = índice de vazios necessário para conter a umidade correspondente ao limite de liquidez;
- $e_o =$ índice de vazios natural;
- w_L = limite de liquidez;
- w_P = limite de plasticidade;
- w_o = teor de umidade natural;
- w_{sat} = teor de umidade para completa saturação do solo;
- $Sr_o =$ grau de saturação natural e
- γ_d = peso específico seco do solo.

2.6.2 Critérios Baseados em Ensaios Edométricos

São estabelecidos com base em ensaios edométricos simples ou duplos. Como nesses ensaios se empregam amostras indeformadas, são mais apropriados para quantificar o colapso e o grau de colapsibilidade, pois levam em consideração a estrutura, o teor de umidade natural do solo e a tensão de inundação.

2.6.2.1 Critério de Jennings e Knight (1957)

Jennings e Knight (1957) propuseram o ensaio edométrico duplo como um método alternativo para a previsão do potencial de colapso de um solo. A diferença entre as curvas de compressão, Figura 2.18, quantifica a deformação por colapso que ocorrerá para qualquer nível de tensão, caso o solo se torne saturado.



Pressão aplicada - σ_v (log)

Figura 2.18 – Obtenção do colapso no ensaio edométrico duplo (JENNINGS; KNIGHT, 1957)

O potencial de colapso é obtido por:

$$CP = \frac{\Delta e}{1 + e_i}$$
(2.1)

onde:

CP = potencial de colapso;

 Δe = variação do índice de vazios para um mesmo nível de tensão; e

 e_i = índice de vazios, antes da inundação, correspondente ao mesmo nível de tensão.

2.6.2.2 Critério de Knight (1963)

Knight apud Lutenegger e Saber (1988) recomenda o emprego do ensaio edométrico simples, utilizando uma tensão de inundação de 200 kPa, como mostra a Figura 2.19, para a obtenção do potencial de colapso.



Figura 2.19 – Obtenção do colapso no ensaio edométrico simples (KNIGHT, 1963 apud LUTENEGGER; SABER, 1988)

O potencial de colapso é definido como:

$$CP = \underline{\Delta e}$$
(2.2)

onde:

CP = potencial de colapso;

 Δe = variação do índice de vazios sob inundação e

 e_i = índice de vazios do solo no início da inundação.

Jennings e Knight (1975) fornecem a Tabela 2.2 para classificar a colapsibilidade, quanto à sua gravidade, nas obras de engenharia.

CP (%)	GRAVIDADE DO PROBLEMA		
0-1	Nenhum		
1-5	Moderado		
5-10	Problemático		
10-20	Grave		
>20	Muito grave		

Tabela 2.2 - Classificação da Colapsibilidade nas Obras de Engenharia (Jennings e Knight, 1975)

Vargas (1977) considera como colapsíveis os solos que resultarem um coeficiente de colapso estrutural superior a 2%, independente da tensão de inundação.

2.6.2.3 Critério de Lutenegger e Saber (1988)

Lutenegger e Saber (1988) sugerem a obtenção do potencial de colapso utilizando os resultados obtidos no ensaio edométrico simples, com a amostra inundada à uma tensão de 300kPa com água destilada. Outros tipos de fluido ou outros níveis de tensão, mais apropriados para a situação, podem ser empregados. O potencial de colapso é definido como:

$$I = \frac{\Delta e}{1 + e_i}$$
(2.3)

onde:

I = potencial de colapso;

 $\Delta e = variação do índice de vazios resultante da inundação; e$

 e_i = índice de vazios do solo antes da inundação.

O grau aproximado da gravidade do potencial de colapso pode ser obtido comparando os resultados da equação 2.3 com a Tabela 2.3.

I (%)	GRAU DE SUCEPTIBILIDADE AO COLAPSO		
2	Leve		
6	Moderado		
10	Elevado		

Tabela 2.3 – Grau de Gravidade do Colapso Lutenegger e Saber (1988)

2.6.2.4 Critério de Reginatto e Ferrero (1973)

Reginatto e Ferrero (1973) definiram o coeficiente de colapsibilidade de um solo, a partir de ensaios edométricos duplos, como:

$$C = \frac{\sigma_{\rm vps} - \sigma_{\rm vo}}{\sigma_{\rm vpn} - \sigma_{\rm vo}}$$
(2.4)

onde:

 σ_{vo} = tensão vertical devido ao peso próprio do solo no campo;

 σ_{vpn} = tensão de fluência do solo na umidade natural; e

 σ_{vps} = tensão de fluência do solo inundado.

As tensões de fluência são determinadas da mesma forma que a tensão de préadensamento, pelo método de Casagrande.

Com base no coeficiente C, o solo pode ser classificado como:

a) Verdadeiramente colapsível: quando $\sigma_{vps} < \sigma_{vo}$ e C < 0.

O solo sofre colapso sem carregamento externo.

b) Condicionado ao colapso: quando $\sigma_{vps} > \sigma_{vo} e 0 < C < 1$.

A ocorrência do colapso depende do nível de tensão induzido pelo carregamento externo. Se:

b.1) $\sigma_v < \sigma_{vps}$, não ocorre colapso com a inundação do solo.

b.2) $\sigma_{vps} < \sigma_v < \sigma_{vpn}$, ocorre colapso quando o solo for inundado após carregamento

b.3) $\sigma_v > \sigma_{vpn}$, ocorre colapso mesmo sem inundação

c) Não colapsível: quando $\sigma_{vps} = \sigma_{vpn} e C = 1$

2.6.3 Critério de Basma e Tuncer (1992)

Basma e Tuncer (1992) propuseram as equações 2.5 e 2.6 para avaliar o potencial de colapso de um solo, aplicando análise de regressão múltipla em resultados obtidos em um trabalho experimental, realizados em laboratório, com oito tipos de solos que exibiram colapso.

$$CP = 48,496 + 0,102 C_u - 0,457 w_i - 3,533 \gamma_d + 2,80 \ln(p_w)....(2.5)$$

 $CP = 47,506 - 0,072 (S - C) - 0,439 w_i - 3,123 \gamma_d + 2,851 \ln(p_w).....(2.6)$ onde:

CP = potencial de colapso, em porcentagem;

C_u = coeficiente de uniformidade do solo;

 w_i = teor de umidade inicial, em porcentagem;

 γ_d = peso específico seco, em kN/m³;

- p_w = tensão de umedecimento;
- (S C) = diferença entre areia e argila, em porcentagem.

Para verificar a validade das equações propostas, diversos dados experimentais de campo (HOUSTON; HOUSTON; SPADOLA, 1988), de laboratório (LAWTON; FRAGASZY; HARDCASTLE, 1989) e de outros pesquisadores, obtidos *in situ*, foram testados, comprovando boa concordância entre os valores previstos e os observados.

Os autores acreditam que estas equações para previsão do potencial de colapso de um solo se constituem numa valiosa ferramenta de projeto para casos de pequenas estruturas, onde as investigações de laboratório normalmente não são realizadas. Com base num guia proposto por Jennings e Knight (1975) para julgar a severidade do potencial de colapso de um solo, juntamente com a equação 2.2 proposta, elaboraram também um gráfico, Figura 2.20, para a estimativa do grau de colapsibilidade de um solo.



Figura 2.20 – Estimativa do grau de colapsibilidade (BASMA; TUNCER, 1992)

2.6.4 Critério Baseado em Ensaio de Campo

Reznik (1989) propôs uma expressão, que relaciona os resultados de ensaios CPT (Cone Penetration Test), para a determinação do coeficiente de colapso do solo.

$$K_{\rm w} = \frac{P_{\rm q}}{P_{\rm qw}}$$
(2.7)

onde:

 K_w = coeficiente de colapso;

 P_q = resistência à penetração do cone no solo na umidade natural e

 $P_{\rm qw}$ = resistência à penetração do cone no solo inundado

A Tabela 2.4 apresenta os valores do coeficiente de colapso, dependendo da carga aplicada, para que um solo seja considerado colapsível.

CARGA APLICADA (kPa)	K_{w}	IDENTIFICAÇÃO
100	> 2,0	Colapsível
200	> 1,5	Colapsível
300	> 1,3	Colapsível

Tabela 2.4 - Coeficiente de Colapso (REZNIK, 1989)

Apesar da existência de inúmeros critérios disponíveis para a identificação de solos colapsíveis, em determinadas situações o seu reconhecimento é muito difícil e nem sempre conduzem à resultados confiáveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo do colapso de três perfis de solos típicos do norte do Paraná foram empregadas diversas metodologias envolvendo ensaios de campo e laboratório.

Os trabalhos de campo se constituíram da execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos com medidas do índice de resistência à penetração dinâmica (SPT), ensaios de penetração de cone elétrico (CPT) e abertura de poços e trincheiras com retirada de amostras deformadas e indeformadas.

Em laboratório as amostras de solos foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica e edométricos simples e duplos para a avaliação da colapsibilidade.

Para a identificação e caracterização da estrutura do solo natural e suas mudanças associadas aos mecanismos de colapso, recorreu-se a métodos e técnicas micromorfológicas realizadas em lâminas delgadas de solos com o auxílio de lupa binocular e microscópio óptico petrográfico.

As análises mineralógicas por difração de raios-X e espectroscopia Mössbauer foram empregadas para a caracterização dos materiais, em particular da fase argilosa, tendo em vista a sua influência no comportamento e arranjo microestrutural do solo.

Ensaios de porosimetria permitiram a determinação do volume, tipos e tamanhos de poros presentes nas amostras de solo indeformado e suas transformações ocasionadas pelo efeito dos carregamentos e inundação (antes e após colapso).

A avaliação da colapsibilidade e a caracterização mineralógica dos solos, juntamente com as observações micromorfológicas e os ensaios de porosimetria realizados a partir do seu estado natural e suas modificações ocasionadas pelo efeito combinado do umedecimento e carregamentos, auxiliaram nas análises da evolução da microestrutura e no entendimento da dinâmica do colapso.

3.1 SELEÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

Os trabalhos preliminares se constituíram de levantamento dos solos no campo, através de cortes ao longo de rodovias e, eventualmente, em trincheiras, buscando a seleção de três perfis distintos e representativos dos solos do Paraná e de ocorrência no território nacional, sob o ponto de vista pedológico.

Após a conclusão dos trabalhos, foram definidas duas áreas de estudo na cidade de Maringá, PR, constituídas por solos de textura argilosa, e denominados como Latossolo Vermelho distroférrico e Nitossolo Vermelho eutroférrico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). A terceira área de estudo, constituída por solo de textura média, designado como Latossolo Vermelho distrófico, está situada na área de ocorrência do Arenito Caiuá, no Distrito de Iguatemi, também pertencente ao município de Maringá.

Os Latossolos são considerados como os solos mais importantes do Brasil do ponto de vista da representação geográfica, recobrindo aproximadamente 50% do território nacional. Ocorrem em praticamente todas as regiões bioclimáticas do país, sobre diferentes tipos de rochas (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2000). Podem apresentar texturas variadas, desde média (< 35% de argila), argilosa (> 35% de argila) a muito argilosa (> 60% de argila).

No Paraná, os Latossolos ocupam cerca de 30% do território e apresentam tanto textura predominantemente média (areia argilosa), oriundos do Arenito Caiuá (região noroeste), quanto argilosa a muito argilosa provenientes de rochas vulcânicas (região norte).

Portanto, nesta pesquisa os materiais correspondem às situações extremas: textura areno-argilosa e textura muito argilosa.

Para cada área de estudo selecionada procederam-se aos trabalhos detalhados de campo e de laboratório, conforme descritos nos itens a seguir.

3.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

Para cada área, foram executadas três sondagens de simples reconhecimento dos solos, com determinação dos índices de resistência à penetração dinâmica N_{SPT}, em conformidade com os procedimentos normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 6484/80.

Os ensaios de penetração do cone elétrico (CPT) foram executados, de acordo com a NBR 12069/91, apenas para a área de estudo do Perfil I. Em função da disponibilidade do equipamento e também pela dificuldade de acesso devido às condições climáticas por ocasião da realização dos ensaios, não foi possível realizá-los nas outras duas áreas.

A abertura de trincheiras, de dimensões aproximadas de (2,0x2,5) m² e 2,5 m de profundidade, ou corte permitiram a identificação e descrição morfológica de cada perfil de solo, de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (LEMOS; SANTOS, 1984).

As investigações de campo possibilitaram a coleta de amostras com a finalidade de caracterizar os materiais constituintes do perfil a cada metro perfurado, e de melhor definir as

profundidades de coleta das amostras deformadas e indeformadas para a realização dos ensaios e análises de laboratório.

Os trabalhos de campo foram realizados fazendo-se uso dos equipamentos existentes na Universidade Estadual de Maringá (UEM), com exceção do CPT que foi executado pela Empresa Solo Sondagem. A Figura 3.1 mostra os equipamentos em operação na área de estudo representada pelo Perfil I.





Figura 3.1 - Equipamentos: a) SPT; b) CPT, em operação na área de estudo - Perfil I

3.3 AMOSTRAGENS

As amostras deformadas e indeformadas foram coletadas em corte, trincheiras ou poços de inspeção com diâmetro mínimo de 1,0 m, em diferentes profundidades dos perfis, até atingir o solo de alteração, seguindo-se os procedimentos recomendados pela NBR 9604/86 da ABNT.

Para cada perfil de solo foram retiradas duas amostras indeformadas do tipo bloco (Figura 3.2), com dimensões de (30x30x30) cm³, e uma amostra deformada a cada profundidade de interesse. Os pontos de coleta não obedeceram a mesma distância vertical entre eles, pois foram estipulados de acordo com os resultados dos trabalhos de investigação de campo. Ao todo foram retiradas amostras de sete profundidades diferentes para o Perfil I, três profundidades para o Perfil II e cinco profundidades para o Perfil III.



Figura 3.2 - Retirada de amostras (blocos) na área de estudo - Perfil III.

As identificações das amostras (blocos) e as respectivas posições de coleta nos perfis podem ser visualizadas na Tabela 3.1.

As amostras indeformadas se destinaram à realização de ensaios edométricos (simples e duplos), análises micromorfológicas, análises mineralógicas e porosimetria, enquanto que as amostras deformadas foram utilizadas na realização dos ensaios de caracterização geotécnica.

Dorfil	Denominação	Horizonte	Identificação da	Profundidade	Profundidade
I CI III	Pedológica	Horizonic	amostra (bloco)	de coleta (m)	média (m)
		BA	LV ₁	035-065	0.50
			LV ₂	0,55 0,05	0,00
		Bw	LV ₃	1 45 - 1 75	1 60
			LV ₄	1,10 1,70	1,00
			LV ₅	3 05 - 3 35	3,20
	LATOSSOLO		LV ₆	2,00 2,00	
Ι	VERMELHO		LV_7	4 55 - 4 85	4 70
-	distroférrico		LV_8	.,	.,
	(textura argnosa)		LV9	6,10 - 6,40	6,25
			LV ₁₀	-, -, -, -	- , -
			LV ₁₁	7,65 - 7,95	7,80
			LV ₁₂	, ,	,
			LV ₁₃	9.10 - 9.40	9,25
			LV ₁₄		- ,
	NITOSSOLO VERMELHO eutroférrico	AB	NV ₁	0,35 - 0,65	0,50
			NV ₂		
II		Bt	NV ₃	1,00 - 1,30	1,15
			NV ₄		
		Bw	NV ₅	2,00 - 2,30	2,15
			NV ₆		
	LATOSSOLO VERMELHO distrófico (textura média)	Bw		0,50 - 0,80	0,65
III					1,45
			LVd ₃	1,30 - 1,60	
			LVd ₄		
			LVd ₅	5,00 - 5,30	5,15
			LVd ₆		
			LVd ₇	9,20 - 9,50	9,35
		С	LVd ₈		14,15
			LVd ₉	14,00 - 14,30	
			LVd_{10}	, , ,	

Tabela 3.1 – Identificação das amostras estudadas

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização dos materiais coletados nas diferentes profundidades foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil (DEC/UEM), de acordo com as metodologias propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

•	Determinação do teor de umidade	NBR 6457/86
•	Determinação da massa específica dos grãos	NBR 6508/84
•	Análise granulométrica conjunta (peneiramento e sedimentação	o), com uso de
	solução defloculante de hexametafosfato de sódio	NBR 7181/84
•	Determinação do Limite de Liquidez	NBR 6459/84
•	Determinação do Limite de Plasticidade	NBR 7180/84

Os demais índices físicos foram determinados utilizando-se os corpos de prova indeformados, talhados em anéis metálicos, empregados nos ensaios edométricos.

3.5 ENSAIOS EDOMÉTRICOS

Os ensaios edométricos foram conduzidos em equipamentos (conjuntos sistema de aplicação de carga - célula de adensamento), Figura 3.3, no Laboratório de Mecânica dos Solos (DEC/UEM), para todos os níveis dos perfis, de duas maneiras: ensaios duplos e ensaios simples.

Nos ensaios edométricos duplos, dois corpos de prova talhados de uma mesma amostra (bloco), com características similares, foram ensaiados concomitantemente até a tensão de

800 kPa ou 1600 kPa, sendo um no teor de umidade natural e o outro inundado desde o início do ensaio, isto é, após a aplicação de uma tensão de assentamento de 1,25 kPa.



Figura 3.3 – Conjunto de aplicação de carga e célula edométrica recoberta com filme plástico.

Nos ensaios edométricos simples, cada corpo de prova foi ensaiado segundo a NBR 12007/90 da ABNT até atingir uma determinada tensão de interesse. Na seqüência, procedeuse à inundação, medindo-se as deformações adicionais (colapso) até a sua completa estabilização e prosseguindo-se o ensaio para outros carregamentos, com o corpo de prova inundado.

Os estágios de tensão e de inundação adotados foram de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, com a finalidade de obter os coeficientes de colapso estrutural e a faixa de tensão que provocaria recalques adicionais considerados significativos (colapsos).

Ao final de cada ensaio procedeu-se ao descarregamento do corpo de prova, com pelo menos três estágios de descarregamento.

Para cada amostra inicialmente foi realizado o ensaio edométrico duplo, com tempos maiores de observação da evolução e estabilização das deformações, visando estabelecer uma rotina de trabalho e redução dos tempos para os ensaios subseqüentes (ensaios simples). Desta forma, foi possível uma redução significativa principalmente para baixas tensões aplicadas. Todavia, para todos os ensaios com inundação, independente do nível de carregamento, o tempo de espera para prosseguimento dos ensaios após inundação foi de no mínimo 12 horas.

As calibrações dos diferentes conjuntos célula de adensamento – sistema de aplicação de carga foram feitas antes de cada ensaio edométrico realizado, a fim de obter as deformações dos conjuntos.

Para manter inalteradas as condições de umidade dos corpos de prova ensaiados sem inundação ou até o momento da inundação, as células que os continham foram envolvidas com filme transparente de PVC, antes do início dos ensaios.

Para os três perfis de solos foram executados 161 ensaios edométricos, sendo 122 ensaios para a avaliação da colapsibilidade (alguns também foram utilizados para a obtenção de corpos de prova para a confecção de lâminas delgadas e ensaios de porosimetria) e 39 ensaios realizados exclusivamente para a confecção de lâminas delgadas (análises micromorfológicas) e ensaios de porosimetria.

3.6 ANÁLISES MICROMORFOLÓGICAS

As análises micromorfológicas permitiram observar o material natural e suas alterações ao longo do perfil e estabelecer alguns padrões de estrutura. Possibilitaram ainda acompanhar a evolução da microestrutura do solo (modificação da porosidade, das formas dos agregados e das suas relações, desenvolvimento de orientações e fissuras, etc.) em função dos diferentes carregamentos e condições de saturação (antes e após colapso).

Este estudo foi realizado sobre lâminas delgadas, obtidas a partir de materiais dos corpos de prova, impregnados com resina acrílica.

As amostras foram obtidas dos corpos de prova indeformados e de corpos de prova ensaiados em edômetros para avaliação da colapsibilidade. Além desses, procedeu-se à realização de nova série de ensaios edométricos realizados especificamente para atender a essa finalidade. Esses últimos foram conduzidos até o momento de interesse, quando então foram interrompidos para a preparação das amostras, confecção de lâminas e análises micromorfológicas. O momento de paralisação, antes ou após colapso, em uma determinada carga, foi definido com base nas análises de resultados dos ensaios edométricos realizados anteriormente.

Para a obtenção de lâminas delgadas, dada a natureza dos materiais, as amostras foram endurecidas através de impregnação com resina acrílica no Laboratório de Mecânica dos Solos (DEC/UEM). Ao todo, foram impregnados 82 corpos de prova.

A técnica de preparação para a impregnação do material prevê uma secagem prévia do material. Tanto no caso das amostras de solos indeformadas como nos corpos de prova ensaiados em edômetros, a fim de se evitar modificações bruscas e importantes na estrutura dos solos amostrados, devido às variações de umidade e temperatura, procedeu-se inicialmente a uma secagem ao ar e posterior secagem em estufa a 40° C, como é recomendado.

Após o resfriamento das amostras, à temperatura ambiente, a impregnação foi feita em dessecador, a vácuo, com adição de resina em pequenas quantidades (Figura 3.4). Para que fosse possível a penetração da resina nos vazios do solo pelo efeito da capilaridade e posterior

endurecimento, a mesma foi diluída na proporção de 30 ml de acetona P.A. e 10 ml de endurecedor para cada 100 ml de resina epóxi.





Figura 3.4 – a) Impregnação de amostras em dessecador, a vácuo; b) amostras endurecidas após impregnação com resina

Depois de endurecidas, as amostras foram cortadas em fatias, em seções verticais (mesma direção da aplicação das tensões verticais de campo ou de ensaio) e horizontais (perpendicular à direção da aplicação das tensões), cujas superfícies a serem laminadas foram reimpregnadas. A técnica de impregnação se baseou na proposta de Verbeke (1969).

As lâminas delgadas (sem recobrimento por lamínula) foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP).

As análises micromorfológicas para os três perfis foram realizadas sobre 140 lâminas delgadas de solos no Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Maringá (UEM) e no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

As observações foram realizadas em diversas escalas – da macro à microscópica – com o auxílio de lupa binocular e microscópio óptico petrográfico (luz natural e luz polarizada). Iniciaram-se as observações com pequenos aumentos (18X, 25X e eventualmente 50X), em lupa binocular, objetivando o reconhecimento das formas de organização existentes e do seu

papel no conjunto (predominância). Na seqüência, as análises foram realizadas com aumentos crescentes (60X a 240X), em microscópio óptico petrográfico, visando obter informações sobre a organização da fase argilosa (plasma) e das suas relações com os grãos maiores e, ainda, a porosidade (tipo e forma dos vazios), no interior de determinadas zonas (sítios - identificados na etapa anterior).

Nos estudos micromorfológicos foram adotados os critérios e terminologia (em anexo), propostos principalmente por Brewer (1976) e eventualmente por Stoops e Jongerius (1975).

3.7 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica visa à identificação dos minerais presentes, com o intuito de observar as mudanças dos constituintes ao longo dos perfis e sua influência na formação da estrutura e no processo do colapso.

Apesar dos solos serem, em geral, constituídos por diferentes frações granulométricas, as fases minerais neoformadas que os constituem são finamente divididas, mal cristalizadas e intimamente misturadas, o que dificulta sobremaneira sua caracterização através de observação direta por microscopia óptica. Esse efeito é bastante importante nos solos tropicais argilosos onde a fração argila predomina largamente sobre as demais.

Assim, para a caracterização desses minerais faz-se necessário o uso de métodos específicos, dos quais o mais utilizado é a difração de raios X (DRX). No entanto, os difratogramas de materiais ferruginosos geralmente apresentam "*background*" intenso devido à fluorescência secundária do ferro e, além disso, os minerais constituintes do solo apresentam baixa cristalinidade, dificultando sua interpretação. Há, ainda, uma grande dificuldade em separar as fases minerais para estudos de detalhe.

Para complementar os estudos de DRX, a espectroscopia Mössbauer vem sendo utilizada, especificamente no tocante aos minerais ferruginosos, devido às vantagens que oferece, uma vez que independe da cristalinidade do material analisado para gerar bons espectros. A análise dos espectros permite a identificação mineralógica mais precisa, com quantificação de fases, identificação de populações de diferentes cristalinidades de um mesmo mineral, estudo de substituição do ferro por outros metais, etc.

Difração de Raios X

A difração de raios X é uma das principais ferramentas para a caracterização de materiais policristalinos, mediante a comparação com padrões armazenados em banco de dados (ICDD - *International Centre for Diffraction Data*) e, sua aplicação, é essencial ao estudo de substâncias sólidas.

A DRX baseia-se na dispersão de um feixe de raios X pelos átomos que constituem a rede cristalina dos minerais. As posições e intensidades relativas dos picos de Bragg permitem identificar a estrutura, quantificar a(s) fase(s) cristalina(s) presente(s) e a composição, enquanto que, a largura dos picos permite a determinação do tamanho dos cristalitos e das distorções na rede cristalina (BRINDLEY; BROWN, 1980).

As amostras foram analisadas no Laboratório de Raios X do Instituto de Física de São Carlos/USP, com um difratômetro Rigaku Geigerflex, equipado com tubo selado de cobre, com as seguintes condições: potência de 40 kV, intensidade de corrente elétrica de 40 mA; passo de $0,02^{\circ}/2\theta$ e contagem de 1 segundo/passo.

As amostras analisadas foram coletadas em diferentes profundidades dos perfis, nas camadas de solo evoluído e saprolito provenientes dos blocos indeformados e dos materiais coletados no amostrador durante o ensaio SPT. Após secagem prévia a temperatura ambiente, as amostras foram destorroadas em almofariz de ágata e passadas na peneira Nº 100 (abertura 0,149 mm) para serem analisadas em forma de pó. Separações de fases específicas foram efetuadas com auxílio de lupa binocular, seguindo-se o mesmo procedimento.

As amostras foram, então, montadas em porta-amostras de modo a evitar a orientação preferencial dos grãos. A varredura foi de 5 a 80°/20 para a maioria dos difratogramas e, para as amostras nas quais havia suspeita de presença de esmectita, foi feita nova aquisição, dessa vez em amostra orientada, com varredura entre 2 e 30°/20. Esse procedimento é necessário para evitar erros de interpretação, uma vez que o pico principal dos minerais do grupo das esmectitas (geralmente largo, semelhante a uma banda) ocorre a baixo ângulo, região onde podem aparecer bandas artificiais criadas pelo equipamento. A comparação com os padrões do ICDD para interpretação dos difratogramas foi efetuada com auxílio do software DIFFRACplus (SIEMENS).

Foram realizadas 20 análises do Perfil I em amostras de até 16,30 m de profundidade; 8 análises do Perfil II em amostras de até 8,50 m e 5 análises do Perfil III, em amostras de até 14,15 m, obtendo-se um total de 33 difratogramas.

Espectroscopia Mössbauer

Esse método tem como princípio a emissão e a absorção sem recuo de raios γ pelos núcleos atômicos, em conseqüência de transições nucleares. A espectroscopia do ferro é a mais amplamente desenvolvida, e utiliza o núcleo estável ⁵⁷Fe, cuja fonte radioativa é o ⁵⁷Co. É possível obterem-se informações indiretas sobre o ambiente local dos núcleos investigados. Permite verificar a existência de Fe²⁺ e Fe³⁺, sua proporção relativa, distinção Fe^{IV} e Fe^{VI} e, eventualmente, a distribuição do Fe^{VI} nos diferentes sítios octaédricos, bem como a presença de substituições (HAWTHORNE, 1988).

As informações contidas em um espectro Mössbauer estão ligadas às modificações de energia dos níveis nucleares (estado fundamental e excitado) sob a influência de campos elétricos e/ou magnéticos. As interações entre o núcleo e seu ambiente eletrônico (elétrons dos átomos de ferro e dos ligantes vizinhos) fornecem os seguintes parâmetros, os quais podem ser extraídos do espectro:

 deslocamento isomérico (δ ou IS), que é sensível à valência do elemento e à natureza das ligações químicas com os ligantes vizinhos;

 - interação quadripolar (ΔEq ou QS), que é sensível à natureza dos íons que rodeiam o núcleo ativo;

- interação magnética (B_{hf}), que aparece quando o núcleo sonda é submetido a um campo magnético de origem interna ou aplicada. Neste caso seis raias são observadas no espectro. Quando não há componente magnético, apenas uma raia simples ou um dubleto comporá o espectro.

O padrão de um espectro Mössbauer depende de temperatura da fonte e da amostra, da calibração de referência e do método de ajuste. Portanto, os resultados dos diferentes espectros nem sempre podem ser diretamente comparados.

Os estudos complementares de detalhe da caracterização mineralógica com o uso de espectrômetro Mössbauer foram realizados no Laboratório de Espectroscopia Mössbauer (LEM) do Departamento de Física da UEM.

As medidas foram obtidas utilizando-se as mesmas amostras (Perfis I e II) descritas no item anterior. Porções das amostras que contivessem quantidades adequadas de ferro (espessura de cerca de 10 mg/cm² de Fe) foram encapsuladas em porta-amostras de poliuretano e os espectros foram adquiridos até que a contagem do *background* atingisse pelo menos 10⁵, correspondendo a aproximadamente 12 horas de medida. Os deslocamentos isoméricos foram calculados referindo-se ao Fe metálico.

Para minimizar os efeitos de relaxação magnética devido ao pequeno tamanho das partículas dos óxidos de ferro, foram selecionadas amostras para medidas à baixa temperatura (80 K), usando criostato de Nitrogênio líquido.

A espectroscopia Mössbauer foi utilizada apenas em amostras dos Perfis I e II, nos quais a questão relativa à caracterização das fases ferruginosas era mais importante para a compreensão da estruturação desses solos. No total, foram realizadas 15 medidas, sendo 12 medidas à temperatura ambiente e 3 medidas à baixa temperatura.

3.8 ENSAIOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Na determinação das curvas de distribuição de poros foi empregado o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio utilizando-se o POROSIZER 9320 da *Micromeritics Instrument Corporation*, com capacidade máxima de aplicação de pressão de 30000 psi e com controle automático de pressão.

As análises, em um total de 33 ensaios, foram realizadas no Instituto de Física de São Carlos (USP) sobre as amostras coletadas nos diferentes perfis, nas condições indeformadas e ensaiadas em edômetros (antes e após colapso).

As amostras, nas devidas condições de interesse (natural ou ensaiada), foram talhadas em forma de cubo, com dimensões aproximadas de (1,5x1,5x1,5) cm³ e em seguida expostas ao ar para secagem à temperatura ambiente.

O ensaio é normalmente realizado com o auxílio de um recipiente de volume conhecido denominado penetrômetro para conter a amostra (seca) a ser analisada.

Inicialmente coloca-se o mercúrio circundando a amostra no penetrômetro, sem a aplicação de pressão. Desta forma, o mercúrio não consegue penetrar nos vazios do solo,

sendo possível determinar o volume da amostra pela diferença entre os volumes do penetrômetro e daquele ocupado pelo mercúrio.

Conhecendo-se a massa da amostra seca obtém-se a massa específica aparente seca da amostra. Em seguida, o mercúrio é intrudido nos vazios do solo sob pressão. Inicialmente essas pressões são baixas, preenchendo os poros maiores, e à medida que são aumentadas, gradativamente, permitem o preenchimento dos poros menores.

Pelas diferenças de massa, e sabendo a massa específica do mercúrio, é obtido o volume de mercúrio que penetra nos poros da amostra para cada pressão aplicada. O volume total de mercúrio intrudido, que corresponde à máxima pressão aplicada, é admitido como igual ao volume total de vazios da amostra de solo.

O volume de sólidos é alcançado pela diferença entre o volume total e o volume de vazios e, conseqüentemente a massa específica dos sólidos. Finalmente a porosidade do solo é calculada quando se conhece as massas específicas dos sólidos e do solo seco.

Em se tratando de solo, acompanhando o método de cálculo empregado, a porosidade obtida é, na maioria das vezes, menor do que a porosidade real. O fato é que o volume total de poros preenchidos pelo mercúrio (V) é, em geral, menor do que o volume de vazios real do solo (V_v), devido à presença de poros inacessíveis (geralmente os cavitários) ou daqueles ocupados pela água adsorvida principalmente nos minerais argílicos. Assim, haverá também uma tendência de se obter um menor peso específico das partículas em relação àquele obtido, por exemplo, pelo método do picnômetro. Isso pôde ser constatado nesta pesquisa, como se observa no capítulo a seguir.

Da mesma forma, através de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, é possível obter basicamente duas curvas. As curvas de distribuição diferencial (histogramas de freqüência) e porcentagens em relação ao volume de vazios total da amostra *versus* diâmetro

dos poros, representados somente pelos vazios acessíveis ao mercúrio, isto é, considerando apenas a porosidade efetiva.

A curva de distribuição diferencial permite que se observem os intervalos de diâmetros de poros que aparecem com mais freqüência na estrutura do solo.

Na classificação dos tamanhos dos poros parece não haver consenso na literatura quanto aos intervalos de medidas. Por um lado, existem classificações que se destinam apenas à análise de partículas finas (fração argila), como a de Webb e Orr (1997), enquanto que outras levam em conta a estrutura do material, com base na Física dos Solos, como as propostas por Jongerius⁶ apud Brewer (1976), Brewer (1976) e Musy e Soutter (1991), apresentadas na Tabela 3.2.

Propoponto	Classificação dos poros - diâmetros em µm				
rioponente	macroporo	mesoporo	microporo	ultramicroporo	criptoporo
Jongerius (1957)	> 100	30 - 100	< 30		
Brewer (1976)	> 75	30 - 75	5 - 30	< 5	< 0,1
Musy e Soutter (1991)	30 - 60 (limite entre micro e macro)				
Webb e Orr (1997)	> 0,05	0,002 - 0,05	< 0,002		

Tabela 3.2 – Classificações de tamanhos de poros de acordo com vários autores

Segundo Musy e Soutter (1991), uma das maneiras de separar a porosidade provém da distinção entre macro e microestrutura. A porosidade estrutural é aquela que considera os vazios interagregados presentes na macroestrutura enquanto que, a porosidade textural considera os vazios intra-agregados presentes na microestrutura.

Neste trabalho, será adotada a classificação de Brewer (1976), embasada na Física dos Solos, tendo em vista as estruturas microagregadas típicas de zonas tropicais apresentadas pelos materiais, objetos deste estudo.

⁶ Jongerius, A. (1957). Morphologic investigations of soil structure. Bodemkundige Studies, 2, Mededelingen van de Stickting voor Bodemkartering. Wageningen.

4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo estão localizadas no município de Maringá (zona urbana e zona rural do Distrito de Iguatemi), PR, latitude de 23º 25'S e longitude de 51º 57'W, e inseridas no Terceiro Planalto Paranaense, no subcompartimento denominado Planalto de Apucarana.

O Terceiro Planalto, com área aproximada de 135.000 km², ocupa 68% da área do estado, abrangendo os setores norte, nordeste, centro-oeste, sudoeste e centro-sul do estado do Paraná. O Planalto de Apucarana, bloco norte, se estende entre os rios Paranapanema, Tibagi, Ivaí e Paraná (MAACK, 1968).

4.1 CARACTERÍSTICAS DO MEIO FÍSICO

O Planalto de Apucarana é caracterizado por um relevo suavemente ondulado a plano, com altitudes que variam de 1125 m na escarpa da Serra do Cadeado decrescendo em direção ao norte, chegando a 290 m nas proximidades do rio Paranapanema, em uma distância aproximada de 150 km. O mesmo acontece em direção à oeste, em uma extensão de 240 km, quando as altitudes chegam a 235 m nas margens do rio Paraná.

O clima predominante nessa região é subtropical, com temperatura média anual variando de 20°C a 24°C e precipitação média anual de 1200 mm a 1800 mm, com verões

quentes, geadas pouco freqüentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida (IAPAR, 2005).

A cobertura vegetal original predominante é de floresta tropical perenifolia e subperenifolia.

4.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

O substrato geológico do Terceiro Planalto (Figura 4.1) é constituído por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, preferencialmente basaltos e andesitos, exceto no noroeste do estado, onde essas rochas estão recobertas pelo Arenito Caiuá, e pequenas manchas de Arenito Botucatu, próximas às escarpas da Serra da Boa Esperança (borda leste do planalto).



Figura 4.1 – Mapa Geológico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2001).

A seqüência de derrames basálticos resultantes de um intenso vulcanismo fissural deu origem a uma variedade petrológica significativa, definida como Formação Serra Geral por White (1908).

De um modo geral, na Formação Serra Geral ocorrem dois tipos de lavas: as vulcânicas basálticas toleíticas que resultam nos basaltos (dominantes) e, mais raramente, as lavas de composição dacítica a riolítica, que dão origem aos andesitos, riodacitos e riolitos (menos abundantes) (BELLIENI et al., 1986).

Apesar dos diferentes tipos de materiais expelidos, as rochas apresentam uma composição mineralógica simples, formada na sua maior parte por plagioclásios, piroxênios, anfibólios, opacos, quartzo e vidro (RUEGG, 1969).

Assentando-se de modo discordante sobre os basaltos da Formação Serra Geral, ocorrem os arenitos da Formação Caiuá, os quais predominam na região noroeste do Paraná, ocupando uma área aproximada de 25.000 km².

Desde a sua proposição, o Arenito Caiuá obteve, por parte dos pesquisadores, várias interpretações, principalmente quanto à idade, espessura, gênese e posição estratigráfica. No entanto, parece haver consenso no que diz respeito à composição mineralógica e às estruturas existentes. Assim, a Formação Caiuá é constituída predominantemente de arenitos finos a muito finos, apresentando cores que variam do vermelho-arroxeado a vermelho-escuro, com pequenos teores de matriz lamítica (GASPARETTO, 1999).

Na sua composição mineralógica, o quartzo é o constituinte principal, variando de 75% a 90% do total da rocha; secundariamente, aparecem os feldspatos (microclínio e plagioclásios), com teores compreendidos entre 5% e 10%, além de, mais raramente, calcedônia e muscovita. Também é freqüente a presença de fragmentos líticos, principalmente de basalto alterado, folhelhos, arenitos, siltitos e sílex, nunca, porém, ultrapassando 10% (SUGUIO, 1980).

4.3 ASPECTOS PEDOLÓGICOS

O mapa esquemático dos solos do Terceiro Planalto do Estado do Paraná (Figura 4.2), elaborado por Nakashima e Nóbrega (2003), mostra a distribuição das principais classes de solos que ocorrem, em nível de ordem e sub-ordem, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).



Figura 4.2 – Mapa de solos do Terceiro Planalto Paranaense (NAKASHIMA; NÓBREGA, 2003).

No Planalto de Apucarana, sobre as rochas basálticas, onde o relevo é suavemente ondulado e onde a cidade de Maringá está inserida ocorre o Latossolo Vermelho, textura argilosa, e o Nitossolo Vermelho. Nos topos e altas vertentes predomina o Latossolo Vermelho, textura argila (denominado anteriormente como Latossolo Roxo); a partir daí, em direção à jusante, nas médias e baixas vertentes aparece o Nitossolo Vermelho (anteriormente designado como Terra Roxa Estruturada). Nas áreas do Arenito Caiuá, que se iniciam muito próximas à cidade de Maringá, e onde o Distrito de Iguatemi está instalado, nos topos e altas vertentes aparece o Latossolo Vermelho de textura média (argila < 30%) e nas médias e baixas vertentes ocorre o Argissolo Vermelho-Amarelo e/ou Argissolo Vermelho, ambos de textura média (NAKASHIMA; NÓBREGA, 2003).

4.4 LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS

As áreas de estudo, representadas pelos Perfis de solo I, II e III (Figura 4.3), estão localizadas na zona urbana do município de Maringá e na zona rural do Distrito de Iguatemi também pertencente ao município de Maringá, na região norte do Paraná.



Figura 4.3 – Localização dos perfis estudados

Os perfis estudados, com suas respectivas localizações dentro do município de Maringá e denominações de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) são apresentados na Tabela 4.1.

Identificação	Localização	Posição na vertente	Identificação (EMBRAPA, 1999)
Perfil I	Vila Esperança (Campus da UEM)	Торо	Latossolo Vermelho (textura argilosa)
Perfil II	Jardim Universo	Baixa vertente	Nitossolo Vermelho
Perfil III	Distrito de Iguatemi (FEI/UEM)*	Alta vertente	Latossolo Vermelho (textura média)

Tabela 4.1 - Localização e identificação dos perfis estudados.

*FEI/UEM – Fazenda Experimental de Iguatemi da Universidade Estadual de Maringá

Os perfis selecionados para estudo, com base na classificação pedológica podem ser considerados como típicos dos solos que ocorrem no Terceiro Planalto Paranaense e, também, bastante representativos das classes de solos que ocorrem no território nacional.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados serão apresentados e analisados de forma independente para cada perfil estudado.

Inicialmente, será feita a caracterização do material natural a partir dos ensaios de campo e de laboratório, na seguinte ordem: descrição morfológica; caracterização geotécnica, incluindo os ensaios de investigação de campo (SPT e CPT); caracterização física, mineralógica e micromorfológica e porosimetria do solo para os diferentes níveis do perfil.

Em seguida, serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios edométricos para a avaliação da colapsibilidade e as análises micromorfológicas e porosimétricas do material ensaiado, em diversos momentos: antes e após colapso e após colapso e recarregamento, observando as modificações ocorridas a partir da amostra natural.

Ao final, será apresentada uma síntese dos resultados, englobando as análises realizadas para o material na condição natural (indeformado) e ensaiado (após a aplicação de carregamentos e inundação) com ênfase nos aspectos estruturais.

5.1 O PERFIL I (LATOSSOLO VERMELHO distroférrico)

5.1.1 Caracterização do Material Natural

5.1.1.1 Descrição morfológica

As observações em trincheira até 2,50 m de profundidade permitiram a descrição morfológica do Perfil I (Figura 5.1), constituído dos seguintes horizontes:



Figura 5.1 - Latossolo Vermelho distroférrico observado em trincheira (Maringá, PR).

- Ap 0 a 25 cm Bruno avermelhado escuro (2,5 YR ³/₄), textura muito argilosa; estrutura poliédrica subangular fraca, que se desfaz em granular pequena; ligeiramente duro; ligeiramente pegajoso; ligeiramente plástico; "cerosidade"; porosidade média; muitas raízes (fasciculadas e pivotantes); fissuras espaçadas de 10 a 15cm, verticais; macroporos biológicos; transição clara e plana;
- BA 25 a 85 cm Bruno avermelhado escuro (2,5 YR ³/₄), textura muito argilosa; estrutura poliédrica subangular média a fraca que se desfaz em granular pequena; ligeiramente duro; ligeiramente pegajoso; ligeiramente plástico; presença de carvão e de nódulos argilosos milimétricos de formas arredondadas e irregulares; "cerosidade" pouca, fraca; porosidade alta, fissuras e macroporos biológicos; raízes abundantes pivotantes; transição gradual e plana;

- Bw₁ 85 a 145 cm Bruno avermelhado escuro (2,5 YR ³/₄), textura muito argilosa; estrutura maciça porosa (granular pequena); firme; não pegajoso; não plástico; porosidade muito alta (macro e microporos); presença de fragmentos de carvão dispersos na massa e concentrados na transição com a camada inferior, raízes abundantes pivotantes que diminuem em profundidade, transição plana, difusa;
- Bw₂ 145 a 250 cm Bruno avermelhado escuro (2,5 YR ³/₄), textura muito argilosa, estrutura granular muito pequena, macio, friável, não pegajoso, não plástico, porosidade muito alta e presença de poucas raízes.

Com base nessa descrição e de acordo com o Sistema de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), o solo evoluído do Perfil I é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (anteriormente designado Latossolo Roxo).

5.1.1.2 Caracterização geotécnica

A Figura 5.2 apresenta o perfil de solo típico da área selecionada para estudo, os valores de N_{SPT} provenientes de três sondagens e os resultados de ensaios de caracterização (análise granulométrica, limites de liquidez e plasticidade e massa específica dos grãos) realizados em laboratório com as amostras coletadas nas sondagens até 15,0 m de profundidade.

Na Figura 5.2 é evidenciada a superposição de dois conjuntos bem individualizados em termos de cor, características e comportamento:

- um conjunto superior, de cor marrom avermelhado, de textura predominantemente argilo-siltosa, com N_{SPT} variando entre 1 e 4, em superfície, e aumentando com a profundidade, mas não excedendo a 8 entre 7,0 m e 9,0 m de profundidade. Os pesos específicos dos sólidos variam de 29,8 kN/m³ a 30,8 kN/m³. Apresenta Índices de Plasticidade que variam de 15% a 24% e Limites de Liquidez oscilando entre 57% e 73%, sendo os
valores mais elevados na transição para o conjunto inferior. Esse conjunto corresponde ao material pedologicamente evoluído – o Latossolo Vermelho distroférrico;

- um conjunto inferior que se inicia a aproximadamente 9,5 m de profundidade, de cor variegada, roxa e marrom amarelada, com maiores variações texturais e que apresenta, constantemente, diáclases salientadas por oxidações de cor preta e/ou amarela. Os valores de N_{SPT} são maiores do que os do conjunto superior, mas com comportamento aleatório em profundidade (variam de 8 a valores superiores a 30). Os Índices de Plasticidade variam de 24% a 41% e os Limites de Liquidez são superiores a 80%, chegando até 96%. Apresenta pesos específicos dos sólidos um pouco menores, variando entre 29,7 kN/m³ e 30,5 kN/m³. Esse conjunto corresponde ao nível de alteração do basalto – o saprolito.

Convém ressaltar que o conjunto superior, apesar de ser globalmente mais argiloso, apresenta plasticidade menor do que o conjunto inferior. Este comportamento se explica em parte pela diferença na composição mineralógica das argilas entre o conjunto superior e o inferior e, em parte pela estrutura granular, gerada pelos processos pedogenéticos mais atuantes no conjunto superior. A estrutura microgranular pressupõe a existência de um bloqueio da fração argila pela ação dos óxidos/hidróxidos de ferro (CHAUVEL; PEDRO; TESSIER, 1976).

Abaixo desses dois conjuntos, aproximadamente a 17,0 m, encontra-se a rocha basáltica com grau de alteração variado em profundidade, em função da alternância de níveis maciços, vesiculares e/ou amigdaloidais. O nível freático foi observado na camada do solo de alteração do basalto a 15,7 m de profundidade.

Os resultados de quatro ensaios de penetração de cone elétrico (CPT), realizados na área de estudo até a profundidade máxima de 17,3 m são apresentados na Figura 5.3.



Figura 5.2 – Perfil de solo típico - Latossolo Vermelho distroférrico (Maringá, PR)



Figura 5.3 – Resultados dos ensaios de penetração de cone elétrico (CPT) – Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)

Como o CPT4 foi realizado em dia chuvoso, é notável a influência da presença de água entre 0,8 m e 2,0 m de profundidade. Os valores de resistência de ponta reduziram, resultando em um aumento da razão de atrito, valores estes superiores aos obtidos nos demais ensaios.

Observa-se que na parte mais superficial da camada de solo evoluído o material é classificado, de acordo com Robertson et al. (1986), como sendo de comportamento de argila siltosa e na parte subjacente a esta, até aproximadamente 9,5 m de profundidade, como sendo de comportamento de silte arenoso para silte argiloso. Na camada inferior, correspondente ao saprolito, o material é classificado como sendo de comportamento de argila até 13,5 m e como de comportamento de argila siltosa até 17,3 m.

Essa classificação não retrata fielmente a granulometria do material, especialmente daquele constituinte da camada de solo evoluído, o qual, apesar de constituído essencialmente por argila, apresenta um comportamento de material mais granular. Isto provavelmente se justifique em função da microestrutura do solo, isto é, da microagregação resultante dos processos pedogenéticos mais atuantes na camada superior, como já salientado anteriormente.

5.1.1.3 Caracterização física

A Tabela 5.1 reúne valores de índices físicos naturais do solo, para as diferentes profundidades, obtidos com os corpos de prova talhados para a realização dos diversos ensaios desta pesquisa.

A análise estatística dos valores encontrados é mostrada nas Tabelas 5.2 e 5.3 e a Figura 5.4 demonstra essas variabilidades ao longo do perfil.

Prof. média	Amostra	СР	Wo	γ	$\gamma_{ m d}$	eo	n	Sr
(m)	(Bloco)	N°	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)		(%)	(%)
		1	34,3	14,26	10,62	1,806	64,4	56,6
		2	34,3	14,29	10,64	1,802	64,3	56,8
		3	32,7	13,75	10,36	1,877	65,2	52,0
0,50	LV_1	4	32,5	13,93	10,52	1,833	64,7	52,8
		5	32,8	14,14	10,65	1,799	64,3	54,3
		6	32,8	14,53	10,95	1,722	63,3	56,7
		7	32,6	15,25	11,51	1,590	61,4	61,1
		1	31,9	13,06	9,90	2,062	67,3	47,0
		2	31,1	13,20	10,07	2,010	66,8	46,9
		3	32,2	13,40	10,14	1,989	66,5	49,0
		4	32,4	13,85	10,46	1,897	65,5	51,8
	LV ₃	5	32,4	13,34	10,08	2,007	66,7	48,9
1 60		6	32,1	13,46	10,19	1,974	66,4	49,3
-,		7	31,9	13,40	10,16	1,983	66,5	48,8
		8	32,4	13,68	10,33	1,932	65,9	50,8
		9	32,4	13,77	10,40	1,914	65,7	51,3
		10	31,4	13,30	10,12	1,994	66,6	47,7
	LV ₄	11	31,6	13,54	10,30	1,943	66,0	49,2
		12	31,4	13,59	10,34	1,931	65,9	49,3
		1	31,1	12,78	9,75	2,150	68,3	44,5
		2	32,3	13,44	10,16	2,022	66,9	49,1
		3	32,1	12,33	9,33	2,289	69,6	43,1
		4	32,1	13,40	10,14	2,027	67,0	48,6
	LV5	5	31,1	11,53	8,79	2,491	71,4	38,4
3.20		6	31,1	11,43	8,72	2,523	71,6	37,9
- , -		7	31,1	12,66	9,66	2,179	68,5	43,9
		8	31,0	12,52	9,55	2,213	68,9	43,0
		9	31,0	12,00	9,16	2,352	70,2	40,5
		10	31,1	13,48	10,28	1,986	66,5	48,1
	LV_6	11	30,8	12,87	9,84	2,121	68,0	44,6
		12	31,0	12,93	9,87	2,110	67,8	45,1
		1	30,6	15,55	11,90	1,546	60,7	60,0
		2	30,6	15,79	12,09	1,506	60,1	61,5
		3	30,4	14,92	11,44	1,650	62,3	55,9
		4	30,6	15,46	11,83	1,561	61,0	59,5
		5	30,3	15,65	12,00	1,524	60,4	60,3
	LV ₂	6	30,1	14,77	11,35	1,670	62,5	54,6
	L • /	7	30,2	15,06	11,57	1,620	61,8	56,4
4,70		8	30,2	16,24	12,47	1,429	58,8	63,9
		9	30,6	15,65	11,98	1,529	60,5	60,7
		10	30,5	15,93	11,68	1,593	61,4	58,0
-		11	30,5	13,51	10,35	1,927	65,8	48,0
		12	30,5	15,24	11,68	1,594	61,4	58,0
		13	30,4	14,24	10,92	1,776	64,0	51,9
	LV ₈	14	30,6	14,19	10,86	1,789	64,1	51,8
	Ŭ	15	30,4	14,41	11,05	1,742	63,5	52,9
	1	1	· · ·	i	i	· · ·	· · · ·	· · · · ·

Tabela 5.1- Caracterização física do Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)

Prof. média	Amostra	СР	Wo	γ	γ _d	eo	n	Sr
(m)	(Bloco)	N°	(%)	(kN/m ³)	(kN/m^3)		(%)	(%)
		1	30,7	15,73	12,04	1,558	60,9	60,7
		2	30,5	15,55	11,91	1,586	61,3	59,3
		3	30,5	15,60	11,96	1,576	61,2	59,6
		4	30,1	15,74	12,10	1,546	60,7	60,0
		5	29,8	15,99	12,32	1,500	60,0	61,2
6 25		6	30,4	15,73	12,06	1,554	60,8	60,3
	IV	7	30,4	16,15	12,38	1,488	59,8	63,0
0,23	LV9	8	30,2	16,00	12,29	1,506	60,1	61,8
		9	30,7	15,66	11,98	1,570	61,1	60,2
		10	30,4	15,46	11,85	1,598	61,5	58,6
		11	29,5	15,41	11,90	1,587	61,3	57,2
		12	29,5	15,67	12,10	1,544	60,7	58,7
		13	29,5	15,95	12,32	1,500	60,0	60,5
		14	29,8	15,92	12,27	1,511	60,2	60,8
		1	31,9	15,50	11,75	1,621	61,8	60,7
		2	31,5	15,14	11,51	1,675	62,6	57,8
		3	31,7	15,70	11,92	1,583	61,3	61,6
		4	31,3	14,37	10,94	1,814	64,5	53,2
		5	31,7	15,71	11,93	1,582	61,3	61,7
	LV ₁₁	6	31,7	15,83	12,02	1,562	61,0	62,5
7,80		7	31,6	16,20	12,31	1,502	60,0	64,8
		8	31,3	15,05	11,47	1,686	62,8	57,1
		9	31,4	15,25	11,60	1,654	62,3	58,5
		10	31,3	15,29	11,65	1,644	62,2	58,6
		11	31,5	15,43	11,73	1,627	61,9	59,7
		12	30,7	14,93	11,42	1,697	62,9	55,7
		13	30,7	15,53	11,88	1,593	61,4	59,4
		1	35,9	15,50	11,41	1,647	62,2	65,8
		2	35,9	15,44	11,36	1,658	62,4	65,3
		3	35,7	15,14	11,15	1,708	63,1	63,2
		4	36,0	15,33	11,27	1,680	62,7	64,7
		5	36,0	15,57	11,45	1,638	62,1	66,4
		6	35,8	15,45	11,38	1,654	62,3	65,3
		7	35,8	15,55	11,45	1,636	62,1	66,0
9,25	LV ₁₃	8	36,0	15,36	11,30	1,673	62,6	64,9
		9	36,0	15,34	11,29	1,676	62,6	64,8
		10	35,7	15,63	11,52	1,622	61,9	66,5
		11	35,4	15,29	11,29	1,675	62,6	63,9
		12	35,4	15,19	11,21	1,693	62,9	63,2
		13	35,4	15,12	11,16	1,706	63,0	62,7
		14	35,4	15,19	11,22	1,691	62,8	63,2
		15	35,4	14,84	10,96	1,756	63,7	60,9

Tabela 5.1- Caracterização física do Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico) - continuação

conclusão

Prof.		w(%)		2	γ (kN/m ³)	γ	$v_{\rm d}$ (kN/m ³	3)		e			n (%)			S _r (%)	
(m)	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média
0,50	32,5	34,3	33,1	13,75	15,25	14,31	10,36	11,51	10,75	1,590	1,877	1,776	61,4	65,2	64,0	52,0	61,1	55,7
1,60	31,1	32,4	31,9	13,06	13,85	13,47	9,90	10,46	10,21	1,897	2,062	1,970	65,5	67,3	66,3	46,9	51,8	49,2
3,20	30,8	32,3	31,3	11,43	13,48	12,61	8,72	10,28	9,60	1,986	2,523	2,205	66,5	71,6	68,8	37,9	49,1	43,9
4,70	30,1	30,6	30,4	13,51	16,24	15,11	10,35	12,47	11,54	1,429	1,927	1,630	58,8	65,8	62,0	48,0	63,9	56,9
6,25	29,5	30,7	30,1	15,41	16,15	15,75	11,85	12,38	12,11	1,488	1,598	1,545	59,8	61,5	60,7	57,2	63,0	60,1
7,80	30,7	31,9	31,4	14,37	16,20	15,38	10,94	12,31	11,70	1,502	1,814	1,634	60,0	64,5	62,0	53,2	64,8	59,3
9,25	35,4	36,0	35,7	14,84	15,63	15,33	10,96	11,52	11,29	1,622	1,756	1,674	61,9	63,7	62,6	60,9	66,5	64,5

Tabela 5.2 – Variabilidade das características físicas do solo - Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)

Tabela 5.3 – Análise estatística das características físicas do solo – Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)

Prof.		Desvio padrão							Coeficiente de variação (%)					
(m)	W	γ	$\gamma_{ m d}$	e	n	Sr	W	γ	$\gamma_{ m d}$	e	n	Sr		
0,50	0,80	0,05	0,04	0,09	1,27	3,05	2,42	3,40	3,52	5,30	1,98	5,47		
1,60	0,45	0,02	0,02	0,05	0,54	1,54	1,41	1,73	1,58	2,41	0,81	3,12		
3,20	0,52	0,69	0,51	0,18	1,68	3,68	1,65	5,50	5,37	8,03	2,44	8,38		
4,70	0,18	0,76	0,56	0,13	1,85	4,38	0,58	5,05	4,84	8,05	2,99	7,69		
6,25	0,46	0,22	0,18	0,04	0,58	1,44	1,52	1,39	1,48	2,41	0,95	2,40		
7,80	0,36	0,46	0,34	0,08	1,09	3,05	1,16	2,99	2,89	4,71	1,76	5,14		
9,25	0,24	0,21	0,14	0,03	0,47	1,58	0,66	1,37	1,27	2,05	0,76	2,45		



Figura 5.4 - Variabilidade das características físicas do solo - Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)

É interessante ressaltar os elevados índices de vazios do solo, alcançando valores como 2,5 a 3,20 m de profundidade. Os índices de vazios tendem a decrescer com a profundidade, mas ainda são maiores do que 1,5 a 9,25 m de profundidade.

Outra importante observação, típica de solos residuais, é a variabilidade inerente às propriedades físicas. Como demonstra a Tabela 5.3, os coeficientes de variação dos índices de vazios são maiores do que 2% acima de 9,25 m e alcançam valores de até 8% a 3,20 m e 4,70m de profundidade.

Por se tratar de um solo argiloso, a capacidade de retenção de água é alta e, conseqüentemente, o teor de umidade natural é elevado, alcançando valores maiores do que 30% em todas as profundidades. Entretanto, esses elevados teores de umidade não implicam altos graus de saturação, devido aos elevados índices de vazios do solo. O grau de saturação é da ordem de 50% e aumenta com a profundidade, atingindo cerca de 67% a 9,25 m de profundidade. Esses altos índices de vazios implicam baixos pesos específicos secos do solo. Nos horizontes superficiais do perfil, valores tão baixos como 9 kN/m³ são encontrados.

5.1.1.4 Micromorfologia do perfil de solo

As análises micromorfológicas realizadas em lupa binocular e em microscópio óptico sobre lâminas delgadas, mostram que o material das camadas mais superficiais desse perfil, até cerca de 0,85 m (horizontes Ap e BA), apresenta sinais evidentes de modificações da estrutura, provavelmente, em função do uso e manejo da área. Nesse nível, a estrutura caracteristicamente granular microagregada dos Latossolos está dando lugar a zonas de plasma contínuo, cortado por fissuras visíveis macroscopicamente. Observam-se, ainda, setores de plasma orientado, envolvendo os agregados, mostrando arranjos em blocos semelhantes àqueles observados em horizontes B de Nitossolos. A partir de 0,85m de profundidade ocorre o material com características típicas do horizonte B latossólico (Figura 5.5).

A partir de 0,85 m até cerca de 4,50 m de profundidade, o solo é constituído principalmente por microagregados de formas arredondadas a subarredondadas, com dimensões variadas (os maiores entre 200 μ m e 400 μ m e excepcionalmente até 700 μ m de diâmetro), cujo arranjo gera uma elevada porosidade intermicroagregados (porosidade de empilhamento composto), altamente comunicante. Os microagregados são constituídos essencialmente por plasma (fração argila < 2 μ m) argilo-férrico, de cor vermelho escuro, isótico (isótropo), apresentando nas bordas uma estreita faixa de plasma vermelho mais claro (amarelo ou alaranjado, em luz polarizada), de um modo geral argilassépico (anisótropo), e englobando, ocasionalmente, grãos do esqueleto (fração areia) constituídos por quartzo e minerais escuros (ilmenita, magnetita). Em meio às áreas microagregadas ocorrem pequenos setores de plasma contínuo.

Nas áreas de plasma microagregado são freqüentes a ocorrência de tubos (que aparecem como secções ovaladas ou circulares nas lâminas delgadas) e cavidades, resultantes de atividade biológica. O diâmetro desses grandes poros varia entre 2000 µm e 4000 µm. Alguns tubos estão parcialmente preenchidos por microagregados menores do que os da área em torno. Estão delimitados, grosso modo, por uma borda de plasma contínuo. Essa organização do plasma é decorrente, provavelmente, de esforços gerados pela atividade biológica (crescimento de raízes e/ou passagem de animais).

As zonas de plasma mais contínuo têm no seu interior cavidades de formas irregulares. Nesses setores, em geral, não são observados os grandes poros, e os grãos do esqueleto, com dimensões entre 50 μ m e 200 μ m, aparecem mais concentrados, compostos por grãos irregulares e angulosos de minerais escuros e quartzo (areia fina). O arranjo predominante do material é, nesse nível, do tipo enáulico (grânulos de plasma - microagregados) e, secundariamente, porfirogrânico (plasma englobando grãos do esqueleto), ou seja, apresenta uma estrutura de base pórfiro-enáulica.

Em zonas contínuas de plasma ocorre o desenvolvimento de microfissuras paralelas e curvas, evidenciando o efeito dos ciclos de umedecimento e secagem do solo nas camadas mais superficiais. Por outro lado, em algumas zonas observa-se a coalescência dos microagregados em vários graus, que aparecem soldados essencialmente pelo plasma vermelho mais claro.

A tendência à coalescência dos microagregados, bem como o desenvolvimento de zonas contínuas de plasma (mais numerosas e maiores), aumenta com a profundidade.

Assim, em profundidades superiores a 4,50 m, destaca-se a presença de zonas de plasma mais contínuo, com redução significativa da porosidade, entremeadas por zonas microagregadas, com alta porosidade (empilhamento composto). Essa passagem normalmente não é repentina, apresentando diferentes estágios de evolução. O plasma contínuo evolui para um plasma contínuo microdividido por fissuras finas e curtas (porosidade fissural e cavitária) passando para zonas onde (a partir do plasma contínuo) se destacam volumes arredondados (essa distinção se faz através de cor e densidade do plasma – semelhante a uma "nodulação"), com porosidade essencialmente cavitária. Essas áreas tendem a evoluir para zonas microagregadas com porosidade de empilhamento composto altamente comunicante. A porosidade total do material é menor do que a das amostras mais superficiais.

Os volumes arredondados mais densos (nodulações), visualizados nas áreas contínuas, se constituem de plasma vermelho escuro, se individualizando dentro de um plasma vermelho mais claro. Nas áreas de plasma microagregado, os agregados maiores apresentam formas mais arredondadas, enquanto que os menores apresentam formas mais irregulares. São, como observados para os níveis mais superficiais, constituídos por plasma vermelho escuro orlado

por uma faixa de plasma vermelho amarelado. O plasma mais claro faz as conexões com os outros microagregados e, de um modo geral, é mais abundante nesse nível do que nos superiores. A essa profundidade começam a aparecer zonas com concentrações diferenciadas de ferro.

A cerca de 7,50 m de profundidade, as análises micromorfológicas mostram que o material é formado por microagregados, em geral, sem bordas e de tamanhos e formas variadas. Nas zonas microagregadas com porosidade interconectada de empilhamento composto, são observados volumes ovalados de até 1000 µm, com variações para mais ou menos denso, se nodulando. Em algumas dessas zonas, a essa profundidade, os microagregados apresentam poucos pontos de conexão entre si, criando uma porosidade muito aberta.

Há evidências de grande pedoturbação geradas por fluxo de água, atividade biológica ou associadas. Apresenta poros de seção ovalada (tubos), alguns preenchidos e outros não, e em geral, próximos.

Nas zonas contínuas aparecem setores aparentemente mais enriquecidos em ferro, com tons mais escuros e porosidade predominantemente cavitária.

A aproximadamente 9,00 m de profundidade ocorre a transição do solo evoluído para a camada de solo de alteração de basalto. São observados lado a lado, fragmentos de rocha e grãos minerais em diversos estágios de alteração que gradam para zonas de plasma argiloférrico contínuo e/ou microagregado. A porosidade, como nos níveis acima, é maior na zona microagregada; nas áreas contínuas ela é reduzida e os poros são essencialmente fissurais e finos.



Horizonte Bw

Estrutura microagregada com elevada porosidade (empilhamento composto) altamente comunicante

Horizonte Bw Estrutura predominantemente

contínua com redução significativa da porosidade

Horizonte Bw Zona microagregada com evidências de pedoturbação

Horizonte Bw

Transição do solo evoluído para o solo de alteração de basalto (alteroplasma + pedoplasma)

Figura 5.5 – Micromorfologia do Perfil I – solo natural (indeformado)

5.1.1.5 Caracterização mineralógica

Difração de Raios X

Nesse perfil, além das amostras totais, foram efetuadas separações (com auxílio de lupa) das diversas zonas (microagregada, contínua, "nodulação" do plasma e material de preenchimento de tubos) que compõem a estrutura do solo evoluído (horizonte Bw), com o intuito de verificar as possíveis diferenças entre a composição mineralógica das mesmas.

Os resultados das análises (Tabela 5.4) mostram a presença de caulinita (filossilicato de fórmula (Al₂Si₂O₅(OH)₄), hematita (Fe₂O₃) e magnetita (FeOFe₂O₃) em todo o perfil. Os minerais gibbsita $(Al(OH)_3)$ e quartzo (SiO_4) estão presentes preferencialmente nos materiais constituintes da camada superficial de solo pedologicamente evoluído, ou seja, horizonte Bw (amostras 1 a 4). No solo de alteração constata-se ainda a presença de goethita (oxi-hidróxido de fórmula (FeOOH), esmectita (filossilicato de fórmula variável) e anatásio (TiO₂) que constituem fases transitórias na evolução basalto-latossolo. Provavelmente há uma transformação da goethita e mesmo da esmectita em hematita. Embora não tenha sido possível determinar o tipo de esmectita presente, a posição da reflexão 001 é mais próxima da nontronita – esmectita ferruginosa ((Si_{4-x} R_x^{3+})(Fe₂³⁺ \Box_1)O₁₀ (OH) $_2$ M_x^{+}), também verificada por Gonçalves (1987). Assim, a alteração da esmectita geraria uma fase ferruginosa e uma aluminosa. A ferruginosa poderia ser diretamente a hematita ou passar inicialmente pela goethita. A aluminosa comporia as caulinitas. A presença de gibbsita e ausência de goethita, na parte superior, indicam transformação de parte da caulinita devido ao intemperismo de caráter laterítico, mais intenso na porção melhor drenada do perfil de alteração, que leva à eliminação da sílica e desidratação da goethita.



O basalto, que constitui o material parental do solo estudado no Perfil I, se compõe por uma alternância de níveis maciços com níveis vesiculares/amigdaloidais, apresentando amígdalas constituídas por quartzo. Isso explica a presença de quartzo no perfil de alteração, mineral que praticamente não ocorre nos basaltos. Por outro lado, em função do tipo de amostra analisada (fração < 0,149 mm), não aparecem nos difratogramas os minerais escuros (magnetita e ilmenita – identificados em microscopia óptica) que compõem parte do esqueleto.

Difratogramas característicos dos dois conjuntos de amostras: solo evoluído (horizonte Bw) e solo de alteração (Horizonte C) são apresentados na Figura 5.6.

Comparando-se os difratogramas das diferentes zonas (material do horizonte Bw) não foi possível identificar qualquer variação na composição mineralógica. Sendo assim, tanto as zonas microagregadas quanto as zonas contínuas, a "nodulação" de plasma e mesmo o material de preenchimento de tubo apresentaram difratogramas bastante semelhantes aos totais correspondentes.



Tabela 5.4 - Mineralogia do Perfil I (Latossolo Vermelho distroférrico)

Figura 5.6 - Difratogramas característicos dos dois conjuntos de solo - Perfil I

Espectroscopia Mössbauer

A importância do papel do ferro na organização do plasma foi inicialmente apontada por Chauvel (1976), que enfatiza a presença desse elemento como capaz de bloquear a ação das argilas. Não é a quantidade de ferro presente que conta, mas a forma (cristaloquímica) como esse elemento se encontra, o que não foi possível verificar com a DRX.

Assim, para complementar os dados obtidos com a DRX, as amostras do conjunto de solo evoluído foram analisadas por Espectroscopia Mössbauer. A Tabela 5.5 mostra os parâmetros obtidos através do ajuste das curvas experimentais (temperaturas ambiente e 80 K) e as Figuras 5.7 e 5.8 mostram os resultados desses ajustes. Todos os espectros são compostos por um sexteto ajustado por meio de uma distribuição de campo magnético e um dubleto.

Os valores de δ (IS) e os de Δ Eq (QS) demonstram que a única forma de ferro presente é o Fe³⁺ octaédrico e que há apenas um mineral presente: hematita (CORNELL; SCHWERTMANN, 1996; BOWEN; DE GRAVE; VANDENBERGHE, 1993). Em virtude da acuidade do método, pode-se afirmar que outras fases minerais (magnetita, goethita), se existirem, estarão em quantidades inferiores a 2%.

A presença dos dubletos e as variações nos valores de campo hiperfino (B_{hf}) representam variações na cristalinidade do material, seja por variações nos tamanhos dos cristais, seja em função de defeitos cristalinos como vacâncias ou substituições do ferro por outro elemento. Se os dubletos são oriundos da mesma fase mineral que o sexteto, espera-se que, à baixa temperatura, sofram um ordenamento magnético e se transformem em sextetos. Comparando-se os espectros à temperatura ambiente e à baixa temperatura, verifica-se que esse fenômeno ocorre parcialmente, ou seja, diminui a área correspondente ao dubleto em favor da área correspondente ao sexteto.

Ao se comparar os espectros das amostras das fases microagregadas com os das demais constata-se que os dubletos ocupam áreas maiores, ou seja, que esses microagregados são constituídos por materiais com granulometria significativamente menor do que as demais fases.

Os valores de B_{hf} também apontam para diferenças entre essas fases. Os valores para os microagregados são significativamente inferiores (entre 47-48 T) aos obtidos para as amostras totais (em torno de 52 T). Os materiais das zonas contínuas nas amostras 2 e 3 também apresentam valores baixos, exceto a amostra 4 que nos demais ensaios também apresentou resultados fora do esperado. Outra explicação pode ser a baixa correlação apresentada pelo espectro experimental.

Deve-se aqui ressaltar que as separações de fases apesar de efetuadas com auxílio de lupa não são perfeitas, isto é, podem ter ocorrido contaminações entre as fases, especialmente nas amostras 3 e 4 (mais profundas), nas quais os microagregados não estão fisicamente separados do plasma contínuo – constituem-se apenas em "nodulações".

Entretanto, desde já se pode estabelecer que efetivamente o ferro se apresenta como diferentes populações de um mesmo mineral - a hematita, sendo essas populações definidas por variações nos tamanhos dos cristalitos e na cristalinidade. Os resultados indicam que aos microagregados corresponde à população de mais baixo grau de cristalinidade ou grande quantidade de defeitos cristalinos que poderia, eventualmente, ser devido à presença de impurezas como substituição do Fe pelo Al na estrutura da hematita. Essas características devem ser também as responsáveis por uma interação mais efetiva com os cristalitos de caulinita promovendo o bloqueio de sua atividade.

Ao longo do perfil verifica-se que essa situação ocorre desde a base do material pedologicamente evoluído até a superfície, variando apenas as proporções entre as diferentes populações, intimamente associadas às fases plásmicas (plasma contínuo e plasma microagregado e/ou com "nodulações"). Essa variação observada no grau de cristalinidade e

de tamanho dos cristalitos pode, em princípio, justificar o comportamento e a organização do plasma ao longo do perfil.

Amostra	Prof.	Zona	Temperatura	Subspectro	B_{hf}	IS	QS	ÁREA
7 mostra	(m)	selecionada	de medida	Bubspeeno	(T)	(mm/s)	(mm/s)	(%)
			Ambiente	Distribuição	47,4	0,36	-0,16	83,7
		Microagregada		Dubleto	-	0,37	0,58	16,3
		(M)	80 K	Distribuição	58,6	0,52	-0,18	91,3
1	1 60		00 K	Dubleto	-	0,51	0,71	8,7
1	1,00	Preenchimento	Ambiente	Distribuição	47,5	0,36	-0,16	85,0
		de Tubo (PT)	7 unorente	Dubleto	-	0,37	0,56	15,0
		Total (T)	Ambiente	Distribuição	50,6	0,38	-0,18	78,6
		10001(1)	7 molente	Dubleto	-	0,39	0,65	21,4
		Contínua (C)	Ambiente	Distribuição	47,6	0,35	-0,16	83,4
2	4,70	Continuu (C)	7 unorente	Dubleto	-	0,33	0,54	16,6
2		Total (T)	Ambiente	Distribuição	50,3	0,37	-0,16	68,8
		10001(1)	7 molente	Dubleto	-	0,38	0,63	31,2
			Ambiente	Distribuição	42,4	0,33	-0,15	80,2
		Contínua (C)		Dubleto	-	0,34	0,51	19,8
3	6 25		80 K	Distribuição	58,8	0,53	-0,19	92,3
5	0,25		00 K	Dubleto	-	0,51	0,67	7,7
		Total (T)	Ambiente	Distribuição	50,6	0,38	-0,16	80,2
		10001(1)	7 millionente	Dubleto	-	0,41	0,65	19,8
		Microagregada (M)	Ambiente	Distribuição	47,8	0,36	-0,17	77,9
4		Whereagregada (WI)	7 molente	Dubleto	-	0,36	0,57	22,1
	7 80	Contínua (C)	Ambiente	Distribuição	51,2	0,38	-0,17	80,6
	7,00	Continua (C)	7 molente	Dubleto	-	0,38	0,61	19,4
		Total (T)	Ambiente	Distribuição	51,7	0,38	-0,20	76,8
		10001(1)	7 millionente	Dubleto	-	0,39	0,60	23,2

Tabela 5.5– Parâmetros hiperfinos e áreas subespectrais (Perfil I)



Figura 5.7 – Ajustes das curvas experimentais – materiais constituintes do Perfil I (Espectroscopia Mössbauer - temperatura ambiente)



Figura 5.8 – Ajustes das curvas experimentais – materiais constituintes do Perfil I (Espectroscopia Mössbauer - temperatura de 80 K)

5.1.1.6 Porosimetria

As curvas de distribuição diferencial (histogramas de freqüência) e porcentagens de poros em relação ao volume de vazios total da amostra (exceto os inacessíveis) *versus* diâmetro dos poros para quatro níveis do perfil, até a profundidade de 4,70 m, são apresentadas nas Figuras 5.9 e 5.10.

A distribuição de poros observada na Figura 5.9 contempla os poros interagregados (parcela responsável pela porosidade estrutural) e os vazios intra-agregados (parcela responsável pela porosidade textural).

Esses dois conjuntos de poros podem ser melhor visualizados na Figura 5.10 através dos histogramas de freqüência dos vazios do solo, que mostram, para todos os níveis do perfil, uma distribuição bimodal, isto é, com duas famílias de poros principais. Uma família é representada pelos poros interagregados com diâmetros entre 10 μ m e 200 μ m e outra família representada pelos poros intra-agregados, com diâmetros entre 0,01 μ m e 0,1 μ m, aproximadamente.



Figura 5.9 - Curvas de distribuição de poros - solo natural (Perfil I)



Figura 5.10 - Histogramas de freqüência de poros - solo natural (Perfil I)

É interessante observar que os intervalos referentes aos poros interagregados são deslocados gradativamente para a esquerda à medida que as profundidades aumentam,

indicando uma redução no tamanho dos poros maiores com a profundidade, o que também foi observado nas análises micromorfológicas.

Com base nas Figuras 5.9 e 5.10, e em conformidade com Brewer (1976), pode-se classificar os poros interagregados como sendo constituídos por macro, meso e microporos e os intra-agregados como ultramicro e criptoporos.

A Tabela 5.6 fornece as classes de poros presentes e os percentuais correspondentes para os materiais dos diferentes níveis do perfil analisado.

Porcentagem de poros Prof. nc macro ultramicro meso micro cripto (m) (%) $> 75 \ \mu m$ $30 - 75 \ \mu m$ $5 - 30 \ \mu m$ $0,1-5 \ \mu m$ < 0,1 µm 0.50 58.9 15 28 17 5 35 1,60 60,9 10 26 32 13 19 3,20 62,5 12 25 33 12 18 4,70 60,2 7 22 41 12 18

Tabela 5.6 – Classificação dos poros de acordo com Brewer (1976) – Solo natural (Perfil I)

Os resultados encontrados para a parte mais superficial do perfil (profundidade 0,50 m) evidenciam comportamento de material compactado com redução dos poros interagregados e aumento dos vazios intra-agregados. Os criptoporos estão representados (Figura 5.10) por uma faixa muito estreita, com pico em aproximadamente 0,02 µm, correspondendo a um percentual de 35% (Tabela 5.6). As modificações na estrutura original do material desse nível foram também observadas nas análises micromorfológicas.

Os materiais das profundidades de 1,60 m, 3,20 m e 4,70 m, apesar de apresentarem diferentes porosidades totais, exibem uma distribuição de poros muito semelhante. As porcentagens de poros interagregados e vazios intra-agregados são aproximadamente iguais, em torno de 70% e 30%, respectivamente.

Os materiais das profundidades de 1,60 m e 3,20 m mostram praticamente os mesmos percentuais para cada uma das classes de poros (de macroporos até criptoporos). No entanto, o material da profundidade de 4,70 m apresenta uma redução da porcentagem na classe dos macroporos (de 12% para 7%) e aumento da porcentagem na classe dos microporos (de 33% para 41%).

As análises micromorfológicas corroboram esses resultados, pois a partir de aproximadamente 4,50 m há um predomínio de zonas de plasma contínuo com redução das zonas de plasma microagregado.

Embora os resultados obtidos nas análises porosimétricas mostrem coerências com as análises micromorfológicas, há evidências de que os macroporos de origem biológica (tubos e canais de diâmetros maiores do que 1000 μ m) não estejam aqui representados. Em função das pequenas dimensões da amostra analisada (1,5x1,5x1,5) cm³ e devido à abundância desses macroporos, é possível que a mesma possa não ser representativa.

5.1.2 Ensaios Edométricos

Duas séries de ensaios edométricos, em um total de 89 ensaios, foram realizadas para o Perfil I. A primeira série, destinada à avaliação da colapsibilidade, foi constituída de 65 ensaios (51 ensaios simples e 7 ensaios duplos – totalizando 14 ensaios). A segunda, composta por 24 ensaios simples, foi realizada exclusivamente para a obtenção de corpos de prova empregados na confecção de lâminas delgadas de solo (análises micromorfológicas) e ensaios de porosimetria.

5.1.2.1 Curvas de compressão

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as curvas de compressão do solo obtidas nos ensaios edométricos simples para avaliação da colapsibilidade, nas quais se procura mostrar comportamentos que podem ser admitidos como típicos dos materiais pedologicamente mais evoluídos, que constituem o conjunto superior do perfil estudado, tanto no que se refere às curvas de compressão quanto aos colapsos observados.

As deformações induzidas pelo umedecimento (deformações de colapso) foram medidas sob tensões que variaram de 12,5 kPa a 1600 kPa. Os índices de vazios foram normalizados através do índice de vazios inicial de cada corpo de prova ensaiado. As deformações por colapso, para cada tensão de inundação empregada, até 800 kPa, estão indicadas nas figuras a partir da curva de compressão natural do solo.

Para as menores tensões, as deformações de colapso são negligenciáveis. Alcançam um máximo para uma determinada tensão e então decrescem quando as tensões são aumentadas, sendo desprezíveis para uma alta tensão aplicada.

Para ilustrar a influência do teor de umidade inicial na curva de compressão do solo e na magnitude do colapso, a Figura 5.11 mostra as curvas de compressão, para a profundidade de 0,50 m, obtidas no teor de umidade natural de 34% e no teor de umidade de 28% (após secagem da amostra a temperatura ambiente até atingir uma perda de umidade aproximada de 6%, antes do início do ensaio).

Verifica-se que as tensões de pré-adensamento do solo são diferentes quando se consideram as duas curvas, tendendo a um valor maior para a curva correspondente ao solo mais seco, independente, portanto, de sua história de tensões.

Os coeficientes de colapso obtidos para o solo com teor de umidade inicial de 34% e sob tensões de inundação entre 25 kPa e 200 kPa, variaram de 1,8% a 4,8%, sendo o máximo

valor obtido na tensão de 100 kPa. Observando a tendência de redução desses valores já a partir da tensão de 200 kPa, os valores esperados para as tensões de 400 kPa e 800 kPa deveriam ser menores do que aquele correspondente à tensão de 200 kPa, isto é 4%. No entanto, para o solo com teor de umidade inicial de 28% e sob tensões de 400 kPa e 800 kPa, esses coeficientes atingiram valores muito maiores, de 17% e 20%, respectivamente.



Figura 5.11 – Influência da umidade inicial na magnitude do colapso - Ensaios Simples (Perfil I - material profundidade 0,50 m)

A forma das curvas sugere que, se somadas as duas parcelas de deformação, para uma determinada tensão aplicada e para um mesmo índice de vazios inicial, esses valores tendem à igualdade, independente do teor de umidade inicial do corpo de prova. Esse comportamento do solo foi também constatado nos trabalhos de Vilar (1979) para os sedimentos modernos da cidade de São Carlos, SP.

O fato é que, estando o solo com teor de umidade inicial menor, tende a apresentar maior rigidez temporária, mantida pela tensão de sucção e/ou cimentação, e quando do seu umedecimento, ele tende a apresentar maior decréscimo de volume sob uma determinada tensão e, conseqüentemente, maior coeficiente de colapso. Por outro lado, se o material possuir teor de umidade inicial elevado, poderá até mesmo não manifestar o colapso naquelas condições, embora o solo possa ser colapsível.

As deformações por inundação representadas na Figura 5.12 para os materiais dos diferentes níveis, ensaiados no seu teor de umidade natural, mostram o comportamento do solo apresentado ao longo do perfil estudado quando sujeito à inundação.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam as curvas de compressão do solo para os diferentes níveis do perfil, normalizadas, para as condições natural e inundada desde o início do ensaio (tensão de 1,25 kPa), respectivamente.

Da mesma forma, como observado nos ensaios simples, se comparadas as duas curvas do material, natural e inundada (ensaios duplos), referentes à mesma profundidade, as deformações de colapso são negligenciáveis para baixas tensões. Atingem um valor máximo e decrescem à medida que as tensões são aumentadas.

É interessante observar também que essas curvas, tanto na condição natural quanto inundada, estão agrupadas formando dois conjuntos. Para as duas condições isto ocorreu da mesma forma, o primeiro conjunto, à esquerda do gráfico, agrupa os materiais mais superficiais (profundidades de 0,50 m a 3,20 m) e o segundo conjunto, à direita, agrupa os materiais dos níveis mais profundos (4,70 m a 9,25 m de profundidade), o que implica concluir que os materiais mais superficiais apresentam menor rigidez do que aqueles dos níveis mais profundos. Essa rigidez possivelmente se deve a diferenças na microestrutura do solo, observadas através das análises micromorfológicas a partir de aproximadamente 4,50 m.



Figura 5.12 - Efeito da inundação do solo para os diferentes níveis do Perfil I - Ensaios simples



Figura 5.13 - Curvas de compressão normalizadas (umidade natural) - Perfil I



Figura 5.14 - Curvas de compressão normalizadas (solo inundado) - Perfil I

No estudo da colapsibilidade do solo, os resultados obtidos nos ensaios edométricos simples e duplos, em um total de 65 ensaios, são encontrados na Tabela 5.7.

Esses resultados comprovam que as deformações volumétricas, por carregamento e por inundação, para um mesmo nível do perfil, são fortemente afetadas pelas características físicas iniciais do corpo de prova (índice de vazios e teor de umidade).

Em geral, as deformações por carregamento tenderam a valores superiores àqueles correspondentes às deformações por colapso, principalmente para tensões entre 200 kPa e 1600 kPa, exceto para os ensaios realizados com perda de umidade inicial do solo (profundidade de 0,50 m).

Para os níveis mais superficiais, isto é, até 3,20 m de profundidade, tanto as deformações por colapso quanto as deformações por carga, para uma mesma tensão aplicada, também tenderam a valores superiores àqueles observados para os níveis mais profundos.

Os graus de saturação finais dos corpos de prova submetidos à inundação em determinada tensão de interesse oscilaram entre 83% e 100%, apresentando um valor médio em torno de 94%. Isto pode ser atribuído, para a maioria dos casos, à presença de vazios inacessíveis, quer pela sua existência já na amostra natural, quer pela sua formação durante o ensaio, proveniente dos estágios de carregamento.

D C			Condiçõ	es dos corpo	os de prova	nos ensaios	Tensão de	Índice d	e vazios	Deformação	Volumétrica
(m) (Bloco)		Ensaio Nº		Inicial		Final	inundação	antes e após	s inundação	$\Delta V/V$	o (%)
(111)	(1000)	1	eo	w _o (%)	$S_{ro}(\%)$	$S_{rf}(\%)$	(kPa)	ei	e _f	carregamento	inundação
		1	1,806	34,3	56,6	94,8	-	-	-	-	-
		2	1,802	34,3	56,8	99,6	1,25	1,800	1,803	0,07	-0,11
		3*	1,877	32,7	52,0	82,7	25	1,799	1,750	2,71	1,75
0.50	IV.	4*	1,833	32,5	52,8	85,7	50	1,740	1,646	3,28	3,43
0,50		5*(LV _{1C})	1,722	32,8	56,7	89,1	100	1,577	1,453	5,33	4,81
		6*	1,590	32,6	61,1	89,2	200	1,446	1,349	5,56	3,97
		7**	1,702	28,3	49,6	96,6	400	1,606	1,163	3,55	17,00
		8**	1,724	27,8	48,1	100,0	800	1,480	0,983	8,96	20,04
		9	2,062	31,9	47,0	80,8	-	-	-	-	-
		10	2,010	31,1	46,9	96,0	1,25	2,009	2,007	0,03	0,07
	LV ₃	11	1,989	32,2	49,0	93,9	12,5	1,968	1,952	0,70	0,54
		12	1,897	32,4	51,8	95,2	25	1,861	1,843	1,24	0,63
1,60		13	2,007	32,4	48,9	95,3	50	1,923	1,829	2,79	3,22
		14	1,974	32,1	49,3	97,1	100	1,803	1,655	5,75	5,28
		15	1,983	31,9	48,8	97,8	200	1,605	1,438	12,67	6,41
		16	1,932	32,4	50,8	92,1	400	1,386	1,293	18,62	3,90
		17	1,914	32,4	51,3	95,4	800	1,102	1,083	27,87	0,90
		18	2,150	31,1	44,5	***	-	-	-	-	-
		19	2,022	32,3	49,1	95,2	1,25	2,020	2,026	0,07	-0,20
		20	2,289	32,1	43,1	93,5	12,5	2,275	2,251	0,43	0,73
		21	2,027	32,1	48,6	93,7	25	2,004	1,978	0,76	0,87
3 20	I V-	22	2,491	31,1	38,4	90,1	50	2,220	2,037	7,76	5,68
5,20	LVS	23	2,523	31,1	37,9	87,0	100	2,038	1,852	13,77	6,12
		24	2,179	31,1	43,9	92,4	200	1,723	1,575	14,34	5,44
		25	2,213	31,0	43,0	94,6	400	1,452	1,358	23,69	3,83
		26	2,352	31,0	40,5	91,7	800	1,248	1,208	32,94	1,78
		27	2,150	31,1	44,5	93,5	1600	1,026	1,025	35,68	0,05

Tabela 5.7 – Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos – Perfil I

continua

Durf	A	F uerie	Condiçõ	ies dos corp	os de prova	nos ensaios	Tensão de	Índice d	e vazios	Deformação	Volumétrica
Prof.	Amostra (Ploco)	Ensaio Nº		Inicial		Final	inundação	antes e após	inundação	$\Delta V/V$	o (%)
(111)	(DIOCO)	11	eo	w _o (%)	S_{ro} (%)	$S_{rf}(\%)$	(kPa)	ei	e _f	carregamento	inundação
		28(LV _{7E})	1,546	30,6	60,0	76,6	-	-	-	-	-
		29	1,506	30,6	61,5	96,6	1,25	1,506	1,510	0,00	-0,16
		30	1,650	30,4	55,9	96,2	12,5	1,637	1,634	0,49	0,11
4,70 LV ₇		31	1,561	30,6	59,5	97,3	25	1,536	1,531	0,98	0,20
	LV ₇	32	1,524	30,3	60,3	96,2	50	1,493	1,487	1,23	0,24
		33	1,670	30,1	54,6	98,6	100	1,579	1,532	3,41	1,82
		34(LV _{7D})	1,620	30,2	56,4	97,6	200	1,466	1,391	5,88	3,04
		35(LV _{7G})	1,429	30,2	63,9	97,4	400	1,288	1,242	5,80	2,01
		$36(LV_{7F})$	1,529	30,6	60,7	100,0	800	1,093	1,065	17,24	1,34
		37	1,558	30,7	60,7	74,6	-	-	-	-	-
		38	1,586	30,5	59,3	91,9	1,25	1,585	1,588	0,04	-0,12
		39	1,576	30,5	59,6	92,8	12,5	1,567	1,566	0,35	0,04
		40	1,546	30,1	60,0	94,4	25	1,515	1,508	1,22	0,28
6 25	LV ₉	41	1,500	29,8	61,2	97,2	50	1,453	1,445	1,88	0,33
0,23		42	1,554	30,4	60,3	92,8	100	1,488	1,478	2,58	0,40
		43	1,488	30,4	63,0	92,6	200	1,434	1,424	2,17	0,41
		44	1,506	30,2	61,8	90,3	400	1,388	1,350	4,71	1,59
		45	1,570	30,7	60,2	92,5	800	1,226	1,174	13,39	2,34
		46	1,598	30,4	58,6	100,0	1600	0,965	0,958	24,36	0,36
		$47(LV_{11E})$	1,621	31,9	60,7	76,1	-	-	-	-	-
		$48(LV_{11F})$	1,675	31,5	57,8	93,8	1,25	1,673	1,676	0,07	-0,11
		49	1,583	31,7	61,6	89,2	12,5	1,573	1,570	0,39	0,12
		50	1,814	31,3	53,2	95,5	25	1,789	1,785	0,89	0,14
7,80	LV ₁₁	51	1,582	31,7	61,7	92,7	50	1,545	1,541	1,43	0,16
		52	1,562	31,7	62,5	94,2	100	1,523	1,516	1,52	0,28
		53	1,502	31,6	64,8	93,3	200	1,449	1,435	2,12	0,57
		$54(LV_{11D})$	1,686	31,3	57,1	92,9	400	1,466	1,375	8,19	3,69
		55(LV _{11G})	1,654	31,4	58,5	92,9	800	1,255	1,206	15,03	2,17

Tabela 5.7 – Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos – Perfil I (Continuação)

continua

Prof.	Amostra	Ensaio Nº	Condições dos corpos de prova nos ensaios				Tensão de	Índice d an	e vazios tes	Deformação Volumétrica	
(m)	(Bloco)		Inicial			Final	inundação	e após a inundação		ΔV/Vo (%)	
			eo	w _o (%)	$S_{ro}(\%)$	$S_{rf}(\%)$	(kPa)	ei	e _f	carregamento	inundação
		56	1,647	35,9	65,8	89,2	-	-	-	-	-
	IVa	57	1,658	35,9	65,3	99,9	1,25	1,657	1,660	0,04	-0,11
		58	1,708	35,7	63,2	100,0	12,5	1,696	1,693	0,44	0,11
		59	1,680	36,0	64,7	98,8	25	1,658	1,654	0,82	0,15
9 25		60	1,638	36,0	66,4	96,1	50	1,616	1,612	0,83	0,15
,25	L V 13	61	1,654	35,8	65,3	97,8	100	1,612	1,604	1,58	0,31
		62	1,636	35,8	66,0	91,6	200	1,590	1,569	1,75	0,81
		63	1,673	36,0	64,9	96,5	400	1,506	1,451	6,25	2,19
		64	1,676	36,0	64,8	98,9	800	1,305	1,270	13,86	1,52
		65	1,622	35,7	66,5	99,0	1600	1,169	1,161	17,28	0,37

Tabela 5.7 – Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos – Perfil I (Continuação)

* ensaios interrompidos após colapso
** ensaios realizados com perda de umidade inicial de aproximadamente 6%
*** corpo de prova inundado no final do ensaio (tensão 1600 kPa)
() corpos de prova submetidos também à análises porosimétricas e/ou micromorfológicas

conclusão

5.1.2.2 Tensão de pré-adensamento

A Tabela 5.8 apresenta as tensões totais verticais geostáticas (σ_o), as tensões de préadensamento (σ_p) e os índices de compressão (C_c) do solo nas condições natural e inundada desde o início do ensaio. As tensões totais verticais geostáticas (σ_o) foram calculadas utilizando-se os pesos específicos naturais médios obtidos dos corpos de prova talhados para a realização dos ensaios.

	Prof.	Condição	Tensão Vertical	Tensão de	Índice de	
Amostra (Bloco)	média	de	Geostática	Pré-adensamento	Compressão	
(21000)	(m)	Umidade	(kPa)	(kPa)	C _c	
LV.	0.50	natural	7	95	0,721	
LVI	0,50	inundada		43	0,543	
IV.	1.60	natural	22	83	0,809	
L V 3	1,00	inundada		37	0,646	
I V-	3 20	natural	42	69	0,762	
L V 5	5,20	inundada		35	0,578	
I Va	4 70	natural	65	225	0,588	
LV7	ч,70	inundada		185	0,551	
I Vo	6 25	natural	90	274	0,585	
L V 9	0,25	inundada		169	0,505	
I V.	7.80	natural	113	224	0,605	
	7,00	inundada		139	0,580	
I V.	9.25	natural	136	290	0,588	
L V 13	1,25	inundada		179	0,502	

Tabela 5.8 – Tensões e índices de compressão obtidos nos ensaios simples e duplos (Perfil I)

Para melhor visualização, a Figura 5.15 mostra as variações desses valores ao longo da profundidade (perfil vertical).

Na parte superior da camada porosa (profundidade < 4,50 m) as menores tensões de préadensamento, nas condições natural e inundada, foram observadas para o material proveniente da profundidade de 3,20 m, enquanto que na parte inferior da camada (profundidades entre 4,50 m e 9,50 m) as menores tensões de pré-adensamento foram observadas para o material correspondente à profundidade de 7,80 m.

As tensões de pré-adensamento obtidas para os materiais no teor de umidade natural são maiores do que as tensões geostáticas, indicando um pré-adensamento do solo. Essa tensão de pré-adensamento deve ser entendida como uma tensão de cedência ou de pré-adensamento virtual, como sugerido por Vargas (1973), tendo em vista que ela é originada por mecanismos distintos daqueles que causam o pré-adensamento em solos saturados de origens sedimentares, típicos de regiões temperadas. Essas tensões de pré-adensamento são reduzidas quando o solo é inundado, mas elas são ainda maiores do que as tensões geostáticas, exceto para a amostra correspondente à profundidade de 3,20 m.



Figura 5.15 – Tensões geostáticas e de pré-adensamento e índices de compressão do solo – Perfil I

As maiores relações entre a tensão de pré-adensamento virtual e a tensão geostática ocorrem até 1,60 m de profundidade. Dentre os vários mecanismos que originaram este comportamento sobreadensado, a exposição do solo, desde a sua formação, aos ciclos de umedecimento e secagem deve ser um dos mais importantes. Observa-se, contudo, que entre 4,70 m e 6,25 m de profundidade essas relações voltam a aumentar indicando uma provável relação com as condições estruturais desses níveis (redução da microagregação).

Os índices de compressão, como podem ser vistos, também tendem a reduzir quando a amostra é inundada. Maiores variações são verificadas para as amostras dos níveis mais superficiais.

5.1.2.3 Colapsibilidade do solo

Na Tabela 5.9 estão apresentados os valores dos coeficientes de colapso estruturais obtidos nos ensaios simples e duplos até a tensão de 800 kPa.

Os coeficientes de colapso estruturais referentes aos ensaios edométricos simples, nos quais as amostras foram inundadas sob tensões conhecidas, foram calculados pela expressão:

$$I = \frac{\Delta e_c}{1 + e_i}$$

em que: $\Delta e_c =$ variação do índice de vazios devido a inundação;

 e_i = índice de vazios do solo antes da inundação.

Nos ensaios duplos, os coeficientes de colapso foram obtidos pelas expressões descritas a seguir:
$$I = \frac{\Delta e_{c}}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}}\right) \times e_{o(médio)}\right]}$$

em que:
$$\Delta e_{c} = \left[\left(\begin{array}{c} e_{nat} \\ e_{o(nat)} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} e_{inund} \\ e_{o(inund)} \end{array} \right) \right] \times e_{o(médio)} = \frac{e_{o(médio)}}{2} = \frac{e_{o(médio)}}{2}$$

sendo:

 $e_{nat} e e_{inund} =$ índice de vazios final do solo para uma determinada tensão aplicada (ensaio na umidade natural e inundado, respectivamente);

 $e_{o(nat)} e_{o(nund)} =$ índice de vazios inicial do solo para o ensaio na umidade natural e inundado, respectivamente.

<u>1</u> doela 5.7 - Coeffetences de Colapso estruturais (clisalos simples e duplos) - 1 erin 1																
Amostra	Prof. média (m)		Coeficiente de colapso estrutural - (%)													
		Ensaio	Tensão Vertical (kPa)													
			12,5	25	50	100	200	400	800							
LV_1	0.50	simples	-	1,75	3,43	4,81	3,97	17,00*	20,04*							
	0,50	duplo	0,83	1,86	2,89	4,64	4,69	2,75	0,57							
LV_3	1.60	simples	0,54	0,63	3,22	5,28	6,41	3,90	0,90							
	1,00	duplo	0,00	0,80	3,54	5,95	5,62	4,16	1,62							
IV	3,20	simples	0,73	0,87	5,68	6,12	5,44	3,83	1,78							
L V 5		duplo	0,72	1,21	2,76	3,72	3,34	1,83	0,00							
IV-	4,70	simples	0,11	0,20	0,24	1,82	3,04	2,01	1,34							
L v 7		duplo	-0,15	-0,02	-0,01	0,01	0,85	1,57	1,40							
LV9	6 25	simples	0,04	0,28	0,33	0,40	0,41	1,59	2,34							
	0,25	duplo	-0,12	-0,09	0,21	0,72	2,45	3,75	2,84							
LV ₁₁	7 80	simples	0,12	0,14	0,16	0,28	0,57	3,69	2,17							
	7,00	duplo	0,25	0,43	0,53	0,74	2,89	4,49	4,24							
LV ₁₃	9.25	simples	0,11	0,15	0,15	0,31	0,81	2,19	1,52							
	7,23	9,25	duplo	0,04	0,26	0,49	0,91	1,99	3,37	2,88						

Tabela 5.9 - Coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples e duplos) - Perfil I

Obs: Os valores negativos indicam expansão das amostras com a inundação

* ensaios realizados com perda de umidade inicial de aproximadamente 6%

Os valores dos coeficientes de colapso encontrados são considerados bastante expressivos, apontando que os materiais dos diferentes níveis do perfil estudado são sensíveis ao umedecimento.

As amostras correspondentes à parte mais superficial do perfil, profundidades de 0,50m a 3,20m, exibiram maiores coeficientes de colapso, valores entre 4,8% e 6,4%, que ocorreram para tensões entre 50 kPa e 200 kPa. Para os níveis mais profundos, de 6,25 m a 9,25 m, os maiores coeficientes de colapso, valores entre 3,4% e 4,5%, foram obtidos para tensões de 400 kPa e 800 kPa. Para a profundidade intermediária de 4,70 m, o maior coeficiente, valor de 3,0%, ocorreu para a tensão de 200 kPa.

Assim, verifica-se que os maiores colapsos, descartando alguma variação, estão associados aos maiores índices de vazios (profundidades entre 0,50 m e 3,20 m) e, para os maiores índices de vazios, as máximas deformações de colapso são promovidas pelas menores tensões.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 5.9 e Figura 5.15, exceto para a amostra LV_5 (profundidade de 3,20 m), constata-se que os maiores coeficientes de colapso encontrados para o perfil de solo nos ensaios simples e duplos estão vinculados às menores tensões de pré-adensamento natural e inundada, respectivamente.

A Tabela 5.9 mostra ainda que os coeficientes obtidos nos ensaios simples diferem, em muitos casos, daqueles obtidos nos ensaios duplos. Esses valores são fortemente afetados pelas características físicas iniciais dos corpos de prova (teor de umidade e índice de vazios). Mesmo assim, a Figura 5.16 revela que os coeficientes são praticamente maiores nos ensaios simples para as amostras dos níveis mais superficiais (profundidades < 4,5 m) e maiores nos ensaios duplos para as amostras dos níveis mais profundos (profundidades > 4,5 m).



Figura 5.16 - Comparação entre os coeficientes de colapso (ensaios simples e duplos) - Perfil I

As Figuras 5.17 e 5.18 comprovam, para todas as amostras estudadas, tanto nos ensaios simples quanto nos ensaios duplos, que o coeficiente de colapso tende a aumentar com as tensões aplicadas até atingir um valor máximo e então decresce até um mínimo para uma alta tensão aplicada.

As variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade, para as diferentes tensões aplicadas, são apresentadas nas Figuras 5.19 e 5.20. Observa-se a mesma tendência nos ensaios simples e nos ensaios duplos, evidenciando que os materiais mais superficiais, até aproximadamente 4,5 m de profundidade, manifestam comportamentos distintos dos materiais dos níveis inferiores, quando submetidos a diferentes carregamentos e inundação.



Figura 5.17 - Variações dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples) - Perfil I



Figura 5.18 - Variações dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios duplos) - Perfil I



Figura 5.19 - Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade (Perfil I) – ensaios simples



Figura 5.20 - Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade (Perfil I) – ensaios duplos

Se um índice de colapso de 2% for assumido como o limite entre solos colapsíveis e não colapsíveis, observam-se nas Figuras 5.19 e 5.20 que o colapso é importante, nesse solo, até aproximadamente a profundidade de 4,5 m e quando sujeito a tensões entre 50 kPa e 400 kPa.

Foram registradas deformações adicionais (colapso) consideráveis, para a amostra correspondente à profundidade de 6,25 m, somente a partir de uma tensão relativamente elevada, de 800 kPa, muito superior às tensões geostática e de pré-adensamento para essa profundidade, o que possivelmente deve se justificar pela microestrutura do material.

Os coeficientes de colapso estrutural em função das relações entre as tensões de inundação empregadas (σ_i) e as tensões de pré-adensamento natural (σ_{pn}) obedeceram às distribuições contidas na Figura 5.21.



Figura 5.21 – Coeficientes de colapso estrutural em função de (σ_i/σ_{pn}) para as amostras do Perfil I

Nessa figura, está evidente que os maiores coeficientes de colapso estruturais são comandados por (σ_i/σ_{pn}) entre 1,0 e 3,0, sendo as maiores relações, valores entre 2,5 e 3,0, obtidos para as amostras referentes às profundidades de 1,60 m e 6,25 m, respectivamente. A

máxima deformação de colapso (valor em torno de 6%), entretanto, é restrita por (σ_i/σ_{pn}) entre 1,5 e 2,5.

Os coeficientes de colapso (C), conforme Reginatto e Ferrero (1973), determinados a partir das curvas e x log σ_v obtidas nos ensaios edométricos duplos, representados em função da profundidade (Figura 5.22), permitem classificar o material da profundidade de 3,20m, de acordo com esses autores, como verdadeiramente colapsível (C < 0), ou seja, o solo sofreria colapso sem carregamento externo. Os materiais correspondentes aos demais níveis do perfil são classificados como condicionalmente colapsíveis (C < 1), isto é, a ocorrência do colapso dependerá do nível de tensão induzido pelo carregamento externo.

De fato, o solo da profundidade de 3,20 m, diferentemente dos demais níveis, quando inundado na tensão de 50 kPa (ensaio simples), tensão esta próxima à geostática (44 kPa), apresentou um coeficiente de colapso estrutural considerável de 5,7%, revelando ser este material colapsível, mesmo sem carregamento externo.



Figura 5.22 – Coeficiente de colapsibilidade do solo – Perfil I (REGINATTO; FERRERO, 1973)

5.1.3 Micromorfologia do Material Ensaiado (evolução da microestrutura sob carregamentos e inundação)

As características físicas dos 82 corpos de prova impregnados para a confecção das lâminas delgadas submetidas às análises micromorfológicas estão reunidas na Tabela 5.10.

Como já salientado, o índice de vazios e o teor de umidade iniciais dos corpos de prova afetam consideravelmente os valores das deformações volumétricas. Se essas características iniciais fossem aproximadamente iguais, as deformações por carga, para as condições antes e após colapso, provavelmente tenderiam a valores muito próximos. Essa situação, contudo, nem sempre ocorreu (Tabela 5.10). De qualquer modo, foi possível uma seleção para que se pudesse analisar o material, em diferentes condições, de forma comparativa.

As deformações por carga foram maiores do que por colapso, exceto para os corpos de prova que sofreram perda de umidade inicial (amostras LV_3 e LV_5).

O material mais superficial, profundidade média de 0,50m, na condição natural, como mencionado anteriormente, está em desequilíbrio, não apresentando estrutura característica típica microagregada e sim, uma estrutura em blocos poliédricos mais próxima daquela observada em perfis de Nitossolo Vermelho, como no Perfil II estudado. Essas modificações na estrutura original provavelmente ocorreram em função do uso e manejo da área. Por essa razão, apesar de ter sido analisado em lupa e microscópio óptico petrográfico, para todas as condições (natural, antes e após colapso) não será aqui apresentado e discutido, uma vez que não representa as características dessa classe de solos.

Serão descritas, na seqüência, as análises micromorfológicas efetuadas com auxílio de lupa binocular e microscópio óptico petrográfico para os demais níveis do perfil estudado.

	Corpo	Condição do material		Ens	aio edom	étrico	prova	Índice de vazios		Deformação Volumétrica		Micromorfologia	
Bloco (Prof.)	de			iniciai	s	finais		inundação		$\Delta V/Vo$ (%)		corpos de prova	
	P			n (%)	S _{ro} (%)	e _f	S _{rf} (%)	e _{ai}	e_{fi}	carga	colapso	$\gamma_d (kN/m^3)$	n (%)
T V	LV _{1A}	indeformado	1,712	63,1	49,2			-	-	-	-	10,99	63,1
(0.50m)	LV_{1B} **	antes colapso 100kPa	1,799	64,3	54,3	1,619	58,6	-	-	6,43	-	11,38	61,8
(0,0011)	LV _{1C}	após colapso 100kPa	1,722	63,3	56,7	1,453	89,1	1,577	1,453	5,33	4,81	12,15	59,2
	LV_{3A1}	indeformado	1,906	65,6	41,1			-	-	-	-	10,43	65,6
	LV_{3A2}	indeformado		65,8	40,6			-	-	-	-	10,35	65,8
LV ₃ (1,60m)	LV_{3A3}	indeformado		66,1	40,1			-	-	-	-	10,26	66,1
	LV _{3B} *	antes colapso 200kPa		66,3	39,9	1,891	40,2	-	-	2,63	-	10,48	65,4
	LV_{3C} *	após colapso 200kPa		65,3	41,7	1,354	94,2	1,771	1,354	3,85	15,05	12,87	57,5
	LV _{3D} *	após colapso 200kPa e recarregado até 400kPa	1,861	65,0	42,2	1,198	99,2	1,787	1,387	10,50	14,35	13,79	54,5
IV	LV_{4A}	indeformado	1,994	66,6	47,7			-	-	-	-	10,12	66,6
LV_4 (1.60m)	LV_{4B} **	antes colapso 200kPa	1,943	66,0	49,2	1,612	57,6	-	-	11,25	-	11,60	61,7
(1,0011)	LV _{4C} **	após colapso 200kPa	1,931	65,9	49,3	1,461	88,8	1,605	1,461	11,12	5,53	12,31	59,4
	LV _{5A}	indeformado	2,165	68,4	38,4			-	-	-	-	9,70	68,4
IV	LV _{5E} *	carregado até 50kPa	2,272	69,4	36,4	2,203	36,8	-	-	2,11	-	9,58	68,8
(3.20m)	$LV_{5B}*$	antes colapso 100kPa	2,479	71,3	33,5	2,240	36,9	-	-	6,87	-	9,48	69,1
(3,2011)	$LV_{5C}*$	após colapso 100kPa	1,989	66,5	41,7	1,675	90,7	1,923	1,675	2,21	8,48	11,48	62,6
	LV _{5D} *	após colapso 100kPa e recarregado até 200kPa	1,905	65,6	43,7	1,283	99,8	1,816	1,471	10,67	12,25	13,45	56,2
IV	LV_{6A}	indeformado	1,986	66,5	48,1			-	-	-	-	10,28	66,5
(3,20m)	LV _{6B} **	antes colapso 100kPa	2,121	68,0	44,6	1,914	46,8	-	-	6,63	-	10,54	65,7
	LV_{6C} **	após colapso 100kPa	2,110	67,8	45,1	1,705	87,8	1,873	1,705	7,62	5,85	11,35	63,0

Tabela 5.10 - Características físicas dos corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas - Perfil I

* ensaios edométricos realizados exclusivamente para as análises micromorfológicas
 ** ensaios edométricos realizados exclusivamente para as análises micromorfológicas e porosimetria

continua

Bloco (Prof.)	C	Condição do material		Ens	aio edom	étrico		Índice de vazios		Deformação		Micromorfologia		
	Corpo			acterísti	cas dos co	rpos de	prova	antes	e após	Volumétrica		Características dos		
	ue			iniciais			finais		inundação		Vo (%)	corpos de prova		
	prova			n (%)	S_{ro} (%)	ef	S_{rf} (%)	e _{ai}	e _{fi}	carga	colapso	$\gamma_{\rm d}$ (kN/m ³)	n (%)	
LV	LV _{7A}	indeformado	1,594	61,4	58,0			-	-	-	-	11,68	61,4	
	LV_{7B}^{*}	antes colapso 200kPa	1,593	61,4	58,0	1,462	61,5	-	-	5,05	-	12,31	59,4	
	LV _{7C} *	após colapso 200kPa	1,927	65,8	48,0	1,457	92,9	1,563	1,457	12,44	4,14	12,33	59,3	
LV_7 (4.70m)	LV_{7D}	após colapso 200kPa e recarregado até 800kPa		61,8	56,4	1,066	97,6	1,466	1,391	19,47	3,04	14,67	51,6	
(4,70111)	LV_{7E}	antes colapso 800kPa		60,7	60,0	1,164	76,6	-	-	15,00	-	14,00	53,8	
	LV_{7F}	após colapso 800kPa		60,5	60,7	1,065	100,0	1,093	1,065	17,24	1,34	14,50	52,2	
	LV_{7G}	após colapso 400kPa e recarregado até 800kPa	1,429	58,8	63,9	1,113	97,4	1,288	1,242	11,56	2,01	14,34	52,7	
τV	LV_{8A}	indeformado	1,742	63,5	52,9			-	-	-	-	11,05	63,5	
(4,70m)	LV_{8B} **	antes colapso 200kPa	1,776	64,0	51,9	1,566	56,5	-	-	7,56	-	11,81	61,0	
	LV _{8C} **	após colapso 200kPa	1,789	64,1	51,8	1,486	88,6	1,588	1,486	7,21	3,94	12,19	59,8	
	LV _{9A}	indeformado	1,511	60,2	60,8			-	-	-	-	12,27	60,2	
LV ₉	LV _{9B} *	antes colapso 800kPa	1,587	61,3	57,2	1,179	74,8	-	-	15,77	-	14,13	54,1	
(6,25m)	LV _{9C} *	após colapso 800kPa	1,544	60,7	58,7	1,116	96,4	1,167	1,116	14,82	2,35	14,56	52,7	
	LV _{9D} *	após colapso 800kPa e recarregado até 1600kPa	1,500	60,0	60,5	0,998	99,8	1,198	1,143	18,85	2,50	15,42	49,9	
	LV_{11A1}	indeformado	1,697	62,9	55,7			-	-	-	-	11,42	62,9	
	LV_{11A2}	indeformado	1,593	61,4	59,4			-	-	-	-	11,88	61,4	
	LV_{11E}	carregado até 800kPa	1,621	61,8	60,7	1,245	76,1	-	-	14,35	-	13,72	55,5	
LV_{11}	LV_{11F}	inundado 1,25kPa e carregado até 800kPa	1,675	62,6	57,8	1,196	93,8	1,673	1,676	18,01	-0,11	14,03	54,5	
(7,80m)	LV _{11G}	após colapso 800kPa	1,654	62,3	58,5	1,206	92,9	1,255	1,206	15,03	2,17	13,78	55,3	
	LV_{11B} *	antes colapso 400kPa	1,644	62,2	58,6	1,440	64,9	-	-	7,72	-	12,62	59,0	
	LV _{11C} *	após colapso 400kPa	1,627	61,9	59,7	1,338	91,2	1,397	1,338	8,76	2,46	13,17	57,2	
	LV _{11D}	após colapso 400kPa e recarregado até 800kPa	1,686	62,8	57,1	1,220	92,9	1,466	1,375	14,72	3,69	13,87	55,0	
	LV _{13A1}	indeformado	1,691	62,8	63,2			-	-	-	-	11,22	62,8	
T T 7	LV _{13A2}	indeformado	1,756	63,7	60,9			-	-	-	-	10,96	63,7	
LV_{13}	LV _{13B} *	antes colapso 400kPa	1,675	62,6	63,9	1,554	67,2	-	-	4,52	-	11,82	60,8	
(9,25m)	LV _{13C} *	após colapso 400kPa	1,693	62,9	63,2	1,505	91,6	1,563	1,505	4,83	2,26	12,06	60,1	
	LV _{13D} *	após colapso 400kPa e recarregado até 800kPa	1,706	63,0	62,7	1,400	89,0	1,606	1,553	9,69	2,03	12,58	58,3	

Tabela 5.10 – Características físicas dos corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas – Perfil I (Continuação)

* ensaios edométricos realizados exclusivamente para as análises micromorfológicas
 ** ensaios edométricos realizados exclusivamente para as análises micromorfológicas e porosimetria

conclusão

As Pranchas I, II, III, IV, V, e VI mostram, de forma comparativa, nos aumentos julgados mais convenientes para cada caso, as modificações na estrutura do solo provocadas pelos carregamentos e inundação, a partir da condição natural (material indeformado).

Material – profundidade 1,45 a 1,75 m (Horizonte Bw)

As análises micromorfológicas realizadas em lupa binocular e em microscópio óptico sobre lâminas delgadas, mostram (Foto 1 - Prancha I) que o material do solo, a 1,60 m de profundidade, é predominantemente constituído por microagregados (M) de formas arredondadas a subarredondadas, e por uma elevada porosidade intermicroagregados (porosidade de empilhamento composto), altamente comunicante. Os microagregados são constituídos por plasma argilo-férrico, de cor vermelho escura, orlados por uma estreita faixa de plasma vermelho mais claro (amarelo ou alaranjado, em luz polarizada). Os grãos do esqueleto (fração areia) são constituídos por minerais escuros (ilmenita, magnetita) e quartzo (Q) e estão encrustados no plasma. Os microagregados têm dimensões variadas desde muito pequenos, em torno de 100 µm, até os maiores, que variam entre 200 µm e 400 µm, chegando em alguns casos a até 700 µm, estes últimos com formas bem arredondadas.

Em lâmina delgada, nessas áreas de plasma microagregado (Foto 2 - Prancha I), são freqüentes as cavidades (CV) ovaladas ou circulares (secções de tubos ou canais), resultantes de atividade biológica. Geralmente as cavidades ovaladas são maiores, variando entre 2000µm e 4000 µm. Algumas cavidades estão parcialmente preenchidas por microagregados menores do que os das áreas vizinhas. As cavidades são delimitadas, grosso modo, por uma borda de plasma contínuo. Essa organização do plasma decorre, provavelmente, como já referido, de esforços gerados pelo desenvolvimento de raízes e passagem de animais.

Em algumas zonas observa-se a coalescência dos microagregados em vários graus, que aparecem soldados pelo plasma vermelho mais claro, apresentando localmente um fechamento parcial da porosidade intermicroagregada (Foto 3 - Prancha I). Esses setores podem passar gradualmente para zonas contínuas de plasma.

As zonas de plasma contínuo ocorrem com menor freqüência. No seu interior, a porosidade é preferencialmente constituída por cavidades menores e de formas irregulares. Está associado a essas zonas o desenvolvimento de microfissuras paralelas e curvas. Os grãos do esqueleto, com dimensões aproximadas de 50 µm a 200 µm, compostos por grãos irregulares e angulosos de minerais escuros e quartzo (areia fina), estão aí mais concentrados.

A organização do material é, desta forma, caracteristicamente, pórfiro-enáulica.

Na condição anterior ao colapso (carregamento até 200 kPa, sem inundação do corpo de prova), observa-se que os macroporos (dimensões superiores a 2000 μ m) se deformam, passando da forma ovalada para a forma irregular. Os poros menores do que 1000 μ m, em geral, se mantêm, principalmente quando estão em áreas microagregadas, mas de aspecto contínuo (microagregados soldados uns aos outros), com porosidade interagregados mais fechada. Os microagregados não se apresentam deformados, estão soldados (arranjo microagregado contínuo), com aspecto geral muito semelhante à amostra indeformada, como ilustra a Foto 4 – Prancha I, a estrutura de base permanece pórfiro-enáulica. Os dados de porosidade total comprovam essas observações: na amostra do solo original a porosidade total era de 66%, na amostra após carregamento ela ainda alcança 65%.

Só após o colapso (carregamento até 200 kPa, com inundação) ocorre, como visualizada na Foto 5 – Prancha I, uma redução significativa da porosidade (passa para 58%). Nessa condição, a deformação afeta também os poros interagregados, promovendo em alguns casos a sua oclusão. Resultam assim, poros alongados, estreitos e curvos; passam a predominar zonas de plasma contínuo ao lado de zonas com forte coalescência dos microagregados. Aqui os poros perderam a conectividade e constituem agora uma porosidade preferencialmente cavitária. Há evidência de esmagamento de bordas (orientação do plasma) e o aparecimento, nas áreas de contato entre os microagregados, de fendas curvas (vazios alongados), às vezes paralelas, às vezes perpendiculares (à superfície – plano de aplicação do carregamento). Em algumas áreas, os microagregados ainda se mantêm como os originais, apresentando uma porosidade intermicroagregada comunicante. Essa nova morfologia indica, provavelmente, que a entrada da água não ocorreu de forma homogênea.

A estrutura de base passa a ser preferencialmente porfirogrânica e só localmente enáulica.

Observações efetuadas para esse material após colapso na tensão de 200 kPa e recarregamento até 400 kPa, mostram (Foto 6 – Prancha I) que o material se apresenta com aspecto predominantemente contínuo, no interior do qual se distinguem zonas com maior porosidade, constituídas por poros cavitários ou interagregados, mas fracamente comunicantes. Verifica-se uma tendência ao alongamento dos poros (estiramento) e uma distribuição ao longo de linhas paralelas entre si. Observa-se, também, a presença de macroporos de formas irregulares. O aspecto do plasma, em termos de cor, é mais homogêneo: o soldamento maior dos microagregados reduz as faixas mais amareladas das bordas. Constata-se, também, uma porosidade geral ainda importante (55%), parte intercomunicante e parte sem conexão. A orientação do plasma em torno dos grãos do esqueleto é mais evidente e abundante do que no caso anterior. As fissuras são curtas, curvas, irregulares, descontínuas, sendo mais freqüentes nos contatos entre os microagregados, acompanhando suas bordas. Em algumas (poucas) áreas a estrutura ainda aparece microagregada contínua. No entanto, apesar de apresentar os microagregados, estes estão soldados entre si mantendo uma porosidade importante, mas essencialmente do tipo cavitária. A estrutura de base torna-se caracteristicamente porfirogrânica.

PRANCHA I

LATOSSOLO VERMELHO distroférrico - Profundidade de 1,60m

Foto 1 - Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Aspecto geral da organização em microagregados granulares (M) e da porosidade interagregados (poros de empilhamento composto - V), com presença de grãos de esqueleto (minerais escuros e quartzo - Q). **Foto 2 – Solo natural (60x)** (microscopia óptica – luz polarizada)

Zona microagregada com presença de cavidade ovalada (CV), resultante de atividade biológica, delimitada por uma borda de plasma contínuo.

Foto 3 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Coalescência dos microagregados em vários graus, que aparecem soldados pelo plasma vermelho mais claro, apresentando um fechamento parcial da porosidade intermicroagregada.

Foto 4 – Material antes do colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

O aspecto geral do material é muito semelhante à amostra natural (indeformada). Observa-se apenas uma deformação dos macroporos, passando da forma ovalada para a forma irregular.

Foto 5 – Material após colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Fechamento significativo da porosidade interagregados (poros alongados, estreitos e curvos), com predomínio de zonas de plasma contínuo ao lado de zonas com forte coalescência dos microagregados.

Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Material com aspecto predominantemente contínuo. Há um soldamento maior dos microagregados tornando o plasma mais homogêneo, em termos de cor. Os poros são preferencialmente cavitários. As fissuras são curvas e irregulares, sendo mais freqüentes nos contatos entre os microagregados, acompanhando suas bordas.













Material – profundidade 3,05 a 3,35 m (Horizonte Bw)

A estrutura do material indeformado (Foto 1 – Prancha II), é, a essa profundidade, mais aberta do que aquelas dos níveis superiores (porosidade de 68%), mas possui, contudo, algumas áreas onde o plasma é mais contínuo, resultante da aglutinação de microagregados, tendo no seu interior uma porosidade cavitária fracamente comunicante e algumas fissuras finas irregulares, que em geral aproveitam os limites dos agregados anexados. Os microagregados são, também, constituídos por plasma vermelho escuro, em geral isótico, orlado por uma faixa de plasma mais claro (vermelho alaranjado ou vermelho amarelado), Foto 2 – Prancha II, que é mais larga do que aquela observada para o nível anterior, e que se apresenta argilassépico. O plasma vermelho mais claro origina pontes com outros microagregados, Foto 3 – Prancha II, resultando em um aspecto de estrutura microagregada contínua, como já observado à profundidade de 1,60m. Há presença abundante de microagregados de pequenas dimensões, mas ligeiramente arredondados em grande parte, constituídos por plasma argilassépico.

A estrutura, em geral, é pórfiro-enáulica. Os grãos do esqueleto são constituídos essencialmente de minerais escuros, subarredondados a angulosos, que estão incluídos nos microagregados e no plasma contínuo. Já se verifica a orientação do plasma ao redor de alguns grãos do esqueleto, mas são raros. Também apresenta poros tubulares como na profundidade de 1,60 m, com zonas de plasma adensado no entorno.

Ao ser carregado até 100 kPa, momento antes do colapso, as características do material indeformado praticamente se mantêm: apresenta zonas mais contínuas e zonas mais abertas.

A estrutura permanece microagregada com borda de plasma em torno. A porosidade ainda é grande (n = 66%); as modificações não são suficientes para alterar as características originais do material (Foto 4 – Prancha II). Não se observam modificações nas formas dos microagregados. As alterações são de ordem macroscópica e mesoscópica.

Algumas fendas, principalmente verticais e oblíquas a uma das superficies, aparecem e isolam volumes de agregados – torrões (1000 μ m–2000 μ m). As fendas macroscópicas delimitam os agregados e não possuem um padrão regular de distribuição e/ou geométrico. A abertura não é constante e surgem microagregados soltos no meio.

Na condição após colapso na tensão de 100 kPa, há uma forte redução da porosidade interagregados, com desenvolvimento de zonas de plasma contínuo resultante deste fechamento e o desenvolvimento da porosidade cavitária, fracamente comunicante. A porosidade total é reduzida a 63%. Os agregados estão justapostos, soldados pelo plasma mais claro. O plasma se apresenta argilassépico. Esse tipo de arranjo (Foto 5 – Prancha II) é dominante na lâmina. Em alguns locais ainda persiste uma porosidade comunicante interagregados, mas são raros. Ocorre a manutenção de alguns tubos, uns vazios e outros preenchidos. Há o aparecimento de fissuras curtas e finas nas áreas de soldamento dos microagregados. As observações em lupa mostram o desenvolvimento das fendas preferencialmente paralelas, com paredes conformes e uma abertura, grosso modo, regular ao longo da extensão.

Após colapso na tensão de 100 kPa e recarregamento até 200 kPa, há o aparecimento de fissuras finas também em outras áreas. O plasma é argilassépico, mas apresenta setores com orientações estriadas (massépico) relativamente fracas. No sítio selecionado (Foto 6 – Prancha II), essa orientação do plasma aparece na junção dos agregados. Há maior número de fissuras paralelas que aproveitam os contornos dos agregados, independentemente dos tamanhos. A porosidade total do material, para essa condição, é de 56%. Da mesma forma que no nível anterior, a estrutura de base pórfiro-enáulica com o predomínio de arranjo enáulico, característica do material indeformado, se transforma ao longo do desenvolvimento do colapso em uma estrutura de base preferencialmente porfirogrânica, principalmente após colapso e recarregamento.

PRANCHA II

LATOSSOLO VERMELHO distroférrico - Profundidade de 3,20m

Foto 1 - Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Estrutura microagregada mais aberta do que aquelas dos níveis superiores. Os microagregados são grandes e pequenos (mais abundantes). Foto 2 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Microagregados constituídos por plasma vermelho escuro, orlados por uma faixa de plasma mais claro (vermelho alaranjado ou vermelho amarelado), que é em geral mais larga do que aquela observada para o nível anterior. **Foto 3 – Solo natural (120x)** (microscopia óptica – luz polarizada)

O detalhe da Foto 2 mostra que o plasma vermelho mais claro gera pontes com outros microagregados, resultando num aspecto de estrutura microagregada contínua.

Foto 4 – Material antes do colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

As modificações ocasionadas na estrutura do material, pelo carregamento, não são perceptíveis em nível microscópico. Observa-se uma zona microagregada com uma porosidade ainda elevada e o aparecimento de fenda macroscópica somente visível em lupa.

Foto 5 – Material após colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Verifica-se uma forte redução da porosidade interagregados, com desenvolvimento de zonas de plasma contínuo com porosidade cavitária, fracamente comunicante. Os microagregados estão justapostos, soldados pelo plasma mais claro.

Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Nessa condição, há uma transformação na estrutura de base do material. Ocorre um fechamento maior da porosidade, com o aparecimento de fissuras finas que aproveitam os contornos dos agregados, independente dos tamanhos. Há ainda orientação do plasma na junção dos microagregados.













Material – profundidade 4,55 a 4,85 m (horizonte Bw)

A partir de aproximadamente 4,5m, as proporções relativas entre plasma microagregado e plasma contínuo, no material indeformado, se alteram. O plasma contínuo surge com mais freqüência, entremeado por zonas microagregadas. Essa variação na organização do plasma implica também em variação na porosidade, tanto na quantidade de poros quanto nos tipos.

A passagem entre o plasma contínuo e o microagregado (Foto 1 – Prancha III), não é brusca - ocorrem diferentes estágios de evolução. O plasma contínuo evolui para um plasma microdividido por fissuras finas e curtas (porosidade fissural e cavitária), Foto 2 – Prancha III, passando para zonas onde se destacam volumes arredondados (sem separação física) - as "nodulações", com porosidade essencialmente cavitária. Essas áreas tendem a evoluir para zonas microagregadas com porosidade de empilhamento composto comunicante. A porosidade total do material é de 62%, menor, portanto, do que a das amostras mais superficiais.

Essas "nodulações" também se constituem de plasma vermelho escuro e se individualizam no interior do plasma vermelho mais claro (Foto 3 – Prancha III). Os microagregados, a exemplo dos níveis superiores, são constituídos por plasma vermelho escuro orlado por uma faixa de plasma vermelho amarelado, que aqui é mais abundante e, interligados entre si por pontes desse plasma.

Em relação aos materiais indeformados mais próximos da superfície, nessa profundidade em torno de 4,5 m, as bordas dos microagregados são mais largas (amareladas) e começam a aparecer zonas com concentrações diferenciadas de ferro.

A estrutura de base permanece pórfiro-enáulica, porém, com predomínio crescente da fase porfirogrânica em relação à fase enáulica.

Ao ser carregado, progressivamente até a tensão de 200 kPa (sem inundação), observase (Foto 4 – Prancha III) que praticamente não há modificação da organização em relação à amostra indeformada, apenas se verifica um pequeno fechamento da macroporosidade. A porosidade total do material se reduz muito pouco, passando a 61%. Apresenta, todavia, um aumento na ocorrência de orientações estriadas do plasma em torno dos grãos maiores do esqueleto (estrutura plásmica granossépica). Ocorrem maiores deformações das bordas do plasma (parte mais clara), permanecendo a parte central (mais escura) mais estável, se comportando praticamente como grãos.

As lâminas analisadas para este material carregado até 200 kPa e inundado (após colapso) mostram na Foto 5 – Prancha III, o desaparecimento quase por completo das zonas microagregadas com porosidade de empilhamento composto comunicante. A porosidade é reduzida para 59%, sendo em grande parte cavitária, parcialmente conectada. Em geral, o material possui zonas nas quais ocorreu o esmagamento dos microagregados e, zonas de plasma microagregado ainda preservadas. Aparentemente os microagregados estão mais encaixados, originando a formação de faces planas nos contatos. Nas junções há orientação estriada do plasma. Em alguns contatos o plasma mais claro já não aparece, em outros sim. Observa-se em algumas zonas uma tendência de alinhamento em aproximadamente 45° dos vazios, das faces dos microagregados e orientação do sistema de fissuras (alongadas). Há o desenvolvimento de fissuras nas áreas de plasma contínuo.

Após colapso na tensão de 200 kPa e recarregamento até 800 kPa, as análises mostram, Foto 6 – Prancha III, que a estrutura do material é praticamente contínua, caracteristicamente porfirogrânica, tendo também em seu interior algumas zonas microagregadas. Ocorre grande fechamento da porosidade (52%), agora essencialmente cavitária. Nas zonas microagregadas, os agregados antes arredondados, perdem esse formato e adquirem formas mais quadradas ou retangulares. Quase não apresentam bordas claras, provavelmente em virtude de esmagamentos. Nas zonas contínuas são visualizadas grandes deformações dos microagregados, com forte orientação do plasma (estrutura plásmica bimassépica).

PRANCHA III

LATOSSOLO VERMELHO distroférrico – Profundidade de 4.70m

Foto 1 - Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Presença de zona contínua, com redução significativa da porosidade, e de zona microagregada. com alta porosidade (empilhamento composto).

Foto 2 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zona de plasma contínuo microdividido por fissuras, evoluindo para um plasma microagregado, onde se destacam volumes arredondados.

Foto 3 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz natural)

Passagem gradual de zona contínua para microagregada onde se observam volumes arredondados constituídos de plasma vermelho mais escuro que emergem do plasma vermelho amarelado.

Foto 4 – Material antes do colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Após carregamento ocorrem poucas modificações da organização em relação à amostra indeformada. Observa-se um pequeno fechamento da macroporosidade em áreas microagregadas e deformações das bordas do plasma (parte mais clara), sendo a parte central (mais escura) mais estável, se comportando como grãos.

Foto 5 – Material após colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Após colapso há uma redução da porosidade em zonas microagregadas, que antes se altamente comunicante apresentava passando agora a parcialmente comunicante (preferencialmente cavitária).

Os microagregados estão mais encaixados, com tendência de alinhamento em ≈45° com a horizontal.

Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

A estrutura se apresenta praticamente contínua, com grande fechamento da porosidade, agora essencialmente cavitária. Ocorrem grandes deformações dos microagregados, passando da forma arredondada para a forma mais poliédrica. O alinhamento principalmente dos grãos escuros torna-se mais evidente.













Material – profundidade 6,10 a 6,40 m (Horizonte Bw)

O material do solo, no seu estado indeformado exibe características semelhantes àquelas do material do nível anterior (Foto 1 – Prancha IV). Aparentemente possui mais fissuras (Foto 2 – Prancha IV). Apresenta zonas de material microagregado de formas ovalares e arredondadas dentro do plasma contínuo. A porosidade total é de 60% e constituída por fissuras (porosidade fissural) – micro, meso e macroscópicas, diminuindo a participação da porosidade interagregados e porosidade cavitária (plasma contínuo e/ou com "nodulações" – Foto 3, Prancha IV).

Antes do colapso, material carregado até a tensão de 800 kPa, há uma modificação na geometria dos microagregados, que passam da forma arredondada para formas poliédricas, quadrangulares e/ou retangulares (Foto 4 – Prancha IV), criando uma espécie de mosaico. O fechamento da porosidade, agora de 54%, provoca o estiramento dos poros, tornando-os alongados. Existem, contudo, áreas de microagregados preservadas, com porosidade de empilhamento composto comunicante. Nas zonas contínuas aparecem fissuras obliquas (45°) e outras.

Após colapso na tensão de 800 kPa, no geral as feições de esmagamento são mais evidentes, com a presença de microagregados de forma poliédrica retangular (Foto 5 – Prancha IV). Nas áreas deformadas de plasma observa-se a oclusão de vazios e a abertura de fissuras. A porosidade total apresentada pelo material é de 53%.

Após colapso na tensão de 800 kPa e recarregamento até 1600 kPa (Foto 6 – Prancha IV), aparecem zonas onde o plasma é mais contínuo (homogêneo), com fraca e/ou porosidade nula, e outras onde o plasma se apresenta com porosidade maior. Verifica-se inclusive a abertura de fissuras e fendas. Nessa condição, a porosidade total do material é de 50%.

PRANCHA IV

LATOSSOLO VERMELHO distroférrico - Profundidade de 6,25 m

Foto 1 - Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Presença de zona de material microagregado de formas arredondadas dentro do plasma contínuo.

Foto 2 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Nesse nível existem setores no qual o material aparentemente possui mais fissuras.

Foto 3 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zona de plasma contínuo com nodulações

Foto 4 – Material antes do colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Os microagregados passam da forma arredondada para formas poliédricas.

Foto 5 – Material após colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

As feições de esmagamento são mais evidentes. Os microagregados assumem formas poliédricas Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zonas mais homogêneas de plasma

contínuo.













Material – profundidade 7,65 a 7,95 m (Horizonte Bw)

Numa visão geral, o material é constituído por zonas nas quais domina um plasma contínuo e outras em que domina um plasma microagregado (Foto 1 – Prancha V). Nas zonas microagregadas com porosidade interconectada de empilhamento composto, os microagregados apresentam, como tem sido observado ao longo do perfíl, volumes arredondados ou ovalados, mas sem bordas e de maior tamanho, com 500 µm ou mais de diâmetro. Há grande pedoturbação (fluxo de água/ atividade biológica ou associada); os poros têm seção ovalada (tubos), alguns preenchidos e outros vazios, comumente, próximos.

A essa profundidade é interessante observar que em alguns setores os microagregados praticamente não se tocam, como se estivessem soltos na massa de solo (as conexões entre eles ocorrem em poucos pontos), com uma porosidade de empilhamento muito aberta, como se verifica na Figura 5.23.



Figura 5.23 - Solo natural: zona microagregada com porosidade muito aberta - Perfil I (prof. 7,80m)

Em outras áreas onde a porosidade é mais fechada, o plasma (mais claro) envolve volumes microagregados, propiciando um aspecto mais contínuo e com variações para mais e

menos denso - desenvolvimento de "nodulações" (Fotos 2 e 3 – Prancha V). Em zonas de plasma contínuo aparecem setores enriquecidos em ferro, com tons mais escuros, com porosidade cavitária, mas sem indicar nodulação. Aí ocorrem orientações plásmicas do tipo bimassépica e os poros são alongados, estreitos e orientados, além da presença de fissuras finas.

A porosidade total do material é de 63%, portanto, maior do que aquela apresentada para os níveis intermediários (profundidades médias de 4,70 m e 6,25 m).

Antes do colapso, material carregado até a tensão de 400 kPa, há uma redução da porosidade microagregada, mas alguns poros permanecem ainda abertos e preenchidos por microagregados. Outras zonas apresentam-se mais contínuas, com os microagregados justapostos (feição de esmagamento), com formas mais geométricas e poros oblíquos e alongados ($\approx 45^{\circ}$) como se observa na Foto 4 – Prancha V.

A porosidade total passa para 59%. Nas zonas contínuas percebe-se uma tendência de orientação (alinhamento) dos grãos de quartzo, e o aparecimento de uma série de fissuras finas (linhas vermelhas em luz natural).

Após colapso (tensão de 400 kPa) predominam zonas de plasma contínuo com cavidades pequenas (porosidade cavitária), com porosidade total de 57%. Apresenta-se mais homogêneo, de cor vermelho vivo. As zonas microagregadas mostram-se esmagadas entre áreas contínuas (Foto 5 – Prancha V).

Após colapso na tensão de 400kPa e recarregamento até 800kPa, os microagregados estão colados (soldados), evidenciando esmagamentos, estiramentos dos poros e alinhamento de grãos de quartzo. No detalhe (Foto 6 – Prancha V), é visualizada a organização do plasma; em algumas zonas aparecem estrias em treliça (estrutura plásmica latissépica) e em outras as fissuras são sinuosas, acompanhando os limites dos microagregados que estão soldados. Apresenta agora uma porosidade total de 55%.

PRANCHA V

LATOSSOLO VERMELHO distroférrico - Profundidade de 7,80 m

Foto 1 - Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Setor no qual domina um plasma contínuo com outro setor de plasma microagregado. As fissuras são retas em duas direções. Foto 2 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Desenvolvimento de nodulações

Foto 3 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz natural)

Desenvolvimento de nodulações

Foto 4 – Material antes do colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zonas contínuas com microagregados justapostos – feições de esmagamentos com com formas mais geométricas e poros alongados $\approx 45^{\circ}$

Foto 5 – Material após colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zona microagregada esmagada entre áreas contínuas

Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Presença de fissuras sinuosas que acompanham os microagregados.













Material – profundidade 9,10 a 9,40 m (horizonte de transição BwC)

Esse horizonte de transição entre o material pedologicamente evoluído e o material de alteração de basalto é caracterizado, amostra indeformada (Foto 1 – Prancha VI), por zonas de plasma contínuo e algumas já com o desenvolvimento de "nodulações" (Fotos 2 e 3 – Prancha VI) tendo ao lado fragmentos de basalto em diversos graus de alteração, em proporções aproximadamente iguais. Em alguns setores predomina o alteroplasma (material resultante da alteração dos minerais constituintes da rocha, com alta anisotropia em função das diferentes fases mineralógicas presentes), e em outros o pedoplasma (mais homogêneo, portanto, com menor grau de anisotropia). Os fragmentos de rocha incluindo zonas de alteroplasma podem chegar a mais de 2000µm de comprimento e as zonas de pedoplasma tendem a se localizar entre eles. A passagem do alteroplasma para o pedoplasma se faz de forma gradual e/ou abrupta. A porosidade é preferencialmente cavitária (pequenas cavidades) fracamente conectada a não conectada, havendo também presença de fissuras finas tanto nas zonas de pedoplasma contínuo como nos contatos plasma/fragmentos de rocha alterados.

Após carregamento, antes do colapso, dada a grande heterogeneidade do material (fragmentos de rocha, alteroplasma e pedoplasma), torna-se difícil o acompanhamento das transformações nos arranjos dos materiais. Aparentemente a organização nas áreas de pedoplasma (Foto 4 – Prancha VI), é afetada com discreto fechamento da porosidade interagregada e o desenvolvimento poros alongados.

Após colapso, o estiramento de poros é um pouco mais acentuado nos setores de pedoplasma, apresentando feições de esmagamento de agregados (alinhamentos oblíquos das "nodulações") e desenvolvimento de fissuras finas, oblíquas (Foto 5 – Prancha VI).

Após colapso e recarregamento observa-se o fechamento da porosidade no pedoplasma, o qual se torna essencialmente contínuo, e o aparecimento de fissuras curvas acompanhando os núcleos mais densos (nodulações), como visualizado na Foto 6 – Prancha VI.

PRANCHA VI

LATOSSOLO VERMELHO distroférrico - Profundidade de 9,25 m

Foto 1 - Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Setor de pedoplasma contínuo no centro com zonas de alteroplasma nas laterais.

Foto 2 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zonas com desenvolvimento de nodulações

Foto 3 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zonas com desenvolvimento de nodulações

Foto 4 – Material antes do colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zonas com fechamento discreto da porosidade

Foto 5 – Material após colapso (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Feições de esmagamento dos agregados com alinhamentos oblíquos das nodulações.

Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Aparecimento de fissuras curvas acompanhando os núcleos mais densos (nodulações).













5.1.4 Porosimetria do Material Ensaiado

A Tabela 5.11 reúne as características físicas dos corpos de prova do material até 4,70m, natural e ensaiado, submetidos aos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Os valores da porosidade do solo obtidos através dos ensaios de porosimetria são sistematicamente inferiores àqueles obtidos para a condição final dos ensaios edométricos, chegando a atingir valores de até 53%, como ocorreu para a amostra indeformada correspondente à profundidade de 1,60 m.

Os pesos específicos dos sólidos são também muito inferiores àqueles determinados pelo método do picnômetro, com valores em torno de 20 kN/m³ para todas as profundidades. Além disso, esses valores variam para uma mesma amostra (bloco).

Isso mostra de fato, como já salientado anteriormente, que o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio é capaz de medir somente a porosidade efetiva do material e não a porosidade real.

Se, por outro lado, a porosidade for calculada tomando o valor de γ_d obtido no ensaio de porosimetria e γ_s determinado pelo método do picnômetro, esses valores se aproximam bastante daqueles obtidos para os corpos de prova dos ensaios edométricos, em média 93%.

Desta forma, pode-se deduzir que, se a amostra analisada for representativa do corpo de prova talhado (indeformado ou ensaiado em edômetro), apenas 7%, em média, dos poros são inacessíveis ao mercúrio. Entretanto, não é possível concluir se essa porcentagem é também inacessível à água.

As curvas das porcentagens de poros em relação ao volume de vazios total da amostra (exceto os inacessíveis) e histogramas de freqüência *versus* diâmetro dos poros (Figuras 5.24 a 5.31), mostram os resultados das análises porosimétricas efetuadas para as três situações: amostra indeformada, antes do colapso (carregada) e após colapso (carregada e inundada).

Bloco (Prof.)		Condição do material	Ensaio Edométrico										Ensaio de Porosimetria				
	Corpo			Carac	terística	s finais	5	Características dos corpos de prova									
	de prova		$\gamma_{ m d}$	$\gamma_{s}^{(1)}$	ei	ni	S _{ri}	$\gamma_{ m d}$	e _f	n _f	S _{rf}	$\gamma_d^{(2)}$	$\gamma_{s}^{(2)}$	n _e ⁽²⁾	n _c ⁽³⁾		
			(kN/m^3)	(kN/m^3)		(%)	(%)	(kN/m^3)		(%)	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)	(%)	(%)		
LV ₁ (0,50m)	LV_{1A}	indeformado	10,99	29,8	1,712	63,1	49,2	10,99	1,712	63,1		12,26	22,84	46,3	58,9		
	LV_{1B}	antes colapso 100kPa	10,65	29,8	1,799	64,3	54,3	11,38	1,619	61,8	58,6	12,61	20,75	39,3	57,7		
	LV_{1C}	após colapso 100kPa	10,95	29,8	1,722	63,3	56,7	12,15	1,453	59,2	89,1	13,85	26,59	47,9	53,5		
LV ₄ (1,60m)	$\mathrm{LV}_{4\mathrm{A}}$	indeformada	10,12	30,3	1,994	66,6	47,7	10,12	1,994	66,6		11,84	18,25	35,1	60,9		
	LV_{4B}	antes colapso 200kPa	10,30	30,3	1,943	66,0	49,2	11,60	1,612	61,7	57,6	13,32	28,54	53,3	56,0		
	LV_{4C}	após colapso 200kPa	10,34	30,3	1,931	65,9	49,3	12,31	1,461	59,4	88,8	13,64	28,25	51,7	55,0		
	LV _{6A}	indeformada	10,28	30,7	1,986	66,5	48,1	10,28	1,986	66,5		11,52	20,21	43,0	62,5		
(3,20m)	LV_{6B}	antes colapso 100kPa	9,84	30,7	2,121	68,0	44,6	10,54	1,914	65,7	46,8	11,43	19,79	42,3	62,8		
	LV _{6C}	após colapso 100kPa	9,87	30,7	2,110	67,8	45,1	11,35	1,705	63,0	87,8	12,15	21,34	43,1	60,4		
LV ₈ (4,70m)	$\mathrm{LV}_{8\mathrm{A}}$	indeformada	11,05	30,3	1,742	63,5	52,9	11,05	1,742	63,5		12,06	20,27	40,5	60,2		
	$\mathrm{LV}_{8\mathrm{B}}$	antes colapso 200kPa	10,92	30,3	1,776	64,0	51,9	11,81	1,566	61,0	56,5	13,32	28,84	53,8	56,0		
	LV _{8C}	após colapso 200kPa	10,86	30,3	1,789	64,1	51,8	12,19	1,486	59,8	88,6	13,57	27,25	50,2	55,2		

Tabela 5.11 - Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria - Perfil I

Peso específico dos sólidos determinado pelo método do picnômetro
 Características dos corpos de prova obtidos através do ensaio de porosimetria
 Porosidade calculada com γ_d obtido no ensaio de porosimetria e γ_s determinado pelo método do picnômetro



Figura 5.24 – Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 0,50 m)



Figura 5.25 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I - prof. 0,50m)
O histograma de freqüência dos vazios do solo (profundidade de 0,50 m), Figura 5.25, apresenta uma distribuição bimodal, com deslocamentos à esquerda e achatamento das curvas referentes ao material carregado e inundado (principalmente) em relação à amostra indeformada, isto é, redução dos poros interagregados (quantidade e tamanho) e aumento do pico correspondente aos vazios intra-agregados para a condição após colapso (formação de criptoporos).

Para o nível inferior (profundidade de 1,60 m) verifica-se (Figuras 5.26 e 5.27), uma expressiva redução na quantidade e no tamanho dos poros interagregados para as condições carregada e inundada em relação à amostra indeformada e, um aparecimento maior de criptoporos que antes estavam limitados a 19% na condição indeformada.



Figura 5.26 – Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 1,60 m)



Figura 5.27 – Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 1,60m)

Os resultados obtidos para o material da profundidade 3,20 m (Figuras 5.28 e 5.29) mostram, após colapso, um estreitamento da faixa relativo aos poros interagregados, com aumento nas classes dos microporos e criptoporos (vazios intra-agregados).

Na condição anterior ao colapso, os resultados apresentaram incoerências, ou seja, aumento da porosidade interagregado e redução da porosidade intra-agregado, justificáveis pelo valor da porosidade total do material: 62,5% na amostra indeformada e 62,8% na amostra antes do colapso.

Esse nível foi o que apresentou a maior porosidade, valor médio de 69%, e também maior variabilidade do índice de vazios, valor de 8%. Provavelmente este tenha sido um problema de variabilidade dos índices físicos da amostra (bloco).



Figura 5.28 – Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 3,20 m)



Figura 5.29 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I - prof. 3,20m)

Nas Figuras 5.30 e 5.31 se visualizam, para a profundidade de 4,70 m, após carregamento e inundação do solo, um estreitamento da faixa dos poros interagregados, com redução na classe dos macro e mesoporos e um aumento significativo na classe dos criptoporos (vazios intra-agregados) em relação ao material indeformado.



Figura 5.30 – Curvas de distribuição de poros – material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 4,70 m)

As curvas para as condições antes e após colapso são muito semelhantes, acusando apenas uma redução dos mesoporos e aumento dos microporos após colapso.

Os ensaios edométricos indicaram uma redução das deformações volumétricas por colapso a partir de 4,50 m de profundidade e as análises micromorfológicas apontaram uma modificação na estrutura do material, também, a partir dessa profundidade. Passam a predominar zonas mais contínuas com redução das zonas microagregadas, predominantes nos níveis mais superficiais do perfil. Assim, essas pequenas mudanças no ensaio de porosimetria, para as condições antes e após colapso estão condizentes com as demais análises efetuadas.



Figura 5.31 – Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil I – prof. 4,70m)

A Tabela 5.12, com base nas Figuras 5.24 a 5.31, sintetiza os resultados das análises porosimétricas para o Perfil I, de acordo com a classificação de Brewer (1976) adotada.

Durf	Condição		Porcentagem de poros								
(m)		$\binom{n_c}{(\%)}$	macro	meso	micro	ultramicro	cripto				
(111)		(,)	> 75 µm	30 - 75µm	5 - 30µm	0,1 - 5µm	< 0,1µm				
	natural	58,9	15	28	17	5	35				
0,50	antes do colapso	57,7	12	32	19	10	27				
	após colapso	53,5	3	12	19	9	57				
	natural	60,9	10	26	32	13	19				
1,60	antes do colapso	56,0	2	8	27	11	52				
	após colapso	55,0	2	2	29	12	55				
	natural	62,5	12	25	33	12	18				
3,20	antes do colapso	62,8	6	29	40	11	14				
	após colapso	60,4	3	16	44	12	25				
	natural	60,2	7	22	41	12	18				
4,70	antes do colapso	56,0	2	10	26	12	50				
	após colapso	55,2	2	5	30	12	51				

Tabela 5.12 – Classificação dos poros segundo Brewer (1976) – Perfil I (solo natural e ensaiado)

Pelas análises micromorfológicas, constatou-se que o colapso provoca modificações principalmente na porosidade estrutural (macroporos, poros biológicos, etc) – porosidade interagregados e que, praticamente não ocorre redução da porosidade textural (porosidade da argila) – porosidade intra-agregados. Ao contrário, após carregamento (antes do colapso) e inundação (após colapso) observa-se que há um aumento da porosidade textural em detrimento da porosidade estrutural, o que também foi verificado nas análises porosimétricas.

Os resultados obtidos nos ensaios de porosimetria, na sua maior parte, acusam diferenças mais significativas entre as curvas obtidas para o material indeformado (natural) e carregado (antes do colapso). De fato, como mostram as Tabelas 5.7 e 5.10, as maiores deformações volumétricas ocorrem pelo efeito do carregamento do solo (deformações por carga) do que pela sua inundação (deformações por colapso).

Mesmo assim, levando-se em conta as pequenas dimensões da amostra preparada para o ensaio de porosimetria, as reduções da porosidade estrutural (interagregados), antes e após colapso, podem não estar totalmente representadas na amostra analisada. Da mesma forma, os vazios inacessíveis não podem ser avaliados. Assim, as diferenças observadas entre as curvas, para essas duas condições poderiam ser, talvez, um pouco mais significativas.

No entanto, as posições relativas das curvas para as condições natural e ensaiada, em geral, parecem refletir qualitativamente o comportamento do solo mediante carregamentos e inundação. Se observados os valores das porosidades determinadas através do ensaio de porosimetria (n_e) e as calculadas (n_c) parecem ser estes últimos, também, mais coerentes com esses comportamentos observados.

5.1.5 Síntese dos Resultados

Os ensaios edométricos efetuados para a avaliação da colapsibilidade do solo argiloso constituinte do Perfil I, denominado Latossolo Vermelho distroférrico, evidenciaram uma sensibilidade à inundação ao longo de todo o perfil. Entretanto, a parte mais superficial, até aproximadamente 4,50 m de profundidade, se mostrou mais susceptível ao colapso do que os níveis mais profundos (até 9,50 m), na interface com a alteração do basalto (solo residual).

Os coeficientes de colapso obtidos nos ensaios simples diferiram, em muitos casos, daqueles obtidos nos ensaios duplos. Constatou-se que esses valores são fortemente afetados pelas características físicas iniciais dos corpos de prova (teor de umidade e índice de vazios). Mesmo assim, percebeu-se uma tendência de maiores valores do coeficiente de colapso nos ensaios simples para as amostras dos níveis mais superficiais (profundidades < 4,50 m) e nos ensaios duplos para as amostras dos níveis mais profundos (profundidades > 4,50 m).

Verificou-se ainda uma forte relação entre o valor do coeficiente de colapso com a tensão de pré-adensamento virtual. Exceto para a profundidade de 3,20 m, os maiores coeficientes de colapso obtidos para os materiais ao longo do perfil, nos ensaios simples e duplos, estão associados às menores tensões de pré-adensamento natural e inundada, respectivamente.

Esse comportamento pode ser explicado pelas variações das características físicas, principalmente em relação aos índices de vazios mais elevados para a parte superior do perfil, e da micromorfologia (microestrutura) do material.

As análises micromorfológicas revelaram mudanças na organização do plasma a partir da profundidade de 4,50 m, o que pode também justificar as mudanças de comportamento dos materiais, mediante carregamentos e inundação. Na parte superior do perfil há o predomínio de plasma microagregado, associado a uma porosidade intermicroagregada, altamente comunicante, com ocorrência, ainda, de macrocavidades de origem biológica. Essa microestrutura é favorável ao mecanismo do colapso. Abaixo de 4,50 m de profundidade, por outro lado, começam a aparecer, com maior freqüência, zonas de plasma contínuo e zonas com coalescência de microagregados, o que induz a uma redução na porosidade intermicroagregada e na sua conectividade. Essas feições estão associadas aos níveis que apresentaram menores colapsos, logo, são menos favoráveis ao desenvolvimento desse mecanismo.

Observaram-se, também, as influências da microestrutura nas relações entre a tensão de pré-adensamento virtual e a tensão geostática: as maiores relações ocorrem até 1,50 m de profundidade, e dentre os mecanismos que originaram este comportamento sobreadensado, a exposição do solo, desde a sua formação, aos ciclos de umedecimento e secagem deve ser um dos mais importantes. Entre 4,50 m e 6,00 m de profundidade essas relações voltam a aumentar indicando uma provável relação com as condições estruturais desses níveis (redução da microagregação).

Apesar das mudanças significativas na organização do plasma ao longo da parte evoluída do perfil, a constituição mineralógica é homogênea (caulinita, gibbsita, hematita e quartzo). Entretanto, a presença de diferentes populações de hematita, quanto ao grau de cristalinidade e tamanho de partícula, foi revelada pela espectroscopia Mössbauer. Essas diferenças nas populações de hematita aparentemente interferem em suas relações com a caulinita, provocando mudanças no comportamento do plasma como, por exemplo, o bloqueio da atividade, formação de microagregados e "nodulações".

As análises porosimétricas realizadas para o material até 4,50 m mostraram que na parte mais superficial do solo evoluído há um predomínio de poros interagregados em relação aos poros intra-agregados. De acordo com a classificação de Brewer (1976) empregada, os poros interagregados (macro, meso e microporos) representam um percentual de no mínimo 68%, enquanto que, os vazios intra-agregados (ultramicro e criptoporos) representam no máximo 32%. A partir de 4,50 m, há uma redução na classe dos macroporos (12% para 7%) e um aumento na classe dos microporos (33% para 41%), confirmados pelas análises micromorfológicas: predomínio de plasma contínuo com redução do plasma microagregado.

Os ensaios de porosimetria realizados para as amostras ensaiadas em edômetros mostraram que os carregamentos e inundação provocam modificações principalmente na porosidade estrutural (interagregados) do solo e que, praticamente não ocorre redução da porosidade textural (intra-agregados). Ao contrário, após carregamento (antes do colapso) e inundação (após colapso), observa-se um acréscimo da porosidade textural em detrimento da porosidade estrutural, o que também foi verificado nas análises micromorfológicas. As diferenças mais significativas foram observadas entre o material indeformado (natural) e carregado (antes do colapso). De fato, os ensaios realizados para a avaliação da colapsibilidade revelaram que as maiores deformações volumétricas são decorrentes do efeito do carregamento do solo (deformações por carga) do que pela sua inundação (deformações por colapso).

Embora os resultados obtidos nas análises porosimétricas se mostrem coerentes com as análises micromorfológicas, há evidências de que parte dos macroporos, aqueles com diâmetros maiores do que 1000 µm, não estejam representados. Em função das pequenas dimensões da amostra analisada e devido à abundância desses macroporos, é possível que a mesma possa não ser representativa. Por outro lado, há que se considerar que alguns vazios são inacessíveis e que também não podem ser avaliados.

5.2 O PERFIL II (NITOSSOLO VERMELHO eutroférrico)

5.2.1 Caracterização do Material Natural

5.2.1.1 Descrição morfológica

As observações em um corte de aproximadamente 4,0 m de altura permitiram a descrição morfológica do Perfil II (Figura 5.32), constituído dos seguintes horizontes:



Figura 5.32 – Nitossolo Vermelho eutroférrico observado em corte (Maringá, PR)

- Ap 0 a 30 cm Bruno vermelho escuro (2,5 YR ³/₄), textura argilosa; estrutura poliédrica subangular grande, forte e resistente; muito duro; cerosidade abundante; plástico e pegajoso; porosidade fissural; presença de fragmentos de carvão de tamanhos variados; poucas raízes; transição gradual;
- AB 30 a 65 cm Vermelho escuro acinzentado (10 R ³/₄), textura argilosa; estrutura poliédrica angular média, forte; duro; cerosidade abundante, forte e contínua; plástico e pegajoso; porosidade fissural e macroporos biológicos; presença de fragmentos de rocha alterada; poucas raízes; transição plana gradual;

- B_t 65 a 180 cm Vermelho escuro acinzentado (10 R ³/₄), textura argilosa; estrutura poliédrica subangular média, forte; duro; cerosidade contínua, forte e abundante; plástico e pegajoso; macro e microporos abundantes; presença de nódulos argilosos pequenos, fragmentos de carvão e de pequenos fragmentos de rocha alterada; atividade biológica; transição gradual;
- Bw₁ 180 a 230 cm Vermelho escuro acinzentado (10 R ³/₄), textura argilosa; estrutura poliédrica pequena subangular que se desfaz em granular pequena (maciça porosa), macio, friável; cerosidade fraca; não plástico e não pegajoso; porosidade macro e micro abundante; transição difusa;
- Bw₂ 230 a 280 cm Vermelho escuro acinzentado (10 R ³/₄), textura argilosa; estrutura poliédrica subangular que se desfaz em granular pequena (maciça porosa), macio, friável; não plástico e não pegajoso; porosidade macro e micro abundante;

A partir de 280 cm, já se torna visível o solo de alteração de basalto (horizonte C), conforme Figura 5.32.

Com base nessa descrição e de acordo com o Sistema de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), o solo evoluído do Perfil II é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférrico (anteriormente designado Terra Roxa Estruturada).

5.2.1.2 Caracterização geotécnica

O perfil de solo típico da área selecionada para estudo, os valores de N_{SPT} provenientes de três sondagens e os resultados de ensaios de caracterização (análise granulométrica, limites de liquidez e plasticidade e massa específica dos grãos) realizados em laboratório com as amostras coletadas nas sondagens até 6,50 m de profundidade são apresentados na Figura 5.33. Por se tratar de um perfil raso com a presença de horizontes distintos optou-se, diferentemente dos outros perfis, pela realização desse estudo a cada 0,50 m de profundidade.



Figura 5.33 – Perfil de solo típico – Nitossolo Vermelho eutroférrico (Maringá – PR)

A Figura 5.33 mostra que o Perfil II é formado por duas camadas provenientes da alteração do basalto, em diferentes estágios de evolução.

A camada superficial de solo pedologicamente evoluído, o Nitossolo Vermelho eutroférrico, é mais delgada do que aquela observada para o Perfil I, com espessura aproximada de 2,80 m, cor marrom avermelhada e textura argilo-siltosa. Os valores de resistência à penetração N_{SPT} variam entre 4 e 7 nos horizontes mais superficiais (AB e Bt) e entre 3 e 4 no horizonte Bw. Os pesos específicos dos sólidos variam de 29,8 kN/m³ a 30,3kN/m³. Apresenta Índices de Plasticidade entre 23% e 40% e Limites de Liquidez variando entre 72% e 84%, sendo os valores mais elevados encontrados para a parte superior da camada.

A camada subjacente, referente ao nível de alteração do basalto, o saprolito, de cor variegada, roxa e marrom esverdeada, com presença de diáclases salientadas por oxidações de cor preta e/ou amarela possui textura predominantemente silte argilo-arenosa. Os valores do N_{SPT} apresentam maior variabilidade (entre 3 e 31), mas tendem a crescer com a profundidade. Os Índices de Plasticidade e os Limites de Liquidez variam muito pouco, valores entre 16% a 18% e entre 63 a 65%, respectivamente. Os pesos específicos dos sólidos são um pouco menores, variando entre 29,7 kN/m³ e 30,2 kN/m³.

A camada superficial desse perfil apresenta plasticidade muito superior àquela observada para a camada inferior. A argila se mostrou mais ativa, com tendência à expansão e dispersão em presença de água. Acredita-se que apesar da abundância do ferro, a argila no nível superficial não se encontra bloqueada por ele.

Abaixo do solo de alteração, aproximadamente a 8,3 m, encontra-se a rocha basáltica com grau de alteração variado em profundidade, em função da alternância de níveis maciços, vesiculares e/ou amigdaloidais. Até 10,2 m de profundidade, cota de término das sondagens, o nível freático não foi observado.

5.2.1.3 Caracterização física

Na Tabela 5.13 podem ser visualizados os valores dos índices físicos naturais do solo, obtidos com os corpos de prova talhados, para a realização de ensaios dos diferentes níveis estudados.

Uma análise estatística das características físicas para os diversos horizontes, que compõem a camada de solo evoluído desse perfil, é apresentada na Tabela 5.14.

As variabilidades dessas características físicas ao longo do perfil são mostradas na Figura 5.34.

Observa-se, para esse perfil, a grande capacidade de retenção de água, apresentando teores de umidade acima de 38% em todas as profundidades, chegando a valores próximos a 40% no horizonte característico Bt do Nitossolo Vermelho.

O grau de saturação nos horizontes mais superficiais é de aproximadamente 70%, tendendo a decrescer com a profundidade, atingindo valores em torno de 60% no horizonte Bw.

Os índices de vazios tendem a aumentar com a profundidade. Os valores médios são da ordem de 1,7 até o horizonte Bt (profundidade média de 1,15 m) e alcançam valores até superiores a 2,0 na profundidade média de 2,15 m (horizonte Bw).

Esses elevados índices de vazios implicam em baixos pesos específicos secos, com valores aproximados de 10 kN/m^3 no horizonte Bw.

Esse perfil apresenta variabilidade menor nas propriedades físicas do que aquelas observadas para o Perfil I. Mesmo assim, o horizonte Bw atingiu um coeficiente de variação dos índices de vazios de 4%, conforme se observa na Tabela 5.14 e Figura 5.34.

Prof. média	Amostra	СР	Wo	γ	γd	eo	n	Sr
(m)	(Bloco)	N°	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)		(%)	(%)
		1	38,2	15,57	11,27	1,645	62,2	69,2
		2	38,2	15,53	11,24	1,651	62,3	68,9
		3	38,8	15,64	11,27	1,645	62,2	70,4
		4	39,0	15,56	11,20	1,661	62,4	69,9
0,50	(AB)	5	39,3	15,55	11,16	1,670	62,5	70,2
		6	38,7	15,73	11,35	1,626	61,9	70,8
		7	38,7	15,68	11,31	1,635	62,0	70,5
		8	38,7	15,40	11,11	1,683	62,7	68,5
		9	38,2	15,42	11,16	1,670	n $(\%)$.45 62,2 .51 62,3 .45 62,2 .61 62,4 .70 62,5 .26 61,9 .35 62,0 .83 62,7 .70 62,5 .36 62,1 .50 63,6 .62 63,8 .907 63,1 .739 63,5 .922 63,3 .67 62,5 .23 63,3 .71 62,6 .92 62,9 .22 63,3 .67 62,5 .23 63,3 .71 63,4 .72 62,6 .97 66,6 .91 63,4 .92 63,3 .93 66,5 .944 67,1 .93 66,5 .93 66,5 .93 66,5 .944 67,2 .930 65,9 <td>68,1</td>	68,1
		1	39,3	16,00	11,49	1,636	62,1	72,7
		2	39,2	15,34	11,02	1,750	63,6	67,9
		3	39,4	15,29	10,97	1,762	63,8	67,8
	NV ₃ (Bt)	4	39,6	15,63	11,19	1,707	63,1	70,3
		5	39,1	15,38	11,06	1,739	63,5	68,1
1,15		6	39,4	15,69	11,25	1,692	62,9	70,5
1,15		7	39,4	15,52	11,13	1,722	63,3	69,3
		8	39,1	15,80	11,36	1,667	62,5	71,0
		9	39,5	15,53	11,13	1,723	63,3	69,5
		10	39,6	15,48	11,09	1,731	63,4	69,3
		11	39,3	15,80	11,34	1,672	n S_1 (%) (%) 62,2 69, 62,3 68, 62,2 70, 62,4 69, 62,5 70, 62,6 70, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 68, 62,7 71, 63,6 67, 63,3 69, 63,3 69, 63,3 69, 63,3 69, 63,3 69, 63,4 69, 65,5 58, 66,5 58, 66,5 59, 65,9 60, 66,5 59,	71,2
		1	38,4	13,95	10,08	1,997	66,6	58,1
		2	38,5	14,03	10,13	1,981	66,5	58,7
		3	39,4	13,83	9,92	2,044	67,1	58,2
		4	38,9	14,06	10,12	1,983	66,5	59,2
		5	38,9	14,53	10,46	1,888	65,4	62,2
2,15	NV ₆ (Bw)	6	39,0	13,77	9,91	2,047	67,2	57,5
2,15		7	38,5	14,28	10,31	1,930	65,9	60,3
		8	38,8	13,90	10,02	2,015	66,8	58,2
		9	38,9	14,81	10,66	1,832	64,7	64,1
		10	39,0	14,56	10,48	1,882	65,3	62,5
		11	38,6	14,72	10,62	1,844	64,8	63,2

Tabela 5.13 - Caracterização física do Perfil II (Nitossolo Vermelho eutroférrico)

Prof.		w(%)		1	$\gamma (kN/m^2)$	⁵)	γ	$d_{\rm d}$ (kN/m ²	3)		e			n (%)			S _r (%)	
(m)	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média
0,50	38,2	39,3	38,6	15,40	15,73	15,56	11,11	11,35	11,23	1,626	1,683	1,654	61,9	62,7	62,3	68,1	70,8	69,6
1,15	39,1	39,6	39,3	15,29	16,00	15,59	10,97	11,49	11,18	1,636	1,762	1,709	62,1	63,8	63,1	67,8	72,7	69,8
2,15	38,4	39,4	38,8	13,77	14,81	14,22	9,91	10,66	10,25	1,832	2,047	1,949	64,7	67,2	66,1	57,5	64,1	60,2
Prof				de	esvio pa	drão						Co	oeficiente de variação (%)					
(m)		W	γ		$\gamma_{\rm d}$	e	-	n	Sr	v	V	γ	γ _d		e	n		Sr
0,50		0,40	0,11	0	,08	0,02	0,	26	0,96	1,0)2	0,70	0,7	0	1,11	0,42	2	1,38
1,60		0,19	0,22	0	,16	0,04	0,	53	1,55	0,4	47	1,41	1,4	3	2,26	0,84	ŀ	2,22
3,20		0,28	0,37	0	,27	0,08	0,	90	2,37	0,1	72	2,63	2,6	6	4,00	1,37	7	3,94

Tabela 5.14 – Análise estatística das características físicas - Perfil II



Figura 5.34 – Variabilidade das características físicas do solo – Perfil II (Nitossolo vermelho eutroférrico)

5.2.1.4 Micromorfologia do perfil de solo

O Nitossolo Vermelho estudado se caracteriza por apresentar, na parte superior (horizontes AB e Bt), até aproximadamente 2,0 m de profundidade, uma estrutura em blocos poliédricos de diversos tamanhos, centimétricos a milimétricos, com formas subangulares a angulares. Desta maneira, os arranjos poliédricos facilmente observáveis no perfil de solo (Figura 5.35) estão, também, reproduzidos em nível microscópico, em lâmina delgada.



Figura 5.35 - Arranjos poliédricos observados no Perfil II - Nitossolo Vermelho (Maringá, PR).

Até 2,0 m de profundidade predominam os vazios planares (fissuras), canais e cavidades. Dois tipos de vazios planares ocorrem preferencialmente:

a) os vazios que delimitam os agregados poliédricos - correspondem a fendas ("*craze planes*", segundo a terminologia proposta por Brewer, 1976), são interconectados, geralmente com paredes conformes e rugosas. Correspondem ao tipo de poros

interagregados dos materiais de solo, cujos agregados se acomodam uns aos outros, ou, ainda, aos vazios (rachaduras) dos materiais sem estrutura pedológica;

b) as fissuras que ocorrem no interior dos agregados – são mais finas do que as do primeiro grupo e geralmente não estão conectadas entre si. Entretanto, podem estar conectadas, algumas vezes, com cavidades, canais ou a outras fissuras maiores (fendas). Segundo Brewer (1976), correspondem aos poros aplainados irregulares (*"skew planes"*).

As cavidades, por sua vez, ocorrem preferencialmente no interior dos agregados e apresentam formas irregulares e tamanhos variados (com a menor dimensão em torno de 200µm e a maior até aproximadamente 800 µm). Conectam-se com fissuras (dos dois tipos), mas raramente entre si.

O esqueleto, como no caso do Latossolo Vermelho de textura argilosa, é pouco abundante e constituído por grãos de quartzo e minerais escuros (provavelmente magnetita e ilmenita), de formas angulares a subangulares e de diversos tamanhos (os menores entre 50 μ m e 200 μ m e os maiores entre 400 μ m a 600 μ m, ou eventualmente até mais de diâmetro).

O plasma é de cor vermelha, argilo-férrico e, nesse nível mais superficial, contínuo, mas com forte anisotropia. Aqui, também, ocorrem setores em que o plasma apresenta cores mais escuras e setores nos quais a coloração é mais clara. Observa-se, freqüentemente, uma forte orientação do plasma do tipo estriada (principalmente junto às fissuras e onde o plasma é mais claro) e também como manchas isoladas, resultando em uma estrutura plásmica do tipo poroinsépica a argilassépica.

Junto às fissuras, foram observadas separações plásmicas identificadas como cutãs de tensão ("*stress-cutans*" - de acordo com Brewer, 1976), que correspondem a modificações "*in loco*" do plasma pelas forças diferenciais.

Nóbrega (1988) observou características micromorfológicas similares (vazios planares, orientações plásmicas estriadas e cutãs de tensão) em um perfil de Nitossolo Vermelho da região de Fartura (SP) e as relacionou como indicadores de forte sensibilidade (expansão/contração) desse material às variações das condições hídricas.

A organização geral (estrutura de base) do material do solo é caracteristicamente porfirogrânica (plasma contínuo englobando grãos do esqueleto). A partir de 1,8 m até 2,0 m de profundidade, gradualmente, a estrutura em blocos poliédricos dá lugar a uma estrutura microagregada, próxima daquela observada no perfil de Latossolo Vermelho de textura argilosa (Perfil I).

A partir de 2,0 m de profundidade até o início do solo de alteração da rocha (profundidade de 2,8 m), o material que constitui o horizonte Bw, sob o Bt descrito acima, é caracterizado por apresentar setores microagregados alternados com setores onde o plasma tem um arranjo contínuo e é cortado por fissuras finas e curtas, abrigando ainda cavidades, algumas de origem biológica (as maiores com diâmetros em torno de 2000 μ m – circulares e as ovaladas com a maior dimensão de até aproximadamente 7000 μ m).

Os microagregados aqui exibem, em geral, formas poliédricas angulares a subangulares, gerando uma porosidade intermicroagregados menor e mais fechada do que aquela observada no horizonte Bw do Latossolo Vermelho de textura argilosa (Perfil I). Eventualmente ocorrem zonas de porosidade mais aberta e, nessas, os microagregados tendem a ter formas mais arredondadas.

A estrutura plásmica é preferencialmente argilassépica e a estrutura de base pórfiroenáulica, muito semelhante àquela observada a partir de 4,5 m de profundidade no Perfil I, no qual os setores contínuos de plasma tendem a dominar sobre os microagregados.

O solo evoluído constituinte do Perfil II, na sua condição natural e em nível microscópico, pode ser visualizado na Figura 5.36.



Figura 5.36 – Micromorfologia do Perfil II – solo natural (indeformado)

5.2.1.5 Caracterização mineralógica

Difração de Raios X

As análises mineralógicas por difração de raios-X foram realizadas para os materiais (pó) constituintes do perfil, em um total de 8 ensaios, até a profundidade de 8,50 m.

Os resultados (Tabela 5.15) mostram a existência de hematita e magnetita em todo o perfil. A caulinita também aparece em grande parte do perfil, exceto para a amostra referente à profundidade de 8,50 m.

Os minerais gibbsita e quartzo estão presentes preferencialmente nos materiais constituintes da camada superficial de solo pedologicamente evoluído, horizontes Bt e Bw. No solo de alteração, constata-se ainda a presença de laumontita, mordenita e esmectita. O feldspato e o diopsídio são minerais primários residuais, indicando que essa zona (profundidade de 8,5 m) já corresponde praticamente ao basalto - horizonte R do perfil.

As zeólitas (laumontita e mordenita) e o quartzo são minerais que naturalmente ocorrem preenchendo vesículas nos horizontes superiores dos derrames basálticos nessa região da Bacia do Paraná; são, portanto, constituintes das amígdalas o que justifica sua presença no solo de alteração.

A esmectita, por outro lado, é resultante do processo de intemperismo dos minerais ferromagnesianos (GONÇALVES, 1987). Essa esmectita, provavelmente do tipo nontronita, segue a mesma evolução descrita para o Perfil I.

Na Figura 5.37 são apresentados difratogramas característicos dos dois conjuntos de solo: evoluído (horizonte Bt) e de alteração (horizonte C).

te					ľ	MIN	ERA	AIS I	PRE	SEN	ITES	5	
Horizon	Amostra	Profundidade média (m)	Material selecionado	Caulinita	Gibbsita	Hematita	Esmectita	Magnetita	Quartzo	Laumontita	Mordenita	Feldspato	Diopsídio
Bt	1	1,15	total (amostras										
Bw	2	2,15	indeformadas)										
	3	4,00											
	4	5,00											
C	5	6,50	total (material coletado										
	6	7,00	no amostrador - SPT)										
	7	7,50											
R	8	8,50											

Tabela 5.15 – Mineralogia do Perfil II (Nitossolo Vermelho eutroférrico)

traços



Figura 5.37 – Difratogramas característicos dos dois conjuntos de solo - Perfil II.

Espectroscopia Mössbauer

Nesse perfil, apenas duas amostras foram analisadas, sendo a amostra 1, que corresponde ao material do horizonte Bt, caracteristicamente constituído por plasma contínuo. A amostra 2 corresponde a plasma microagregado do horizonte Bw subjacente.

A Tabela 5.16 apresenta os parâmetros obtidos através do ajuste das curvas experimentais e a Figura 5.38 mostra os resultados desses ajustes.

Como para o Perfil I, os espectros são compostos por um sexteto ajustado através de uma distribuição de campo magnético e um dubleto. Da mesma forma, os valores de IS e os de QS mostram que a única forma de ferro presente é o Fe^{3+} octaédrico e que há apenas um mineral presente: hematita.

As variações no B_{hf} ainda que significativas, são mais sutis. Cabe ressaltar que, à temperatura ambiente, os valores 48,2 e 46,7 T, são inferiores aos resultados totais mostrados pelo Perfil I. Portanto, em média, o material constituinte do Perfil II apresenta grau de cristalinidade mais baixa. Os dois espectros apresentam variações mais importantes com relação à porcentagem de área do dubleto. No horizonte Bt, cerca de 38% do material é de pequena granulometria, enquanto que, no Bw, esse material corresponde a cerca de 25% do total.

O ordenamento magnético verificado na amostra 1 em função do abaixamento da temperatura era esperado e foi bastante intenso, cerca de 2/3 do material mal cristalizado se ordenou. No entanto, ainda restou um dubleto. Todos os resultados apontam para a existência de diferentes populações de hematita, a exemplo do que foi verificado para o Perfil I, mas distintas destas.

Desta forma, apesar da mineralogia semelhante, os plasmas dos horizontes Bt e Bw apresentam constituições em termos de fases ferruginosas diferenciadas entre si e que devem ser as responsáveis pelas variações de organizações microestruturais observadas.

Amostra	Prof.	Zona	Temperatura	Subspectro	B_{hf}	IS	QS	ÁREA
	(m)	selecionada	de medida	Buespeene	(T)	(mm/s)	(mm/s)	(%)
			Ambiente	Distribuição	48,2	0,37	-0,14	61,9
1	1 1 5	Total (horizonte Bt)	Amorente	Dubleto	-	0,39	0,54	38,1
1	1,15		80 K	Distribuição	58,3	0,52	-0,18	86,2
			00 K	Dubleto	-	0,52	0,67	13,8
2	2 15	Total	Ambianta	Distribuição	46,7	0,35	-0,15	74,8
	2,15	(horizonte Bw)	Amolente	Dubleto	-	0,36	0,56	25,2

Tabela 5.16 – Parâmetros hiperfinos e áreas subespectrais (Perfil II)



Figura 5.38 – Ajustes das curvas experimentais - materiais constituintes do Perfil II (Espectroscopia Mössbauer – temperatura ambiente e 80 K)

5.2.1.6 Porosimetria

Os resultados das análises porosimétricas obtidos para todos os horizontes constituintes do solo evoluído desse perfil, expressos pelas curvas de distribuição diferencial (histogramas de freqüência) e porcentagens de poros em relação ao volume de vazios total da amostra (exceto os inacessíveis) *versus* diâmetro dos poros são apresentados nas Figuras 5.39 e 5.40.



Figura 5.39 – Curvas de distribuição de poros - solo natural (Perfil II)

Os histogramas de freqüência dos vazios do solo (Figura 5.40) mostram, para todos os horizontes do solo evoluído, uma distribuição bimodal, representada pelos poros interagregados (macro, meso e micro) e os vazios intra-agregados (ultramicro e criptoporos).

Como no Perfil I, os poros interagregados estão representados por uma família de poros com diâmetros entre 10 μ m e 200 μ m, e os poros intra-agregados por uma outra família, com diâmetros entre 0,01 μ m e 0,1 μ m, aproximadamente.

Os resultados evidenciam um achatamento das curvas, na faixa correspondente aos poros interagregados, de maneira inversa à profundidade, isto é, quanto menor a profundidade, maior é o achatamento da curva.



Figura 5.40 – Histogramas de freqüência de poros - solo natural (Perfil II)

De fato, como pode ser visto na Tabela 5.17, a porosidade total do solo (n_c) , é crescente com a profundidade, assim como os percentuais correspondentes às classes de poros: macro, meso, micro e ultramicroporos (de acordo com Brewer, 1976). Porém, a porcentagem correspondente à classe dos criptoporos, mostrou-se decrescente com a profundidade.

D C		Porcentagem de poros								
Prof. (m)	$\binom{n_c}{(\%)}$	macro	meso	micro	ultramicro	cripto				
(111)	(/0)	> 75 μm 30 – 75 μm		5 – 30 µm	0,1 – 5 μm	< 0,1 µm				
0,50	45,1	6	10	8	4	72				
1,15	51,4	6	12	16	8	58				
2,15	56,6	8	15	21	9	47				

Tabela 5.17 – Classificação dos poros de acordo com Brewer, 1976 - Solo natural (Perfil II)

Aqui, nesse perfil, prevalece a porosidade textural (intra-agregados) sobre a estrutural, valores de até 76%, como se observa para o horizonte mais superficial, representada principalmente por criptoporos.

A estrutura do Nitossolo, como identificada através das análises morfológicas, é caracterizada fundamentalmente, na escala macro, por blocos poliédricos centimétricos delimitados por rede de fissuras de maior abertura (fendas ou rachaduras) que se conectam entre si e, na escala micro por blocos poliédricos milimétricos, cuja rede de fissuras é constituída por microfissuras praticamente sem conectividade. Esse tipo de estrutura é mais evidente nos horizontes AB e Bt.

Dadas as pequenas dimensões da amostra analisada no ensaio de porosimetria, e por ser esse tipo de estrutura mais representativa dos horizontes AB e Bt, os resultados sugerem que a escala macro não esteja representada, justificando desta forma, a grande presença de criptoporos, principalmente nesses horizontes.

5.2.2 Ensaios Edométricos

Para o Perfil II, foram realizados 28 ensaios edométricos dos quais 21 ensaios foram utilizados para a avaliação da colapsibilidade (15 ensaios simples e 06 ensaios compondo a série de ensaios duplos) e 07 ensaios simples realizados exclusivamente para a obtenção de corpos de prova empregados na confecção de lâminas delgadas de solo (análises micromorfológicas) e ensaios de porosimetria.

5.2.2.1 Curvas de compressão

A Figura 5.41 apresenta as curvas de compressão, normalizadas, obtidas nos ensaios edométricos simples para a avaliação da colapsibilidade dos solos evoluídos, que constituem o conjunto superior deste perfil.

As deformações induzidas pelo umedecimento (deformações por colapso), medidas sob tensões que variaram de 50 kPa a 1600 kPa, estão indicadas nas figuras a partir da curva de compressão natural do solo.

Para o material do horizonte Bt, as curvas se apresentam mais unidas, isto é, mais próximas da curva de compressão natural do solo, indicando que, nesse nível (profundidade de 1,15 m), as deformações por umedecimento foram menores do que para os demais níveis do perfil estudado. Ao contrário, para o material do horizonte Bw (profundidade de 2,15 m) é que são observadas as maiores deformações devido à inundação.

As curvas de compressão do solo, normalizadas, para as condições natural e inundada, podem ser visualizadas nas Figuras 5.42 e 5.43, respectivamente.

Como nos ensaios simples, se comparadas as duas curvas do material, natural e inundada (ensaios duplos), correspondentes à mesma profundidade, podem ser obtidas as deformações por umedecimento nos ensaios duplos.

As curvas de compressão dos materiais, para a condição natural, estão praticamente agrupadas. Para a condição inundada, esse mesmo comportamento não foi observado. Como observado nos ensaios simples o material do horizonte Bt foi o que se mostrou mais estável em relação às deformações devido à inundação. O material do horizonte Bw (profundidade de 2,15 m) mostrou, a partir da tensão de 100 kPa um comportamento distinto em relação àquele do horizonte Bt. Para o material do horizonte AB (profundidade de 0,50 m), isso já se observa a partir da tensão de 25 kPa.



Figura 5.41 - Efeito da inundação do solo para os diferentes níveis do Perfil II - Ensaios simples



Figura 5.42 - Curvas de compressão normalizadas (umidade natural) - Perfil II



Figura 5.43 - Curvas de compressão normalizadas (solo inundado) - Perfil II

A Tabela 5.18 mostra as condições físicas dos corpos de prova ensaiados e as respectivas deformações volumétricas ocorridas nos ensaios simples e duplos para a avaliação da colapsibilidade.

As deformações volumétricas por carregamento foram, em geral, muito maiores do que as deformações por inundação para todas as profundidades.

Os menores valores de deformação por inundação foram encontrados para o material do horizonte intermediário (Bt) enquanto que os materiais dos horizontes AB e Bw apresentaram comportamentos praticamente similares.

Os graus de saturação finais dos corpos de prova ensaiados foram iguais ou muito próximos a 100%. A porosidade predominante do tipo fissural, constituída praticamente por rede de fissuras, conforme mostrado nas análises micromorfológicas efetuadas para esse perfil, pode ter sido a principal responsável pelo espraiamento da água e saturação do material.

D C			Condiç	ões dos corp	os de prova	nos ensaios	Tensão de	Índice d	le vazios	Deformação V	olumétrica	
(m) (Blc	Amostra (Bloco)	Ensaio Nº		Inicial	1	Final	inundação	antes e apó	s inundação	ΔV/Vo (%)		
(III)	(Bioto)	11	eo	w _o (%)	S_{ro} (%)	$S_{rf}(\%)$	(kPa)	ei	e _f	carregamento	inundação	
		1	1,645	38,2	69,2	100,0	-	-	-	-	-	
		2	1,651	38,2	68,9	100,0	1,25	1,649	1,656	0,08	-0,26	
0.50 N	NVa	3	1,645	38,8	70,4	97,3	50	1,602	1,592	1,63	0,38	
0,50	1112	4	1,661	39,0	69,9	96,2	100	1,580	1,532	3,04	1,86	
		5 (NV _{2D})	1,670	39,3	70,2	99,8	200	1,473	1,393	7,38	3,23	
		6	1,626	38,7	70,8	99,3	400	1,299	1,258	12,45	1,78	
		7	1,722	39,4	69,3	98,2	-	-	-	-	-	
	NV ₃	8	1,750	39,2	67,9	100,0	1,25	1,746	1,749	0,15	-0,11	
		9	1,762	39,4	67,8	99,2	50	1,699	1,686	2,28	0,48	
1,15		10	1,707	39,6	70,3	100,0	100	1,638	1,631	2,55	0,27	
		11	1,739	39,1	68,1	99,9	200	1,602	1,568	5,00	1,31	
		12	1,692	39,4	70,5	100,0	400	1,401	1,385	10,81	0,67	
		13	1,636	39,3	72,7	100,0	800	1,253	1,251	14,53	0,09	
		14	1,997	38,4	58,1	93,0	-	-	-	-	-	
		15	1,981	38,5	58,7	100,0	1,25	1,976	1,978	0,17	-0,07	
		16	2,044	39,4	58,2	98,0	50	2,008	1,998	1,18	0,33	
2 1 5	NV.	17	1,983	38,9	59,2	100,0	100	1,893	1,852	3,02	1,42	
2,13	1 • • 6	18	1,888	38,9	62,2	100,0	200	1,714	1,637	6,02	2,84	
		19 (NV _{6D})	2,047	39,0	57,5	99,3	400	1,540	1,460	16,64	3,15	
		20	1,930	38,5	60,3	98,0	800	1,295	1,291	21,67	0,17	
		21	2,015	38,8	58,2	100,0	1600	1,091	1,089	30,65	0,10	

Tabela 5.18 – Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos (Perfil II)

() corpos de prova submetidos também à análises porosimétricas e/ou micromorfológicas

5.2.2.2 Tensão de pré-adensamento

As tensões totais verticais geostáticas (σ_o), as tensões de pré-adensamento (σ_p) e os índices de compressão (C_c) do solo, nas condições natural e inundada desde o início do ensaio, são apresentados na Tabela 5.19.

As tensões totais verticais geostáticas (σ_0) foram obtidas tomando-se como valor dos pesos específicos naturais os valores médios encontrados quando da talhagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios.

Tabela 5.19 -	– Tensoes e I	naices de cor	npressão obtidos nos	ensaios simples e dup	los (Permin)
	Prof.	Condição	Tensão Vertical	Tensão de	Índice de
Amostra (Bloco)	média	de	Geostática	Pré-adensamento	Compressão
()	(m)	Umidade	(kPa)	(kPa)	C _c
NV ₂	0.50	natural	8	125	0,624
1112	0,00	inundada		52	0,465
NV	1 15	natural	18	156	0,615
1443	1,15	inundada		123	0,553
NV	2 15	natural	32	160	0,810
1446	2,15	inundada		87	0,727

Tabela 5.19 – Tensões e índices de compressão obtidos nos ensaios simples e duplos (Perfil II)

A Figura 5.44 mostra as variações desses valores ao longo da profundidade (perfil vertical).

Como pode ser visto, as tensões de pré-adensamento natural são, para todos os níveis, maiores do que as tensões geostáticas, indicando um pré-adensamento dos solos. A relação entre elas, para cada nível, se mostrou decrescente com a profundidade. Este comportamento sobreadensado, mais expressivo na camada superficial, sugere que a exposição do solo aos ciclos de umedecimento e secagem seja um dos mais importantes.

A tensão de pré-adensamento na condição natural é crescente com a profundidade enquanto que, na condição inundada, se mostrou crescente até 1,15 m (horizonte Bt nítico) e a

partir desse nível, decrescente. É evidente que a menor diferença entre elas ocorreu para o material do horizonte Bt.



Figura 5.44 - Tensões geostáticas e de pré-adensamento e índices de compressão do solo - Perfil II

O índice de compressão natural do solo é menor para o horizonte Bt (nível intermediário), enquanto que na condição inundada, se mostrou praticamente linear e crescente com a profundidade.

Assim como as tensões de pré-adensamento, os índices de compressão tendem a reduzir quando o solo é inundado. Para ambos, as menores variações são observadas para o horizonte característico do Nitossolo (Bt).

5.2.2.3 Colapsibilidade do solo

A Tabela 5.20 fornece os valores do coeficiente de colapso estrutural obtidos nos ensaios simples e duplos até a tensão máxima de 1600 kPa.

1 40 614 0.2													
Amostra (Bloco)	Prof.		Coeficiente de colapso estrutural - (%)										
	média (m)	Ensaio		Tensão Vertical (kPa)									
			12,5	25	50	100	200	400	800	1600			
NV.	0,50	simples			0,38	1,86	3,23	1,78					
14 4 2		duplo	-0,12	0,55	2,00	4,28	5,25	3,00	0,77	0,17			
NV	1 1 5	simples			0,48	0,27	1,31	0,67	0,09				
IN V ₃	1,13	duplo	0,16	0,37	0,63	1,17	1,84	1,36	0,53	0,05			
NV.	2 15	simples			0,33	1,42	2,84	3,15	0,17	0,10			
1 v v 6	2,13	duplo	0,20	0,41	0,40	1,49	4,45	5,12	3,40	2,07			

Tabela 5.20 - Coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples e duplos) - Perfil II

Obs: Os valores negativos indicam expansão das amostras com a inundação

As amostras referentes aos horizontes AB e Bw, profundidades de 0,50 m e 2,15 m, respectivamente, exibiram os maiores coeficientes de colapso, valores entre 3,0% e 5,3%, que ocorreram para tensões entre 100 kPa e 800 kPa. Para o horizonte intermediário Bt, profundidade média de 1,15 m, os maiores coeficientes, valores entre 1,2% e 1,8%, foram obtidos para tensões entre 100 kPa e 400 kPa.

No entanto, em geral, os maiores coeficientes ocorreram nos ensaios duplos, valores entre 3,0% e 5,3%, para os horizontes AB e Bw, enquanto que nos ensaios simples essa faixa foi reduzida para valores entre 1,8% e 3,2%. Para o horizonte Bt, os maiores valores observados foram de 1,8% (ensaio duplo) e 1,3% (ensaio simples) correspondentes à tensão de 200 kPa.

Pelos resultados apresentados, parece não haver muita relação entre o índice de vazios dos diferentes horizontes com a magnitude do colapso. O índice de vazios se mostrou crescente com a profundidade, porém, o mesmo não ocorreu para o coeficiente de colapso. Os

índices de vazios médios apresentados pelos horizontes AB e Bw foram de 1,7 e 2,0, respectivamente e obtiveram deformações por inundação de mesma ordem de grandeza.

Quanto às tensões de pré-adensamento na condição inundada, os colapsos máximos foram obtidos para as menores tensões. Na condição natural, as tensões de pré-adensamento nos horizontes Bt e Bw são muito próximas, mas os comportamentos observados, quando da sua inundação, foram distintos. Isso provavelmente se justifíque pela estrutura mais contínua, apresentada pelo horizonte Bt (profundidade de 0,50 m).

A Figura 5.45 mostra, de forma comparativa, os valores dos coeficientes de colapso estrutural obtidos nos ensaios simples e duplos até a tensão máxima de 1600 kPa. Essa figura mostra, de forma mais evidente, que esses valores, para todos os níveis, são muito mais expressivos quando se consideram os ensaios duplos.



Figura 5.45 - Comparação entre os coeficientes de colapso (ensaios simples e duplos) - Perfil II
No ensaio duplo, a inundação do corpo de prova se dá logo no início do ensaio, isto é, sem aplicação de carga, ao contrário do ensaio simples em que as deformações para uma determinada carga já ocorreram. A existência de fendas na estrutura do solo aliado ao fato da argila não estar bloqueada pelo ferro, facilita a mobilidade da argila quando ocorre a inundação simultaneamente com as deformações por carga do que após o fechamento das fendas (espessura menor) provocadas pelo efeito do carregamento anterior à inundação. Essa mobilidade causa além do colapso, o efeito da dispersão, podendo resultar maiores coeficientes de colapso nos ensaios duplos, como verificado para este perfil.

As curvas mostradas Figuras 5.46 e 5.47 reafirmam, para todos os níveis do perfil estudado, tanto nos ensaios simples quanto nos duplos, que o coeficiente de colapso tende a aumentar com as tensões aplicadas até atingir um valor máximo e a partir daí decresce para um valor mínimo para uma alta tensão aplicada.

Essas curvas evidenciam também que aos horizontes AB e Bw foram atribuídos os maiores coeficientes de colapso e da mesma ordem de grandeza, isso ocorreu, contudo, para diferentes tensões de 200 kPa e 400 kPa, respectivamente.

As variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade, para as diferentes tensões aplicadas, são visualizadas nas Figuras 5.48 e 5.49. Observa-se a mesma tendência nos ensaios simples e nos ensaios duplos, evidenciando que o material da profundidade de 1,15 m apresentou comportamento distinto dos demais, quando submetido a diferentes carregamentos e inundação.

Considerando um índice de colapso de 2% como o limite entre solos colapsíveis e não colapsíveis, observa-se nas Figuras 5.48 e 5.49 que o material do horizonte Bt (profundidade 1,15 m) não se mostrou colapsível, o que possivelmente se justifique pela estrutura apresentada. O colapso passa a ser importante, nesse solo, para as profundidades de 0,50 m e 2,15 m e quando sujeito a tensões entre 100 kPa e 800 kPa.



Figura 5.46 - Variações dos coeficientes de colapso estrutural (ensaios simples) - Perfil II



Figura 5.47 - Variação dos coeficientes de colapso estrutural (ensaios duplos) - Perfil II



Figura 5.48 - Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade - ensaios simples



Figura 5.49 - Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade - ensaios duplos

Os coeficientes de colapso em função das relações entre as tensões de inundação (σ_i) e as tensões de pré-adensamento natural (σ_{pn}) podem ser visualizados na Figura 5.50.

Os maiores coeficientes de colapso são comandados por (σ_i/σ_{pn}) entre 1,0 e 3,0, observados para as amostras correspondentes às profundidade de 0,50m e 2,15m. A máxima deformação de colapso, valor em torno de 3%, entretanto, é restrita por (σ_i/σ_{pn}) entre 1,5 e 2,5. Esses valores foram os mesmos encontrados para o Perfil I.



Figura 5.50 – Coeficiente de colapso estrutural em função de (σ_i/σ_{pn}) para as amostras do Perfil II

Os coeficientes de colapso (C) de acordo com Reginatto e Ferrero (1973), representados na Figura 5.51, permitem classificar os materiais do Perfil II, segundo esses autores, como condicionalmente colapsíveis (0< C< 1), isto é, a ocorrência do colapso dependerá do nível de tensão aplicada. O material da profundidade de 1,15m apresentou um coeficiente (C) em torno de 0,80, próximo ao limite (C = 1) que considera o solo como não colapsível. Este mesmo

resultado foi obtido para o material correspondente à profundidade de 4,70 m constituinte do Perfil I, cuja estrutura apresentada é predominantemente contínua.



Figura 5.51 – Coeficiente de colapsibilidade do solo – Perfil II (REGINATTO; FERRERO, 1973)

5.2.3 Micromorfologia do Material Ensaiado (evolução da microestrutura sob carregamentos e inundação)

As características físicas dos 14 corpos de prova impregnados para a confecção de lâminas delgadas submetidas às análises micromorfológicas estão reunidas na Tabela 5.21.

Para todo o perfil, as deformações volumétricas por carga foram muito maiores do que as deformações por colapso. Apesar da variabilidade dos índices de vazios iniciais em cada horizonte, as deformações por carga observadas são praticamente da mesma ordem de grandeza para os ensaios antes e após colapso (momento antes da inundação).

Bloco (Prof.)	Corpo	Condição do material		Ensa acterísti	aio edom cas dos co	étrico rpos de	prova	Índice de vazios antes e após		Deformação Volumétrica		Micromorfologi Características do	
	prova			iniciais	8	finais		inundação		ΔV/Vo (%)		corpos de prova	
			eo	n (%)	S _{ro} (%)	e _f	S _{rf} (%)	e _{ai}	e_{fi}	carga	colapso	$\gamma_{\rm d} ({\rm kN/m^3})$	n (%)
	NV _{2A}	indeformado	1,670	62,6	68,1			-	-	-	-	11,16	62,6
NV ₂	NV _{2B} **	antes colapso 200kPa	1,635	62,0	70,5	1,487	76,8	-	-	5,62	-	11,98	59,8
(0,50m)	NV _{2C} **	após colapso 200kPa	1,683	62,7	68,5	1,413	91,7	1,476	1,413	7,72	2,54	12,35	58,6
	NV _{2D}	após colapso 200kPa e recarregado até 800kPa	1,670	62,5	70,2	1,191	99,8	1,473	1,393	15,82	3,23	13,60	54,4
	NV_{3A1}	indeformado 1		62,6	71,2			-	-	-	-	11,34	62,6
	NV_{3A2}	indeformado	1,813	64,5	65,9			-	-	-	-	10,77	64,5
NV ₃	NV _{3A3}	indeformado	1,621	61,8	74,5			-	-	-	-	11,56	61,8
(1,15m)	NV _{3B} **	antes colapso 200kPa	1,667	62,5	71,0	1,532	74,8	-	-	5,06	-	11,97	60,5
	NV _{3C} **	após colapso 200kPa	1,723	63,3	69,5	1,529	90,4	1,555	1,529	6,17	1,02	11,98	60,5
	NV_{3D}^{*}	após colapso 200kPa e recarregado até 800kPa	1,731	63,4	69,3	1,194	99,7	1,553	1,529	19,76	0,94	13,81	54,4
	NV _{6A}	indeformado	1,844	64,8	63,2			-	-	-	-	10,62	64,8
NV_6	NV _{6B} **	antes colapso 400kPa	1,832	64,7	64,1	1,539	73,7	-	-	10,35	-	11,89	60,6
(2,15m)	NV _{6C} **	após colapso 400kPa	1,882	65,3	62,5	1,456	94,7	1,543	1,456	11,76	3,42	12,30	59,3
	NV _{6D}	após colapso 400kPa e recarregado até 800 kPa	2,047	67,2	57,5	1,163	99,3	1,540	1,460	28,71	3,15	13,96	53,8

Tabela 5.21 - Características físicas dos corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas - Perfil II

* ensaio edométrico realizado exclusivamente para as análises micromorfológicas
** ensaios edométricos realizados exclusivamente para as análises micromorfológicas e porosimetria

A seguir serão feitas as descrições da micromorfologia do solo constituinte do Perfil II, com base nas observações efetuadas em lupa binocular e microscópio óptico petrográfico, para o material natural e ensaiado.

A microestrutura do material na condição natural e suas modificações ocasionadas pelos carregamentos e inundação são mostradas nas Pranchas VII, VIII e IX, utilizando-se os aumentos mais adequados para cada situação.

Material – profundidade 0,35m a 0,65m (Horizonte AB)

O material natural do solo, como já referido anteriormente, a esta profundidade é constituído por agregados de formas poliédricas subangulares a angulares, milimétricos a centimétricos. Aqui a estrutura é formada por áreas de plasma contínuo, cortado por fissuras e áreas de plasma microdividido interligado. Predomina a estrutura contínua, onde os agregados são separados por fissuras, algumas conformes, outras não conformes. O aspecto em alguns locais é de um material rendilhado, com os agregados formando blocos que tendem a se quebrar nos contatos, onde a argila orientada está presente (orientações plásmicas estriadas e associadas às fissuras). Nesses pontos há uma tendência de abertura do plasma (fissuração). (Fotos 1 e 2 - Prancha VII).

As áreas microdivididas (em menor quantidade) se mostram com um aspecto de microagregação, mas diferente daquele observado no Latossolo (Perfil I). Enquanto no Latossolo os microagregados são predominantemente arredondados, apresentando uma porosidade de empilhamento composto altamente comunicante, no Nitossolo, nessas áreas, os agregados são poliédricos e separados por fissuras (porosidade do tipo fissural predominante) e algumas cavidades.

PRANCHA VII

NITOSSOLO VERMELHO eutroférrico - Profundidade de 0,50 m

Foto 2 – Solo natural (60x) (microscopia óptica – luz polarizada)

Zonas com aspecto rendilhado com os agregados formando blocos que tendem a se quebrar nos contatos

Foto 3 – Material antes do colapso (30x) (Lupa binocular)

Começam a aparecer fissuras interrompidas ou desviadas.

Foto 1 - Solo natural (30x) (Lupa binocular)

O aspecto microagregado é diferente do Latossolo. A fissuração aparece em todos os níveis – macro e micro.

Foto 5 – Material após colapso (30x) (Lupa binocular)

Há um aumento de orientações plásmicas e uma maior susceptibilidade ao cisalhamento Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (30x) (Lupa binocular)

A estrutura original em agregados poliédricos foi praticamente destruída. As fissuras cortam as áreas desenhando um padrão ortogonal.











Observam-se ainda tubos (secções ovalares), alguns preenchidos por agregados pequenos de formas angulares a subangulares, conectados entre si por pontes de plasma.

A estrutura plásmica poro-insépica a argilassépica característica, em alguns setores dá lugar a um arranjo bimassépico (orientações plásmicas em duas direções). A estrutura de base é porfirogrânica.

Ao ser carregado até a tensão de 200 kPa (antes da inundação), o material apresenta uma morfologia muito semelhante à amostra indeformada. Entretanto, aparentemente, há um aumento da rede de fissuras finas e fechamento e alongamento dos macroporos (cavidades) (Foto 3- Prancha VII). Aparecem fissuras interrompidas e/ou desviadas, que tanto poderiam já estar presentes no material original ou terem sido geradas pelo carregamento. A porosidade que inicialmente era de 63%, passa a 60% com o carregamento.

O plasma nas zonas centrais dos agregados parece mais orientado.

A porosidade é mais fechada e os poros não são tão grandes. Há presença de áreas contínuas e microdivididas. Nas zonas contínuas o plasma mostra-se mais orientado. Os tubos e cavidades foram deformados – estão mais fechados.

Após inundação na tensão de 200 kPa (após colapso) ocorre a predominância de áreas contínuas de plasma. Aparecem agregados com arestas vivas e vértices acentuados. As cavidades são mais alongadas e as fissuras mais entrecortadas (Foto 4 - Prancha VII). São geradas novas fissuras com características diferentes daquelas do material indeformado: segmentos retos com mudanças bruscas de direção, gerando os volumes poliédricos com as arestas angulares. Observa-se também um aumento de orientações plásmicas. Nesta condição, a porosidade total do material é de 59%.

As deformações provocadas pela inundação (após carregamento) parecem ocorrer devido a deslizamentos dessas unidades poliédricas.

Após colapso na tensão de 200 kPa e recarregamento até 800 kPa, observa-se que a estrutura original em agregados poliédricos foi praticamente destruída. O material agora aparece contínuo, sem definição de agregados. As cavidades e os canais desapareceram, passando a predominar uma porosidade essencialmente fissural que corta as áreas de plasma desenhando um padrão, grosso modo, ortogonal. (Foto 5 – Prancha VII), semelhante aos poros aplainados de junta (*"joint planes"* – Brewer, 1976). A porosidade total é reduzida a 54%.

> Material profundidade 1,00m a 1,30 m (Horizonte Bt)

Nesse nível, ainda predominam os agregados poliédricos angulares a subangulares de tamanhos variados (Foto 1 – Prancha VIII). Observam-se ainda os setores microdivididos com aspecto rendilhado ao lado de setores microagregados (mais raros). Nessas zonas a porosidade é maior, constituída por poros de empilhamento, cavidades irregulares interconectadas e canais. As fissuras (fendas) conformes e grandes cavidades irregulares e arredondadas aparecem nas áreas de plasma contínuo (predominante), Foto 2 – Prancha VIII.

No interior das zonas de plasma vermelho contínuo aparecem manchas de plasma mais claro, vermelho amarelado a amarelado, e com formas irregulares de contornos suavizados (mamelonizados), com forte orientação (Foto 3 – Prancha VIII). Parece existir uma relação entre essas zonas de plasma mais claro e a abertura de cavidades. Ocorrem ainda, no interior dos agregados, zonas com orientações estriadas de plasma (estrutura plásmica bimassépica). A porosidade total do material na condição natural analisada é de 63%.

Na condição anterior à inundação (material carregado até 200kPa), não se observam mudanças significativas do ponto de vista micromorfológico. Entretanto, registra-se uma tendência ao aumento das áreas com orientações plásmicas estriadas e um desenvolvimento maior de fissuras finas (Foto 4 – Prancha VIII). A porosidade é reduzida para 61%.

PRANCHA VIII

NITOSSOLO VERMELHO eutroférrico - Profundidade de 1,15 m

Foto 1 - Solo natural (30x) (Lupa binocular)

Observam-se os agregados poliédricos angulares a subangulares de tamanhos variados Foto 2 – Solo natural (30x) (Lupa binocular)

Presença de fissuras e grandes cavidades irregulares e arredondadas que aparecem nas áreas contínuas

Foto 3 – Solo natural (120x) (microscopia óptica – luz natural)

Zona de plasma mais claro, vermelho amarelado a amarelado, com forte orientação.

Foto 4 – Material antes do colapso (30x) (Lupa binocular)

Desenvolvimento maior de fissuras após carregamento.

Foto 5 – Material após colapso (30x) (Lupa binocular)

Contato entre zona de plasma contínuo com zona de plasma mais orientado.

Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (30x) (Lupa binocular)

Houve uma mudança total na estrutura. Os agregados apresentam-se todos deformados.













Após inundação do material na tensão de 200 kPa, ainda se observa a ocorrência de zonas microagregadas, entretanto os seus contornos (limites) parecem ter sido deformados e a porosidade intermicroagregada reduzida. Ficam como ilhas dentro do plasma contínuo (Foto 5 – Prancha VIII). Não se detectam poros tão grandes como no material original. A porosidade total permanece inalterada em relação à condição anterior, valor de 61%. Nas zonas contínuas o plasma mostra-se mais orientado.

Só após inundação na tensão de 200 kPa e recarregamento até 800 kPa verifica-se uma mudança na estrutura do material. Os agregados apresentam-se todos deformados e desaparecem as zonas microdivididas e/ou microagregadas. O material exibe uma estrutura plásmica preferencialmente bimassépica e está cortado por fissuras com distribuição irregular (Foto 6 – Prancha VIII). A porosidade total sofre uma redução significativa para 54%.

Material profundidade de 2,0m a 2,3m (Horizonte Bw)

Os microagregados, como já mencionado anteriormente, apresentam, ao contrário dos microagregados do Latossolo, formas poliédricas subangulares a angulares. A porosidade é constituída por cavidades irregulares de diversos tamanhos, interconectadas (setores com porosidade mais fechada) e por porosidade de empilhamento composto (Foto 1 – Prancha IX). Em zonas de plasma contínuo é freqüente a presença de fissuras finas, curtas e irregulares (Foto 2 – Prancha IX). Os microagregados maiores estão, em geral, delimitados por fissuras. Observam-se, também, grandes poros de origem biológica. Nesta condição natural a porosidade total é de 65%.

Os microagregados constituídos por plasma argilo-férrico vermelho estão orlados por uma estreita faixa de plasma mais amarelo. É esse plasma que estabelece a ponte entre os microagregados, dando-lhes uma continuidade. A estrutura plásmica é argilassépica, localmente insépica (em alguns setores contínuos de plasma). O esqueleto é formado por grãos de minerais escuros e grãos de quartzo de tamanhos variados, angulosos a subangulosos. A estrutura de base é pórfiro-enáulica.

Antes do colapso (material carregado até a tensão de 400 kPa), a porosidade intermicroagregada e cavitária sofre um fechamento. Há um certo grau de esmagamento dos microagregados e o desenvolvimento de fissuras finas nos seus contatos (Foto 3 – Prancha IX). A porosidade total passa a ser de 61%.

Após colapso do material sob tensão de 400 kPa, há o desenvolvimento de fissuras paralelas que cortam todo o material. A porosidade é novamente reduzida (n = 59%) e o material passa a apresentar uma organização predominantemente contínua. A estrutura de base passa a ser porfirogrânica. Os microagregados estão esmagados e os poros mais alongados (Foto 4 – Prancha IX). Em alguns locais ainda aparecem tubos preservados.

As observações efetuadas para o material após colapso sob tensão de 400 kPa e recarregamento até 800 kPa, mostram que a estrutura microagregada é destruída dando origem a um material contínuo (porfirogrânico), Foto 5 – Prancha IX).

A porosidade, de 54%, passa a ser constituída essencialmente por pequenas cavidades, não conectadas, de formas irregulares, mas com mais freqüência alongadas e fissuras finas, algumas verticais.

Observa-se, também, uma tendência à orientação dos grãos do esqueleto segundo duas direções, em um padrão regular ortogonal.

PRANCHA IX

NITOSSOLO VERMELHO eutroférrico - Profundidade de 2,15 m

Foto 1 - Solo natural (30x) (Lupa binocular)

Zona com porosidade mais aberta.

Foto 3 – Solo natural (30x) (Lupa binocular)

Agregados em áreas com porosidade mais fechada se separando por físsuras.

Foto 4 – Material antes do colapso (30x) (Lupa binocular)

A porosidade é mais fechada e o material apresenta fissuras muito estreitas como se os agregados estivessem esmagados.

Foto 5 – Material após colapso (30x) (Lupa binocular)

Zona microagregada esmagada entre áreas contínuas. O material apresenta os poros alongados.

Foto 6 – Material após colapso e recarregamento (30x) (Lupa binocular)

A estrutura microagregada é destruída e o material se apresenta praticamente contínuo.











5.2.4 Porosimetria do Material Ensaiado

A Tabela 5.22 mostra as características físicas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio.

As porosidades totais dos materiais obtidas nos ensaios de porosimetria são, em geral, menores do que aquelas obtidas no final dos ensaios edométricos, atingindo valores da ordem de 60% a 80%. As maiores diferenças, valor de 60%, foram encontradas para o material do horizonte Bt (profundidade de 1,15 m).

Os pesos específicos dos sólidos (γ_s) são também muito inferiores àqueles determinados através do método do picnômetro, apresentando valores como 23,5 kN/m³ para o horizonte Bt. Como no Perfil I, aqui também os valores de γ_s obtidos foram diferentes para uma mesma amostra (bloco).

As porosidades totais dos materiais calculadas para cada situação, tomando o valor de γ_d obtido no ensaio de porosimetria e o valor de γ_s determinado pelo método do picnômetro, aproximam esses valores para 83%, em média, daqueles obtidos no final dos ensaios edométricos. Para esse perfil percebe-se que as maiores variações ocorreram para o material do horizonte Bt. Como já salientado anteriormente, a estrutura do material constituinte desse horizonte, formada, macroscopicamente, por poliedros centimétricos com porosidade essencialmente do tipo fissural, de grande espessura (fendas e rachaduras) levanta dúvidas quanto à representatividade da amostra analisada.

As Figuras 5.52 a 5.57 mostram os resultados dos ensaios de porosimetria efetuados para os materiais nas condições: indeformada, antes e após colapso, representados pelas curvas de porcentagens de poros em relação ao volume de vazios total da amostra (exceto os inacessíveis) e histogramas de freqüência *versus* diâmetro dos poros.

Bloco (Prof.)		Condição do material			Ensaio de Porosimetria										
	Corpo			Carao	eterístic	as finai	s	Características dos corpos de prova							
	de prova		γd	$\gamma_{s}^{(1)}$	ei	ni	S _{ri}	γd	ef	n _f	S _{rf}	$\gamma_d^{(2)}$	$\gamma_{s}^{(2)}$	ne ⁽²⁾	n _c ⁽³⁾
			(kN/m^3)	(kN/m^3)		(%)	(%)	(kN/m^3)		(%)	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)	(%)	(%)
NV ₂ (0,50m)	NV _{2A}	indeformada	11,16	29,8	1,670	62,6	68,1	11,16	1,670	62,6		16,36	28,54	42,7	45,1
	NV_{2B}	antes colapso 200kPa	11,31	29,8	1,635	62,0	70,5	12,35	1,413	58,6	91,7	15,35	27,39	43,9	48,5
	NV _{2C}	após colapso 200kPa	11,11	29,8	1,683	62,7	68,5	12,35	1,413	58,6	91,7	15,77	27,22	42,1	47,1
NIV	NV_{3A1}	indeformada	11,34	30,3	1,672	62,6	71,2	11,34	1,672	62,6		14,71	23,53	37,5	51,4
(1,15m)	NV_{3B}	antes colapso 200kPa	11,36	30,3	1,667	62,5	71,0	11,97	1,532	60,5	74,8	15,04	24,75	39,2	50,3
	NV _{3C}	após colapso 200kPa	11,13	30,3	1,723	63,3	69,5	11,98	1,529	60,5	90,4	14,94	26,22	43,0	50,7
	NV _{6A}	indeformada	10,62	30,2	1,844	64,8	63,2	10,62	1,844	64,8		13,11	24,90	47,3	56,6
NV_6 (2,15m)	NV _{6B}	antes colapso 400kPa	10,66	30,2	1,832	64,7	64,1	11,89	1,539	60,6	73,7	14,35	27,10	47,0	52,5
/	NV _{6C}	após colapso 400kPa	10,48	30,2	1,882	65,3	62,5	12,30	1,456	59,3	94,7	14,57	27,62	47,3	51,8

Tabela 5.22 – Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria (Perfil II)

⁽¹⁾ Peso específico dos sólidos determinado pelo método do picnômetro
⁽²⁾ Características dos corpos de prova obtidos através dos ensaios de porosimetria
⁽³⁾ Porosidade calculada com γ_d obtido no ensaio de porosimetria e γ_s determinado pelo método do picnômetro



Figura 5.52 - Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 0,50 m)



Figura 5.53 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 0,50 m)



Figura 5.54 - Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 1,15m)



Figura 5.55 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 1,15m)



Figura 5.56 - Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 2,15m)



Figura 5.57 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil II - prof. 2,15m)

As curvas obtidas não mostram diferenças muito significativas entre as três condições analisadas para cada nível do perfil, mas evidenciam que as maiores deformações ocorreram por carga do que por inundação, aproximando as curvas antes e após colapso e distanciando-as da condição natural.

Entre os três níveis as maiores variações ocorreram para o material do horizonte Bw (profundidade de 2,15 m). Os histogramas de freqüência mostram deslocamento e achatamento maior das curvas, para as condições antes e após colapso, correspondentes aos poros interagregados, principalmente para as classes dos macro e mesoporos.

Com base nas curvas apresentadas, a Tabela 5.23 exibe os diversos tamanhos de poros existentes nos materiais, de acordo com a classificação de Brewer (1976), e suas respectivas porcentagens de ocorrência.

Deef			Porcentagem de poros									
(m)	Condição	n_{c} (%)	macro	meso	micro	ultramicro	cripto					
()		(, -)	> 75 µm	30 - 75µm	5 - 30µm	0,1 - 5µm	< 0,1µm					
0,50	natural	45,1	6	10	8	4	72					
	antes do colapso	48,5	6	7	9	5	73					
	após colapso	47,1	4	5	8	5	78					
	natural	51,4	6	12	16	8	58					
1,15	antes do colapso	50,3	4	8	14	9	65					
	após colapso	50,7	4	8	14	8	66					
	natural	56,6	8	15	21	9	47					
2,15	antes do colapso	52,5	5	5	17	11	62					
	após colapso	51,8	3	4	19	11	63					

Tabela 5.23 - Classificação dos poros de acordo com Brewer, 1976 - solo natural e ensaiado (Perfil II)

Nota-se que a porosidade, para cada nível analisado, nem sempre foi decrescente, partindo da condição natural até a condição após colapso, como ocorreu nos ensaios edométricos. Mesmo assim, os demais resultados apontam que os percentuais correspondentes aos poros interagregados reduziram, de 24% para 17% e de 44% para 26%, enquanto que

aqueles correspondentes aos vazios intra-agregados aumentaram, de 76% para 83% e de 56% para 74%, para os materiais das profundidades de 0,50 m e 2,15 m, respectivamente. Para a profundidade de 1,15 m, isso ocorreu apenas para a condição anterior ao colapso, isto é, devido ao carregamento. A porcentagem de poros interagregados reduziu de 34% para 26% enquanto que os poros intra-agregados aumentaram de 66% para 74%. Após a inundação não houve qualquer alteração dos percentuais correspondentes às duas famílias de poros (interagregados e intra-agregados).

5.2.5 Síntese dos Resultados

Na avaliação da colapsibilidade do solo argiloso constituinte do Perfil II e denominado Nitossolo Vermelho eutroférrico, os resultados comprovam que as deformações por carregamento foram muito maiores do que por inundação. No geral, as deformações por inundação, obtidas nos ensaios duplos, foram maiores ou muito maiores do que as obtidas nos ensaios simples. Os materiais dos horizontes AB (profundidade de 0,50 m) e Bw (profundidade de 2,15 m) mostraram sensibilidade à inundação, porém o horizonte característico do Nitossolo (Bt – profundidade de 1,15 m) não atingiu um nível de deformação por inundação que o identificasse como colapsível.

Observa-se, ainda, uma relação entre a magnitude do colapso (ensaios duplos) e a tensão de pré-adensamento na condição inundada. Os máximos valores do coeficiente de colapso foram obtidos para as menores tensões. Na condição natural, os valores das tensões de pré-adensamento encontrados para os materiais dos horizontes Bt e Bw foram muito próximos, mas os comportamentos observados quando da sua inundação (ensaios simples) foram distintos.

Esses comportamentos diferenciados podem ser explicados em função das estruturas típicas dos diversos horizontes que compõem este perfil.

As análises micromorfológicas revelaram que até aproximadamente 2,0 m de profundidade (horizontes AB e Bt) a estrutura do Nitossolo é caracterizada, na escala macro, por blocos poliédricos centimétricos delimitados por rede de fissuras de maior abertura (fendas ou rachaduras) que se conectam entre si e, na escala micro, por blocos poliédricos milimétricos, cuja rede de fissuras é constituída por microfissuras com fraca conectividade. Entretanto, para o horizonte Bt a estrutura se apresenta um pouco mais contínua, com poliedros de maior dimensão.

A partir de 2,0 m até o início do solo de alteração (aproximadamente 2,8 m), o material deste horizonte (Bw) é caracterizado por apresentar setores microagregados, em geral de formas poliédricas angulares a subangulares, alternados com setores onde o plasma tem um arranjo contínuo e é cortado por fissuras finas e curtas, abrigando ainda cavidades, algumas de origem biológica. Eventualmente ocorrem zonas de porosidade mais aberta e, nessas, os microagregados tendem a ter formas mais arredondadas. A presença dessas cavidades e zonas microagregadas com maior porosidade geram condições mais favoráveis à manifestação do colapso quando o solo é carregado e inundado.

Os ensaios de porosimetria acusam que a porosidade dominante é do tipo textural (intraagregados), representada principalmente por criptoporos (poros $< 0,1 \ \mu$ m), de acordo com a classificação de Brewer (1976). Nos horizontes AB e Bt, os valores da porosidade intraagregados ficam próximos de 70%, chegando até 76%. No horizonte Bw, em função das modificações estruturais observadas nas análises micromorfológicas, a porosidade textural representa um percentual de 56%. As deformações mais pronunciadas nesse nível provavelmente são comandadas pelos 44% restantes, correspondentes à porosidade estrutural (interagregados). Aqui também, nesse perfil, acredita-se que apesar dos resultados das análises porosimétricas mostrarem as mesmas tendências de comportamentos observados nos ensaios edométricos e nas análises micromorfológicas, há indícios de que a rede de fissuras (fendas), observadas na escala macro, não esteja totalmente representada em função das pequenas dimensões da amostra exigidas pelo ensaio.

A camada superficial, mais evoluída do perfil, apresenta uma constituição mineralógica homogênea (caulinita, gibbsita, hematita, magnetita e quartzo) que não expressa a existência de horizontes estruturalmente distintos. Já os resultados da espectroscopia Mössbauer evidenciaram populações de hematita com variações na cristalinidade e tamanho da partícula nas amostras analisadas. É, especialmente, a diferença entre as porcentagens das populações constituídas por partículas de menor tamanho que distingue os horizontes Bt e Bw, respectivamente 38% e 25 % do total.

Os resultados da caracterização mineralógica permitem concluir que os plasmas dos horizontes Bt e Bw apresentam constituições diferenciadas entre si apenas em termos de fases ferruginosas, e essas devem ser as responsáveis pelas variações de organização microestrutural observadas que, por sua vez interferem no comportamento dos materiais que os constituem.

5.3.1 Caracterização do Material Natural

5.3.1.1 Descrição morfológica

As observações em trincheira, até 2,0 m de profundidade, permitiram a descrição morfológica do Perfil III (Figura 5.58), constituído dos seguintes horizontes:



Figura 5.58 – Latossolo Vermelho distrófico observado em trincheira (Iguatemi, PR)

Ap – 0 a 15 cm – Vermelho escuro (2,5 YR ³/₄), textura areno-argilosa; estrutura subangular, pequena, moderada, que se desfaz em granular pequena; ligeiramente duro friável; ligeiramente pegajoso; ligeiramente plástico; transição ondulada e plana;

- BA 15 a 50 cm Vermelho brunado escuro (2,5 YR ³/₄), textura areno-argilosa (mais arenoso do que o primeiro); estrutura subangular média, forte, que se desfaz em subangular pequena; presença de areia lavada nas faces dos agregados; muito duro firme; não pegajoso; não plástico; transição ondulada gradual;
- Bw₁ 50 a 110 cm Vermelho brunado escuro (2,5 YR ³/₄), textura areno-argilosa; estrutura subangular média, moderada, que se desfaz em granular pequena; duro, macio; não pegajoso; não plástico; transição plana difusa. Há grande diminuição de areia nas faces dos agregados;
- Bw₂ 110 a 200 cm Vermelho escuro (2,5 YR ³/₆), textura areno-argilosa (mais argiloso do que Bw₁); estrutura subangular média, fraca, que se desfaz em granular pequena; ligeiramente duro, macio; não plástico; não pegajoso.

Obs: Presença de raízes pivotantes até aproximadamente 30cm e fasciculadas até aproximadamente 120 cm.

Com base nessa descrição e de acordo com o Sistema de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), o solo evoluído do Perfil III é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (anteriormente designado Latossolo Vermelho Escuro).

5.3.1.2 Caracterização geotécnica

A Figura 5.59 apresenta o perfil de solo típico da área selecionada para estudo, os valores de N_{SPT} provenientes de três sondagens e os resultados dos ensaios de caracterização (análise granulométrica, limites de liquidez e plasticidade e massa específica dos grãos) das amostras coletadas nas sondagens até 14,0 m de profundidade.



Figura 5.59 – Perfil de solo típico – Latossolo Vermelho distrófico (Iguatemi – PR)

O Perfil III é constituído por uma camada superficial de solo evoluído, o Latossolo Vermelho distrófico, com espessura aproximada de 10,0 m, cor marrom avermelhada, e textura areno-argilosa. Os índices de resistência à penetração N_{SPT} são relativamente baixos, valores entre 1 e 3, na parte superior da camada, até 5,0 m, e aumentando com a profundidade, mas não excedendo a 6 até 10,0 m de profundidade. Os pesos específicos dos sólidos variam muito pouco, entre 26,8 kN/m³ e 27,0 kN/m³. Apresenta Índices de Plasticidade entre 9% e 10% nas extremidades desta camada e valores entre 12% e 15% na parte central, entre 4,0 e 7,0 m. Os Limites de Liquidez são crescentes até a profundidade de 6,0m, variando entre 23% e 30%, e a partir desta profundidade, decrescentes, chegando a 26% na transição com a camada inferior.

Abaixo desta camada superficial de solo evoluído encontra-se o solo residual proveniente de arenito (Arenito Caiuá), de cor marrom arroxeado e textura areno-argilosa. O índice de resistência à penetração é variável e flutuante, valores entre 4 e 9, não sendo necessariamente crescente com a profundidade. O Índice de Plasticidade é de 8% no início desta camada e, a partir de 13,0 m, apresenta-se não plástico (IP = N.P). O peso específico dos sólidos é de 26,9 kN/m³ na parte superior, e decresce em profundidade, até atingir 26,7 kN/m³ no contato com o arenito.

Abaixo dessas duas camadas, a aproximadamente 14,0 m, encontra-se o Arenito Caiuá com grau de alteração variável. Até 15,5 m de profundidade, cota de término das sondagens, o nível freático não foi observado.

5.3.1.3 Caracterização física

A Tabela 5.24 fornece os valores de índices físicos naturais do solo para os diferentes níveis, obtidos com os corpos de prova talhados para a realização dos ensaios deste perfil.

Prof. média	Amostra	СР	Wo	γ	γ_{d}	eo	n	Sr
(m)	(Bloco)	N°	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)		(%)	(%)
		1	9,8	15,93	14,51	0,854	46,1	30,9
		2	9,9	16,21	14,75	0,823	45,1	32,4
		3	9,8	15,04	13,70	0,964	49,1	27,3
		4	10,0	15,51	14,11	0,907	47,6	29,6
		5	10,0	16,13	14,67	0,834	45,5	32,2
0,65	LVd ₂	6	9,8	15,95	14,53	0,851	46,0	31,0
		7	10,3	15,45	14,00	0,921	47,9	30,1
		8	10,1	15,71	14,27	0,885	46,9	30,7
		9	9,8	15,14	13,79	0,951	48,7	27,7
		10	9,8	14,73	13,41	1,006	50,1	26,2
		11	10,0	14,8	13,45	1,000	50,0	27,0
		1	10,4	14,42	13,06	1,060	51,5	26,5
		2	10,3	14,63	13,26	1,029	50,7	27,0
		3	10,0	10,0 14,40 13,10 1,054		1,054	51,3	25,4
		4	9,9	13,96	12,71	1,117	52,8	23,8
		5	10,0	14,53	13,21	1,036	50,9	26,0
1 45	LVda	6	10,1	14,09	12,80	1,102	52,4	24,6
1,10	L , u,	7	9,9	14,51	13,19	1,039	51,0	25,7
		8	10,0	13,84	12,58	1,138	53,2	23,6
		9	9,9	14,64	13,32	1,019	50,5	26,2
		10	9,9	14,36	13,07	1,059	51,4	25,1
		11	10,0	14,59	13,27	1,027	50,7	26,1
		12	9,8	14,71	13,40	1,007	50,2	26,0
		1	13,3	16,84	14,86	0,817	45,0	44,0
		2	13,2	16,48	14,56	0,854	46,1	41,6
		3	13,4	16,65	14,68	0,839	45,6	43,2
		4	13,4	16,14	14,23	0,897	47,3	40,3
		5	13,1	16,81	14,86	0,817	45,0	43,3
5 1 5	LVds	6	12,9	15,92	14,09	0,916	47,8	38,1
0,10	<u> </u>	7	13,1	16,04	14,17	0,905	47,5	39,2
		8	13,3	16,66	14,71	0,836	45,5	43,0
		9	13,3	16,92	14,93	0,808	44,7	44,5
		10	13,2	16,17	14,28	0,891	47,1	40,0
		11	13,3	16,39	14,47	0,866	46,4	41,4
		12	13,2	16,90	14,93	0,808	44,7	44,1

Tabela 5.24 - Caracterização física do Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)

Prof. média	Amostra	СР	Wo	γ	γd	eo	n	$\mathbf{S}_{\mathbf{r}}$
(m)	(Bloco)	N°	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)		(%)	(%)
		1	10,4	18,27	16,56	0,625	38,5	44,7
		2	10,4	17,84	16,16	0,664	39,9	42,0
		3	10,8	17,55	15,85	0,698	41,1	41,6
		4	10,4	18,22	16,49	0,631	38,7	44,5
		5	10,4	17,47	15,81	0,701	41,2	40,1
9,35	LVd_7	6	10,5	18,05	16,34	0,646	39,2	43,6
		7	10,5	17,86	16,16	0,665	39,9	42,5
		8	10,5	18,30	16,56	0,624	38,4	45,4
		9	10,5	17,82	16,13	0,668	40,0	42,3
		10	10,4	18,28	16,56	0,624	38,4	44,8
		11	10,5	16,54	14,97	0,797	44,4	35,3
		1	6,0	17,24	16,27	0,641	39,1	25,0
		2	5,9	16,68	15,75	0,695	41,0	22,5
		3	5,8	16,79	15,88	0,682	40,5	22,5
		4	5,5	16,95	16,07	0,662	39,8	22,1
14 15	I Vd.	5	7,0	17,07	15,96	0,673	40,2	27,6
17,15	LVUg	6	6,7	17,38	16,29	0,639	39,0	28,0
		7	6,7	17,41	16,31	0,637	38,9	28,2
		8	6,6	16,82	15,77	0,693	40,9	25,6
		9	7,1	16,98	15,85	0,685	40,7	27,8
		10	6,0	17,07	16,10	0,658	39,7	24,5

Tabela 5.24 - Caracterização física do Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico) - continuação

conclusão

As Tabelas 5.25 e 5.26 apresentam uma análise estatística dos valores encontrados e a Figura 5.60 mostra essas variabilidades ao longo do perfil.

Por se tratar de um solo arenoso, a capacidade de retenção de água é baixa. O teor de umidade natural é em média 10% até 9,35 m de profundidade, excetuando-se o solo da profundidade de 5,15 m, que apresenta um percentual médio de 13%, provavelmente por conter na sua composição maior teor de argila (30%). Na zona de transição com o arenito, a 14,15 m de profundidade, o teor de umidade médio reduz para 6%.

Prof.		w(%)	1		γ (kN/m ²	3))	∕ _d (kN/m	3)		e			n (%))		S _r (%)	(%)		
(m)	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média		
0,65	9,8	10,3	9,9	14,73	16,21	15,51	13,41	14,75	14,11	0,823	1,006	0,909	45,1	50,1	47,6	26,2	32,4	29,5		
1,45	9,8	10,4	10,0	13,84	14,71	14,39	12,58	13,40	13,08	1,007	1,138	1,057	50,2	53,2	51,4	23,6	27,0	25,5		
5,15	12,9	13,4	13,2	15,92	16,92	16,49	14,09	14,93	14,56	0,808	0,916	0,855	44,7	47,8	46,1	38,1	44,5	41,9		
9,35	10,4	10,8	10,5	16,54	18,30	17,84	14,97	16,56	16,14	0,624	0,797	0,668	38,4	44,4	40,0	35,3	45,4	42,4		
14,15	5,5	7,1	6,3	16,68	17,41	17,04	15,75	16,31	16,03	0,637	0,695	0,667	38,9	41,0	40,0	22,1	28,2	25,4		

Tabela 5.25 – Variabilidade das características físicas do solo - Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)

Tabela 5.26 – Análise estatística das características físicas do solo – Perfil III (Latossolo vermelho distrófico)

Prof.		1	desvio	padrão	1	1		C	oeficiente de	e variação (%	6)	1
(m)	W	γ	γd	e	n	Sr	W	γ	$\gamma_{\rm d}$	e	n	Sr
0,65	0,17	0,52	0,48	0,06	1,78	2,16	1,69	3,39	3,39	7,18	3,75	7,31
1,45	0,19	0,28	0,26	0,04	0,96	1,05	1,92	1,96	1,96	3,89	1,86	4,11
5,15	0,13	0,36	0,31	0,04	1,15	2,10	1,01	2,16	2,13	4,64	2,49	5,02
9,35	0,11	0,52	0,47	0,05	1,77	2,86	1,09	2,91	2,94	7,67	4,42	6,74
14,15	0,55	0,25	0,21	0,02	0,81	2,45	8,75	1,45	1,34	3,36	2,02	9,64



Figura 5.60 – Variabilidade das características físicas do solo - Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)

A partir dos horizontes mais superficiais (profundidade de 0,65 m), os índices de vazios mostraram ser decrescentes com a profundidade.

O maior índice de vazios médio, valor em torno de 1,0, foi encontrado para o material da profundidade de 1,45 m e a partir de 9,35 m de profundidade este valor foi reduzido a 0,7.

Resultam assim, baixos graus de saturação, com valores médios de no máximo 42% na porção intermediária do perfil, entre 5,15 m e 9,35 m de profundidade. Valores tão baixos como 26% são encontrados para as profundidades de 1,45 m e 14,15 m.

Os pesos específicos secos oscilam entre 13,0 kN/m³ e 16,0 kN/m³.

Esse perfil mostrou grande variabilidade inerente às propriedades físicas. Como mostra a Tabela 5.26, os maiores coeficientes de variação foram obtidos para o índice de vazios e o grau de saturação. Percentuais entre 7% e 8% relativos ao índice de vazios foram encontrados para os materiais das profundidades de 0,65 m e 9,35 m. Os coeficientes de variação do grau de saturação ficaram entre 4% e 9% em todo o perfil.

5.3.1.4 Micromorfologia do perfil de solo

As análises micromorfológicas realizadas em lupa binocular e em microscópio óptico sobre lâminas delgadas, mostram (Figura 5.61) que o Latossolo Vermelho (textura média) se caracteriza por apresentar ao longo de todo o perfil, um fundo matricial constituído predominantemente por esqueleto (grãos de quartzo) e, secundariamente, por plasma argiloférrico e vazios de empacotamento simples e composto, cavidades e canais.

O esqueleto é formado, preferencialmente, por quartzo que apresenta formas angulosas a subangulosas para os grãos de granulometria mais fina (dimensões em torno de 100 μ m), e arredondados a subarredondados para os grãos maiores (dimensões entre 300 μ m e 500 μ m).

O plasma é vermelho, argilo-férrico, e ora funciona como pontes entre os grãos do esqueleto, ora como material que os envolve e ainda como microagregados de formas arredondadas (os maiores em torno de 500 μ m), isolados ou aglutinados, entre os grãos do esqueleto. Estas formas de relação entre o plasma e esqueleto criam arranjos particulares que, dependendo da predominância, vão caracterizar diferentes setores do perfil de solo.

Assim, até cerca de 1,50 m de profundidade ocorrem zonas onde os grãos do esqueleto estão em parte limpos e em parte ligados em alguns pontos por pontes simples de plasma (estrutura de base denominada mônica-gefúrica por Stoops e Jongerius, 1975); em outros, além dos grãos de esqueleto ligados por pontes de plasma aparecem, também, zonas onde o plasma está mais concentrado englobando os grãos do esqueleto (estrutura de base pórfiro-gefúrica).

Nos setores mônico-gefúricos a porosidade é mais aberta, preferencialmente intergranular e interagregados, tornando-se mais fechada nas áreas pórfiro-gefúricas, onde aparece uma porosidade cavitária comunicante.

A partir de 1,50 m de profundidade até alcançar a alteração do Arenito Caiuá (10,0 m), as características micromorfológicas do solo se mantêm relativamente uniformes. A estrutura de base predominante é a pórfiro-enáulica a pórfiro-gefúrica. O aumento da fase argilosa em profundidade implica na presença maior de setores pórfiro-enáulicos. Mesmo quando a estrutura, em determinadas zonas é essencialmente porfirogrânica, aqui, ela engloba uma quantidade maior de cavidades de diversos tamanhos, relativamente comunicantes que se distribuem entre os grãos do esqueleto e o plasma que os une. Muito raramente, esses setores exibem um arranjo mais fechado, isto é, sem cavidades. Quando isso ocorre, em geral, aparecem fissuras finas e curtas cortando o plasma e/ou acompanhando os contatos plasma/grãos do esqueleto.
Contudo, observa-se uma tendência, à medida que a profundidade aumenta, para um maior fechamento da porosidade, que se torna cada vez mais do tipo cavitária, menos comunicante, principalmente nos setores porfirogrânicos. Assim, mesmo não ocorrendo aumento significativo da fase argilosa, há uma redução da porosidade e uma maior expressão das áreas porfirogrânicas. Isso se deve, em grande parte, a um maior imbricamento dos grãos do esqueleto que acaba por reduzir o espaço poral entre eles, gerando setores porfirogrânicos mais contínuos.

Observa-se, ainda, em alguns locais uma orientação dos grãos de esqueleto, geralmente circular, em torno de grandes poros (seções de canais), com diâmetros superiores a 500 µm.

A maiores profundidades, em torno de 9,0 m, começam a ocorrer orientações dos grãos do esqueleto ao longo de linhas oblíquas, geralmente nas áreas de maior imbricamento dos grãos.

A 14,0 m de profundidade, na transição para o Arenito Caiuá alterado, as características mudam significativamente. Arranjos paralelos envolvendo alternâncias de concentração de fase argilosa e ausência dela, assim como concentrações de grãos de granulometrias distintas (níveis de concentração de grãos finos – dimensões em torno de 70 µm, alternados com níveis mais grosseiros – dimensões de 400 µm ou mais) caracterizam esse material. Esses arranjos paralelos podem ser interpretados como heranças da estrutura original da rocha.

Em alguns níveis os grãos de quartzo estão mais limpos e o seu empilhamento cria uma porosidade intergranular. Esses níveis se alternam com outros onde os grãos estão englobados em uma fase argilosa que fecha a porosidade. Existem ainda níveis onde os grãos mais finos estão soldados entre si por material argiloso, enquanto que os grãos mais grosseiros permanecem individualizados e limpos. A porosidade é aqui preferencialmente cavitária, comunicante.

243



Horizonte Bw

Arranjos do tipo gefúrico (grãos unidos por pontes de plasma) e mônico (grãos isolados). Há predomínio da fração areia com uma participação pequena da fase argilosa.

- 0,80 m

Horizonte Bw

Estrutura de base é pórfiroenáulica-gefúrica. Apresenta uma fase argilosa maior do que no nível acima. É comum a presença de grandes cavidades de formas arredondadas.

- 1,50 m

Horizonte Bw

Estrutura predominante é a pórfiro-enáulica a pórfirogefúrica. O aumento da fase argilosa em profundidade implica na presença maior de setores pórfiro-enáulicos.

- 10,0 m

Horizonte C

(interface com o Arenito Caiuá alterado) Arranjos paralelos (vestígios da estratificação da rocha original), com alternância de níveis de concentração de grãos finos e de níveis mais grosseiros.

Figura 5.61 - Micromorfologia do solo natural (indeformado) - Perfil III

5.3.1.5 Caracterização mineralógica

As análises mineralógicas por difração de raios-X foram realizadas para o material (pó) do Latossolo Vermelho constituintes do perfil até 14,15 m de profundidade.

Os resultados apresentados na Tabela 5.27 mostram a presença de caulinita, hematita e quartzo em todo o perfil.

Os minerais gibbsita e anatásio estão também presentes na camada de solo evoluído até 5,15 m de profundidade. A presença de caulinita pode ser explicada como decorrente da alteração do feldspato usualmente presente no Arenito Caiuá, a qual estaria, em parte, transformado em gibbsita no solo evoluído.

A Figura 5.62 apresenta dois difratogramas dos materiais correspondentes às profundidades de 1,45 m (amostra 3) – solo evoluído e 14,15 m (amostra 5) – solo de alteração (interface com o Arenito Caiuá alterado).

te				MINERAIS PRESENTES						
Horizon	Amostra	Profundidade média (m)	Material selecionado	Caulinita	Gibbsita	Hematita	Quartzo	Anatásio		
	1	0,65								
Bw	2	1,45								
Dw	3	5,15	total (amostras indeformadas)							
	4	9,35								
C	5	14,15								

Tabela 5.27 - Mineralogia do Perfil III (Latossolo Vermelho distrófico)



Figura 5.62 – Difratogramas característicos dos materiais constituintes do Perfil III

5.3.1.6 Porosimetria

Os resultados das análises porosimétricas obtidos para os materiais constituintes do Perfil III até aproximadamente 9,0 m de profundidade (solo evoluído) são apresentados nas Figuras 5.63 e 5.64, através das curvas de distribuição diferencial (histogramas de freqüência) e porcentagens de poros em relação ao volume de vazios total da amostra (exceto os inacessíveis) *versus* diâmetro dos poros.



Figura 5.63 - Curvas de distribuição de poros (solo natural) - Perfil III

Como nos Perfis I e II, os histogramas de freqüência de poros apresentam, para todos os níveis, uma distribuição bimodal, representadas por duas famílias de poros: uma família com diâmetros entre 10 μ m e 200 μ m (poros interagregados) e outra família de poros com diâmetros entre 0,01 μ m e 0,1 μ m (vazios intra-agregados).

As curvas representadas nas Figuras 5.63 e 5.64 mostram grande similaridade na distribuição dos poros para os materiais de três níveis estudados (profundidades de 0,65 m, 1,45 m e 9,35 m). Nesses materiais, os poros interagregados estão representados por um diâmetro médio em torno de 50 µm e os vazios intra-agregados aproximadamente 0,02 µm. O material da profundidade de 5,15 m apresentou uma distribuição um pouco diferenciada dos demais, onde os poros interagregados estão representados por um diâmetro médio de 30 µm e os vazios intra-agregados por um diâmetro médio de 30 µm e



Figura 5.64 - Histogramas de freqüência de poros (solo natural) - Perfil III

Essa distribuição diferenciada é compatível com os resultados fornecidos pela Tabela 5.28, onde se verifica que, nesse nível (prof. 5,15m), o solo apresenta uma porosidade menor, 41,3%. Com base na classificação de Brewer (1976), para essa profundidade, os poros

interagregados correspondem a 57% e os vazios intra-agregados, 43%, enquanto que para os demais níveis esses percentuais ficam em torno de 75% e 25%, respectivamente. Isso pode ser justificado pela presença de maior teor de argila nesse nível e pela forma como ela se apresenta, microagregada, observado através das análises micromorfológicas.

D C		Porcentagem de poros										
Prof. (m)	n_{c} (%)	macro meso		micro	ultramicro	cripto						
()	(, , ,	$>75 \ \mu m$	30 - 75µm	5 - 30µm	0,1 - 5µm	< 0,1µm						
0,65	45,5	9	46	23	5	17						
1,45	47,0	15	40	18	5	22						
5,15	41,3	5	14	38	9	34						
9,35	45,4	10	45	17	4	24						

Tabela 5.28 – Classificação dos poros de acordo com Brewer, 1976 – Solo natural (Perfil III)

5.3.2 Ensaios Edométricos

Para o Perfil III, foram realizados 44 ensaios edométricos dos quais 36 ensaios foram utilizados para a avaliação da colapsibilidade (26 ensaios simples e 5 ensaios compondo a série de ensaios duplos) e 8 ensaios simples realizados exclusivamente para a obtenção de corpos de prova empregados nas análises micromorfológicas e ensaios de porosimetria.

5.3.2.1 Curvas de compressão

A Figura 5.65 apresenta as curvas de compressão, normalizadas, obtidas nos ensaios edométricos simples para todas as amostras ensaiadas, onde se observam comportamentos típicos dos materiais pedologicamente mais evoluídos, que constituem o conjunto superior deste perfil.

As deformações induzidas pelo umedecimento (deformações de colapso), medidas sob tensões que variaram de 25 kPa a 1600 kPa, estão representadas a partir da curva de compressão natural do solo para cada nível estudado.



- c) Material profundidade de 5,15m
- d) Material profundidade de 9,35m

Figura 5.65 - Efeito da inundação do solo para os diferentes níveis do Perfil III - Ensaios simples

As curvas evidenciam grandes deformações volumétricas por inundação (colapso), principalmente para os horizontes mais superficiais.

As Figuras 5.66 e 5.67 mostram as curvas de compressão para os materiais, normalizadas, para a condição natural e inundada desde o início do ensaio (tensão de 1,25kPa). Aqui foram também acrescentados os resultados obtidos para o material da profundidade de 14,15 m. O seu comportamento é diferenciado por se tratar de um material da interface com o Arenito Caiuá.

Observa-se que as demais curvas estão, também, posicionadas de forma coerente com as outras análises já efetuadas. Como nos ensaios simples, se comparados os resultados para as duas condições, natural e inundada, verifica-se que os maiores deslocamentos das curvas pelo efeito da inundação são atribuídos aos materiais dos horizontes mais superficiais.

As deformações volumétricas dos corpos de prova ensaiados juntamente com as suas características físicas determinadas nos ensaios simples e duplos são mostrados na Tabela 5.29.

Como as deformações volumétricas por inundação foram mais severas para os materiais da parte mais superficial do perfil (até 1,45 m), em geral, elas foram também maiores do que as deformações provocadas pelo carregamento. Para os níveis inferiores (5,15 m e 9,35 m), as deformações por inundação são de mesma ordem de grandeza, porém as deformações por carga alcançadas para o material da profundidade de 5,15 m foram muito superiores àquelas observadas para o material da profundidade de 9,35 m.

Os graus de saturação finais obtidos foram, para a maioria dos corpos de prova ensaiados, menores do que 100%. Provavelmente a retenção de água, após a retirada dos corpos de prova da célula edométrica, não ocorreu na sua totalidade, por ser esse solo arenoso altamente drenante.



Figura 5.66 - Curvas de compressão do solo normalizadas (umidade natural) - Perfil III



Figura 5.67 - Curvas de compressão do solo normalizadas (solo inundado) - Perfil III

		Ensaio Nº	Condiçõ	ões dos corp	os de prova	nos ensaios	Tensão de	Índice d	e vazios	Deformação Volumétrica		
Prof. (m)	Amostra (Bloco)			Inicial		Final	inundação	antes e após	a inundação	$\Delta V/V$	o (%)	
			eo	w _o (%)	S _{ro} (%)	S _{rf} (%)	(kPa)	ei	e _f	carregamento	inundação	
	LVd ₂	1	0,854	9,8	30,9	40,9	-	-	-	-	-	
		2	0,823	9,9	32,4	95,3	1,25	0,822	0,824	0,05	-0,11	
0,65		3	0,964	9,8	27,3	92,2	25	0,941	0,918	1,17	1,18	
		4	0,907	10,0	29,6	87,0	50	0,878	0,853	1,52	1,33	
		5	0,834	10,0	32,2	86,7	100	0,798	0,752	1,96	2,56	
		6	0,851	9,8	31,0	86,9	200	0,789	0,674	3,35	6,43	
		$7(LVd_{2D})$	0,921	10,3	30,1	89,5	400	0,754	0,600	8,69	8,78	
		8	0,885	10,1	30,7	85,6	800	0,651	0,539	12,41	6,78	
		9	1,060	10,4	26,5	45,8	-	-	-	-	-	
		10	1,029	10,3	27,0	95,2	1,25	1,028	1,028	0,05	0,00	
		11	1,054	10,0	25,4	97,9	25	1,031	0,959	1,12	3,55	
1 45	LVda	12	1,117	9,9	23,8	95,1	50	1,076	0,869	1,94	9,97	
1,10	Lvuş	13	1,036	10,0	26,0	94,5	100	0,976	0,757	2,95	11,08	
		14 (LVd _{3D})	1,102	10,1	24,6	92,2	200	0,921	0,658	8,61	13,69	
		15	1,039	9,9	25,7	90,2	400	0,783	0,574	12,56	11,72	
		16	1,138	10,0	23,6	89,3	800	0,711	0,511	19,97	11,69	

Tabela 5.29 - Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos - Perfil III

() corpos de prova submetidos também à análises porosimétricas e/ou micromorfológicas

continua ...

			Condiçõ	ies dos corp	os de prova	nos ensaios	Tensão de	Índice de v	azios antes	Deformação Volumétrica		
Prof. (m)	Amostra (Bloco)	Ensaio Nº		Inicial		Final	inundação	e após a inundação		$\Delta V/V$	o (%)	
			eo	w _o (%)	S _{ro} (%)	S_{rf} (%)	(kPa)	ei	e _f	carregamento	inundação	
		17	0,817	13,3	44,0	*	-	-	-	-	-	
	LVd5	18	0,854	13,2	41,6	96,5	1,25	0,855	0,857	-0,05	-0,11	
		19	0,839	13,4	43,2	99,3	25	0,817	0,812	1,20	0,28	
		20	0,897	13,4	40,3	94,8	50	0,864	0,855	1,74	0,48	
5,15		21	0,817	13,1	43,3	97,9	100	0,769	0,754	2,64	0,85	
		22(LVd _{5D})	0,916	12,9	38,1	89,3	200	0,802	0,733	5,95	3,83	
		23	0,905	13,1	39,2	92,6	400	0,683	0,628	11,65	3,27	
		24	0,836	13,3	43,0	95,9	800	0,556	0,536	15,25	1,29	
		25	0,817	13,3	44,0	91,5	1600	0,484	0,476	18,33	0,54	
		26	0,625	10,4	44,7	49,3	-	-	-	-	-	
		27	0,664	10,4	42,0	100,0	1,25	0,664	0,667	0,00	-0,18	
		28	0,698	10,8	41,6	91,7	50	0,674	0,670	1,41	0,24	
935	L.V.d ₇	29	0,631	10,4	44,5	89,4	100	0,605	0,602	1,59	0,19	
,50	L V u/	30	0,701	10,4	40,1	90,4	200	0,659	0,635	2,47	1,45	
		31	0,646	10,5	43,6	92,9	400	0,600	0,567	2,79	2,06	
		32 (LVd _{7D})	0,665	10,5	42,5	92,5	800	0,570	0,518	5,71	3,31	
		33	0,624	10,5	45,4	84,1	1600	0,510	0,459	7,02	3,38	
		34	0,683	8,7	33,9	*	-	-	-	-	-	
14,15	LVd ₉	35	0,740	8,7	31,3	100,0	1,25	0,740	0,743	0,00	-0,17	
		36 (LVd _{9C})	0,683	8,7	33,9	89,9	1600	0,556	0,553	7,55	0,19	

Tabela 5.29 – Deformações volumétricas dos corpos de prova nos ensaios edométricos – Perfil III (Continuação)

() corpos de prova submetidos também à análises porosimétricas e/ou micromorfológicas * corpos de prova inundados no final do ensaio (tensão 1600 kPa)

conclusão.

5.3.2.2 Tensão de pré-adensamento

A Tabela 5.30 apresenta as tensões totais verticais geostáticas (σ_0), as tensões de préadensamento (σ_p) e os índices de compressão (C_c) do solo nas condições natural e inundada desde o início do ensaio.

As tensões totais verticais geostáticas (σ_0) foram obtidas tomando-se como valor dos pesos específicos naturais os valores médios encontrados quando da talhagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios.

rubela 5:50 Tensões e malees de compressão obtidos nos ensaios simples e duplos (Ferri III)								
	Prof.	Condição	Tensão Vertical	Tensão de	Índice de			
Amostra (Bloco)	média	de	Geostática	Pré-adensamento	Compressão			
()	(m)	Umidade	(kPa)	(kPa)	C _c			
LVd ₂	0.65	natural	10	320	0,306			
	0,00	inundada		64	0,256			
LVA	1 45	natural	22	130	0,435			
L v d3	1,45	inundada		27	0,360			
LVdc	5 1 5	natural	83	205	0,326			
L v d ₃	5,15	inundada		102	0,319			
I Vd-	935	natural	158	540	0,169			
L v U7	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	inundada		205	0,226			

Tabela 5.30 – Tensões e índices de compressão obtidos nos ensaios simples e duplos (Perfil III)

A Figura 5.68 exibe as variações desses valores ao longo da profundidade (perfil vertical).

Como observado para os outros perfis estudados, as tensões de pré-adensamento natural são, também, para todos os níveis, maiores do que as tensões geostáticas, indicando um préadensamento do solo. A Figura 5.68 mostra que esse efeito é mais pronunciado no nível mais superficial (profundidade de 0,65 m). A partir de 1,45 m, as tensões de pré-adensamento, na condição natural e inundada, são crescentes com a profundidade. A maior diferença entre elas é observada para a profundidade de 9,35 m.



Figura 5.68 - Tensões geostáticas e de pré-adensamento e índices de compressão do solo - Perfil III

A redução dos índices de compressão pelo efeito da inundação é observada somente para as amostras superficiais.

5.3.2.3 Colapsibilidade do solo

A Tabela 5.31 mostra, na forma comparativa, os coeficientes de colapso estruturais obtidos para os materiais do perfil, nos ensaios edométricos simples e duplos, até a tensão de 1600 kPa.

Tabela 5.3	abela 5.51 - Coefficientes de colapso estruturais (ensalos simples e duplos) - Perfil III													
	Prof.		Coeficiente de colapso estrutural - (%)											
Amostra	média (m)	Ensaio	Tensão Vertical (kPa)											
			12,5	25	50	100	200	400	800	1600				
LVd_2	0,65	simples		1,18	1,33	2,56	6,43	8,78	6,78					
		duplo	0,47	1,08	1,83	3,78	7,04	9,24	9,00	7,15				
LVA	1.45	simples		3,55	9,97	11,08	13,69	11,72	11,69					
	1,45	duplo	0,62	1,69	5,27	9,50	11,55	10,43	7,97	5,57				
LVda	5 1 5	simples		0,28	0,48	0,85	3,83	3,27	1,29	0,54				
L • 45	5,15	duplo	-0,25	0,12	0,37	1,16	3,87	4,84	4,19	3,07				
LVd ₇	935	simples			0,24	0,19	1,45	2,06	3,31	3,38				
	,55	duplo	-0,21	0.01	0.35	0.69	1.63	3,65	6,34	7,12				

Tabela 5.31 - Coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples e duplos) - Perfil III

Obs: Os valores negativos indicam expansão das amostras com a inundação

Os materiais constituintes desse perfil apresentaram os maiores coeficientes de colapso observados entre todos os perfis estudados. Valores entre 7% e 14% são exibidos pelas amostras referentes às profundidades de 0,65 m e 1,45 m para uma larga faixa de tensões (50kPa – 1600 kPa). Para os materiais dos níveis mais profundos (5,15 m e 9,35 m) os coeficientes obtidos são também bastante expressivos, valores entre 4% e 7%, registrados para tensões entre 200 kPa e 1600 kPa.

Os coeficientes de colapso resultantes dos ensaios duplos foram, para a maioria dos casos, maiores do que aqueles obtidos nos ensaios simples, para uma mesma tensão aplicada. Somente o material da profundidade de 1,45 m apresentou maiores coeficientes nos ensaios simples do que nos ensaios duplos, como pode ser constatado na Figura 5.69.



Figura 5.69 - Comparação entre os coeficientes de colapso (ensaios simples e duplos) - Perfil III

As Figuras 5.70 e 5.71 mostram as variações dos coeficientes de colapso estrutural em função das tensões aplicadas obtidos nos ensaios edométricos simples e duplos, respectivamente. Observa-se que os maiores coeficientes, tanto nos ensaios simples quanto nos duplos ocorreram para tensões entre 200 kPa e 400 kPa. Porém, observa-se que, mesmo para tensões elevadas aplicadas como de 800 kPa ou 1600 kPa, os resultados obtidos ainda são altamente expressivos.

As variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade, para as diferentes tensões aplicadas, são visualizadas nas Figuras 5.72 e 5.73.

Assumindo um índice de colapso de 2% como o limite entre solos colapsíveis e não colapsíveis, pode-se constatar nas Figuras 5.72 e 5.73 que os materiais de todos os níveis do perfil estudado são extremamente sensíveis à inundação, quer se considere os resultados dos ensaios simples ou duplos.



Figura 5.70 - Variações dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios simples) - Perfil III



Figura 5.71 - Variação dos coeficientes de colapso estruturais (ensaios duplos) - Perfil III



Figura 5.72 - Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade (Perfil III) – ensaios simples



Figura 5.73 - Variações dos coeficientes de colapso ao longo da profundidade (Perfil III) – ensaios duplos

Os coeficientes de colapso em função das relações entre as tensões de inundação (σ_i) e as tensões de pré-adensamento natural (σ_{pn}) podem ser visualizados na Figura 5.74.

Os maiores coeficientes de colapso são comandados por (σ_i/σ_{pn}) entre 1,0 e 3,0, observados para as amostras correspondentes às profundidade de 0,65 m e 1,45 m. As máximas deformações de colapso, valores entre 9 e 14%, entretanto, são restritas por (σ_i/σ_{pn}) entre 1,0 e 2,5.



Figura 5.74 – Coeficiente de colapso estrutural em função de (σ_i / σ_{pn}) para as amostras do Perfil III

Os coeficientes de colapso (C) de acordo com Reginatto e Ferrero (1973), representados na Figura 5.75, permitem classificar os materiais do Perfil III, segundo esses autores, como condicionalmente colapsíveis (0< C< 1), isto é, a ocorrência do colapso dependerá do nível de tensão aplicada. O coeficiente (C) para todos os níveis estão abaixo de 0,2, portanto muito próximos ao limite (C = 0).



Figura 5.75 – Coeficiente de colapsibilidade do solo – Perfil III (REGINATTO; FERRERO, 1973)

5.3.3 Micromorfologia do Material Ensaiado (evolução da microestrutura sob carregamentos e inundação)

Na Tabela 5.32 podem ser encontradas as características físicas dos 21 corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas. As deformações volumétricas por colapso para as amostras referentes às profundidades de 0,65 m e 9,35 m foram praticamente iguais às deformações por carga. No entanto, para os níveis intermediários (profundidades de 1,45 m e 5,15 m) as deformações por carga superaram àquelas devido à inundação, especialmente para 1,45 m. A presença de grandes poros intergranulares e interagregados comunicantes detectados nas análises micromorfológicas para esse material deve ter sido o principal responsável pelo comportamento observado.

Bloco	Corpo	Condição do material		Ens acterísti	aio edom cas dos co	étrico rpos de	prova	Índice de vazios antes e		Deformação Volumétrica		Micromorfologia Características dos	
(Prof.)	prova			iniciai	s	finais		apos inundação		$\Delta V/$	Vo (%)	corpos de j	orova
	I		eo	n (%)	S _{ro} (%)	ef	S _{rf} (%)	e _{ai}	$e_{\rm fi}$	carga	colapso	$\gamma_{\rm d} (kN/m^3)$	n (%)
]	LVd _{2A1}	indeformada 1,0		50,0	27,0			-	-	-	-	13,45	50,0
I Vd.	LVd_{2A2}	indeformada	0,968	49,2	27,9			-	-	-	-	13,67	49,2
(0,65m)	LVd_{2B} *	antes colapso 400kPa	0,951	48,7	27,7	0,779	31,8	-	-	8,80	-	15,12	43,8
	LVd_{2C} *	após colapso 400kPa	1,006	50,1	26,2	0,590	83,7	0,781	0,590	11,21	10,72	16,92	37,1
	LVd_{2D}	após colapso 400kPa e recarregada até 1600kPa	0,921	48,0	30,1	0,496	89,5	0,754	0,600	15,21	8,78	17,98	33,2
LVd ₃ (1,45m)	LVd_{3A1}	indeformada	1,027	50,7	26,1			-	-	-	-	13,27	50,7
	LVd_{3A2}	indeformada 1,		50,2	26,0			-	-	-	-	13,40	50,2
	LVd _{3B} *	antes colapso 200kPa 1		50,5	26,2	0,895	28,8	-	-	6,14	-	14,20	47,2
	LVd _{3C} *	após colapso 200kPa 1		51,4	25,1	0,667	82,1	0,922	0,667	6,65	13,27	16,14	40,0
	LVd_{3D}	após colapso 200kPa e recarregada 1600kPa	1,102	52,4	24,6	0,464	90,7	0,921	0,658	20,31	13,69	18,37	31,7
	LVd _{5A1}	indeformada		46,4	41,4			-	-	-	-	14,47	46,4
T T 7 1	LVd _{5A2}	indeformada	0,808	44,7	44,1			-	-	-	-	14,93	44,7
LVa_5 (5.15m)	LVd _{5B} *	antes colapso 200kPa	0,808	44,7	44,5	0,755	45,3	-	-	2,93	-	15,38	43,0
(0,1011)	LVd _{5C} *	após colapso 200kPa	0,891	47,1	40,0	0,751	82,3	0,804	0,751	4,60	2,94	15,42	42,9
	LVd _{5D}	após colapso 200kPa e recarregada até 1600kPa	0,916	47,8	38,1	0,496	89,3	0,802	0,733	19,63	3,83	18,05	33,2
	LVd _{7A}	indeformada	0,797	44,3	35,3			-	-	-	-	14,97	44,3
LVd ₇	LVd _{7B} *	antes do colapso 800kPa	0,668	40,0	42,3	0,551	46,7	-	-	7,01	-	17,34	35,5
(9,35m)	LVd _{7C} *	após colapso 800kPa	0,624	38,4	44,8	0,521	80,0	0,571	0,521	3,26	3,18	17,69	34,3
	LVd _{7D}	após colapso 800kPa e recarregada até 1600kPa	0,665	39,9	42,5	0,466	92,5	0,570	0,518	9,13	3,31	18,35	31,8
LVd ₉	LVd _{9A}	indeformada	0,693	40,9	25,6			-	-	-	-	15,77	40,9
(14,15m)	LVd _{9C}	após colapso 1600 kPa	0,641	39,1	25,0	0,515	84,2	0,517	0,515	7,56	0,13	17,01	36,3

Tabela 5.32 - Características físicas dos corpos de prova submetidos às análises micromorfológicas - Perfil III

* ensaios edométricos realizados exclusivamente para as análises micromorfológicas e porosimetria

A seguir são descritas as feições da micromorfologia do solo constituinte do Perfil III, embasadas nas observações efetuadas em lupa binocular e microscópio óptico petrográfico.

As Pranchas X, XI, XII e XIII mostram o material na condição natural e ensaiado utilizando-se os aumentos mais adequados para cada situação.

Material – profundidade de 0,50 m a 0,80 m (Horizonte Bw)

As Fotos 1 e 2 – Prancha X mostram que para o nível mais superficial há um predomínio das frações areia do solo e uma participação pequena da fase argilosa. Observa-se que muitos grãos de quartzo estão limpos ou apenas soldados entre si por estreitas pontes de plasma. Somente em alguns locais o plasma aparece mais concentrado englobando os grãos do esqueleto chegando a formar agregados maiores com estrutura de base porfirogrânica. Predomina, contudo, os arranjos do tipo gefúrico (grãos unidos por pontes de plasma) e mônico (grãos isolados), tendo ainda a ocorrência de pequenos agregados arredondados de plasma isolados (estrutura enáulica) em meio aos grãos do esqueleto. Esses arranjos geram uma porosidade muito aberta com a presença de grandes poros intergranulares e interagregados comunicantes.

Na condição anterior ao colapso - material carregado até 400 kPa, observa-se (Foto 3 – Prancha X) uma redução da porosidade, que afeta principalmente os poros maiores sem, contudo, eliminá-los completamente. Em função da redução da porosidade, há um aparente aumento de setores com estrutura de base gefúrica ou enáulica-gefúrica. Os setores mônicos praticamente desaparecem.

Após colapso na tensão de 400 kPa ocorre, como mostra a Foto 4 – Prancha X, um fechamento importante da porosidade no qual o material se apresenta com aspecto mais contínuo, com orientação de plasma e grãos.

PRANCHA X

LATOSSOLO VERMELHO distrófico - Profundidade de 0,65m

Foto 1 - Solo natural (18x) (Lupa binocular) Foto 2 – Solo natural (30x) (Lupa binocular)

Há um predomínio da fração areia com pequena participação da fase argilosa. Os grãos de quartzo se apresentam mais limpos.

Presença de zona com mais plasma. Observam-se microagregados arredondados isolados. Foto 3 – Material antes do colapso (18x) (Lupa binocular)

Área com destruição parcial da macroporosidade ocasionada pelo carregamento.

Foto 4 – Material após o colapso (18x) (Lupa binocular)

Fechamento importante da macroporosidade. O material se apresenta com aspecto mais contínuo, com orientações de plasma e grãos.

Foto 5 – Material após colapso e recarregamento (18x) (Lupa binocular)

O fechamento é ainda maior e mostra feições oblíquas.











Após colapso do material sob tensão de 400 kPa e recarregamento até 1600kPa, a porosidade foi ainda mais reduzida e o material apresenta uma estrutura de base essencialmente porfirogrânica em função do grande embricamento dos grãos do esqueleto. O plasma perde a sua organização em microagregados e se distribui agora de forma contínua entre os grãos do esqueleto formando áreas porfirogrânicas fechadas (sem porosidade cavitária). O nível de embricamento maior dos grãos do esqueleto é evidenciado por ajustamentos maiores de faces entre as partículas e por alinhamentos oblíquos (em duas direções – padrão ortogonal) mais evidentes (Foto 5 – Prancha X).

Material – profundidade de 1,30m a 1,60m (Horizonte Bw)

Como já foi referido anteriormente esse material apresenta uma fase argilosa maior do que no nível acima. A estrutura de base aqui é pórfiro-enáulica-gefúrica, associada a uma porosidade cavitária parcialmente comunicante em alguns setores (porfirogrânicos) e essencialmente comunicante em outros (nos setores enáulicos e gefúricos). É bastante comum, nesse nível, a presença de grandes cavidades de formas arredondadas e de canais que chegam a medir 2000 μ m ou mais de diâmetro (Fotos 1 e 2 – Prancha XI).

Antes do colapso (material carregado até 200kPa) as modificações observadas (Foto 3 – Prancha XI) são relativas principalmente à redução e deformação dos grandes vazios cavitários. Essa redução praticamente não atinge os poros cavitários menores. Os arranjos entre o plasma e o esqueleto não mostram sinais de alteração para essa condição.

Após colapso na tensão de 200 kPa, ocorre um fechamento da porosidade, as cavidades maiores foram destruídas ou muito reduzidas em seu tamanho original (geralmente alongadas). Já é visível um imbricamento dos grãos do esqueleto e a predominância de áreas porfirogrânicas abertas (porosidade cavitária presente), em detrimento das áreas gefúricas e/ou enáulicas originais (Foto 4 – Prancha XI).

PRANCHA XI

LATOSSOLO VERMELHO distrófico - Profundidade de 1,45m

Foto 1 - Solo natural (18x) (Lupa binocular)

Presença de macroporos

Foto 2 – Solo natural (30x) (Lupa binocular)

Aspecto geral do material. Áreas contínuas e microagregadas

Foto 3 – Material antes do colapso (18x) (Lupa binocular)

Ocorrem poucas modificações na estrutura. A macroporosidade é parcialmente perdida. Foto 4 – Material após colapso (18x) (Lupa binocular)

Observa-se um maior fechamento da macroporosidade, com o surgimento de fissuras paralelas.

Foto 5 – Material após colapso e recarregamento (30x) (Lupa binocular)

Fechamento maior da porosidade, com o desenvolvimento de fissuras paralelas.











Observa-se, também, uma visível tendência à orientação dos grãos do esqueleto, segundo linhas obliquas, como foi observado no caso anterior.

Após colapso tensão de 200 kPa e recarregamento até 1600 kPa como foi observado no nível acima, para essa mesma condição, há uma redução grande da porosidade e a geração preferencial de arranjos porfirogrânicos mais fechados, já que o plasma tende a se distribuir entre os grãos do esqueleto de forma mais contínua. O embricamento dos grãos aumenta, mas a quantidade maior de plasma neste nível impede o ajustamento face a face, observado em grande quantidade no nível acima. Aqui aparecem fissuras finas, paralelas que cortam o plasma e/ou acompanham os contatos plasma/esqueleto (Foto 5 – Prancha XI).

Material – profundidade de 5,00 m a 5,30 m (Horizonte Bw)

A essa profundidade domina a estrutura de base pórfiro-enáulica, os setores gefúricos podem ocorrer, mas apenas localmente. Entretanto, já se observa uma redução significativa na ocorrência de microagregados constituídos exclusivamente de plasma. Eles ainda aparecem, com tamanhos pequenos, formas arredondadas, isolados e/ou aglutinados, geralmente associados à zonas mais porosas do material (Fotos 1 e 2 – Prancha XII). A porosidade se mantém essencialmente cavitária, comunicante, mesmo em áreas porfirogrânicas, incluindo ainda a presença de grandes poros cavitários de formas irregulares, às vezes interconectados, que chegam a medir 1000 µm de diâmetro. Cortando o plasma nas zonas preferencialmente porfirogrânicas aparecem fissuras muito finas e curtas.

Antes do colapso (material carregado até 200 kPa), como no caso anterior, observa-se (Foto 3 – Prancha XII) a redução e deformação dos grandes poros cavitários sem, contudo, verificar-se mudanças significativas na estrutura de base. Ela se mantém pórfiro-enáulica e os microagregados de plasma ainda estão preservados. A porosidade remanescente é essencialmente cavitária, comunicante em alguns setores e parcialmente conectada em outros.

Após colapso (tensão de 200 kPa), a organização geral é muito semelhante à que foi observada para o nível se 1,45m de profundidade. A estrutura de base se torna preferencialmente porfirogrânica, com setores mais abertos (porosidade cavitária) e outros fechados, associada a uma imbricação dos grãos do esqueleto. Os setores microagregados foram reduzidos e os que sobraram também sofreram um fechamento parcial da sua porosidade. Verifica-se, ainda, a tendência à orientação dos grãos do esqueleto segundo linhas oblíquas, sendo visível em um setor da lâmina delgada (Foto 4 – Prancha XII) superfícies que indicam deslizamentos entre as partes.

Após colapso na tensão de 200 kPa e recarregamento até 1600 kPa, a estrutura de base passa a ser caracteristicamente porfirogrânica fechada. Os microagregados são deformados e/ou destruídos e o plasma, como nos casos anteriores, passa a se distribuir de forma contínua entre os grãos do esqueleto. A porosidade cavitária cede lugar a uma porosidade fissural com padrão de distribuição paralelo. Essas fissuras atravessam todo o material. Mesmo as fissuras muito finas, semelhantes àquelas observadas no material original, são horizontais e seguem o padrão paralelo. Ressalta-se, ainda, o imbricamento entre os grãos a orientação oblíqua e a maior evidência de deslizamentos (Foto 5 – Prancha XII).

Material – profundidade de 9,20 m a 9,50 m (Horizonte Bw)

A esta profundidade tanto o material original do solo como o material ensaiado apresenta as mesmas características observadas no nível superior.

PRANCHA XII

LATOSSOLO VERMELHO distrófico - Profundidade de 5,15 m

Foto 1 - Solo natural (18x) (Lupa binocular)

Aspecto geral Macroporos e microagregação do plasma e área contínua com fissuras.

Foto 2 – Solo natural (30x) (Lupa binocular)

Presença de microagregados arredondados.

Foto 3 – Material antes do colapso (18x) (Lupa binocular) Foto 4 – Material após colapso (18x) (Lupa binocular) Foto 5 – Material após colapso e recarregamento (30x) (Lupa binocular)

Redução da macroporosidade

Macrofissuras paralelas e microfissuras

Fechamento completo do material, apresentando-se com aspecto contínuo. Sinais de deslizamento interno, com o aparecimento de fissuras paralelas.











Material – profundidade de 14,00 m a 14,30 m (Horizonte C - interface com o Arenito Caiuá)

A esta profundidade o material apresenta ainda vestígios da estratificação da rocha original onde se alternam níveis paralelos (estratos) formados por grãos mais grosseiros, limpos, com níveis mais enriquecidos em fase argilosa que se distribui entre os grãos, cimentando-os; e níveis onde se concentram os grãos menores de quartzo cimentados por pontes de plasma (Fotos 1, 2, 3 – Prancha XIII). A porosidade varia de intergranular a cavitária comunicante. O material original já mostra um imbricamento importante dos grãos, maior em determinados estratos do que em outros.

A inundação desse material na tensão de 1600 kPa não provocou mudanças importantes na sua organização e portanto, não será aqui apresentado.

5.3.4 Porosimetria do Material Ensaiado

A Tabela 5.33 mostra as características físicas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e as Figuras 5.76 a 5.83 mostram os resultados para as três situações: amostra indeformada, antes do colapso (após carregada) e após colapso (carregada e inundada).

A facilidade de penetração do mercúrio nos poros do solo resultou em valores mais reais de pesos específicos dos sólidos quando comparados com aqueles obtidos pelo método do picnômetro. Isso contribuiu para que as porosidades calculadas se aproximassem bastante dos valores da porosidade fornecidos nos ensaios de porosimetria.

PRANCHA XIII

LATOSSOLO VERMELHO distrófico – Profundidade de 14,15 m

Foto 1 – Solo natural (18x) (Lupa binocular)

Vestígios da estratificação da rocha original. Níveis paralelos alternados de grãos finos e grosseiros.

Foto 2 – Material após o colapso (18x) (Lupa binocular)

Níveis mais enriquecidos em fase argilosa que se distribuem entre os grãos.

Foto 3 – Material após colapso e recarregamento (30x) (Lupa binocular)

Detalhe da Foto 2







			Ensaio Edométrico										Ensaio de Porosimetria			
Bloco	Corpo	Condição	(Características finais				Características dos corpos de prova								
(Prof.)	prova	material	γd	$\gamma_{s}^{(1)}$	ei	ni	S _{ri}	γd	ef	n _f	\mathbf{S}_{rf}	$\gamma_d^{(2)}$	${\gamma_s}^{(2)}$	ne ⁽²⁾	$n_c^{(3)}$	
			(kN/m^3)	(kN/m^3)		(%)	(%)	(kN/m^3)		(%)	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)	(%)	(%)	
LVd ₂ (0,65m)	LVd_{2A1}	indeformada	13,45	26,9	1,000	50,0	27,0	13,45	1,000	50,0		14,66	29,56	50,4	45,5	
	LVd_{2B}	antes colapso 400kPa	13,79	26,9	0,951	48,7	27,7	15,12	0,779	43,8	31,8	15,71	26,49	40,7	41,6	
	LVd_{2C}	após colapso 400kPa	13,41	26,9	1,006	50,1	26,2	16,92	0,590	37,1	83,7	17,30	26,37	34,4	35,7	
	LVd_{3A1}	indeformada	13,27	26,9	1,027	50,7	26,1	13,27	1,027	50,7		14,27	26,26	45,7	47,0	
LVd_3 (1,45m)	LVd_{3B}	antes colapso 200kPa	13,32	26,9	1,019	50,5	26,2	14,20	0,895	47,2	28,8	14,13	26,41	46,5	47,5	
	LVd_{3C}	após colapso 200kPa	13,07	26,9	1,059	51,4	25,1	16,14	0,667	40,0	82,1	16,25	26,29	38,2	39,6	
TVJ	LVd _{5A2}	indeformada	14,93	27,0	0,808	44,7	44,1	14,93	0,808	44,7		15,86	26,37	39,9	41,3	
(5,15m)	LVd_{5B}	antes colapso 200kPa	14,93	27,0	0,808	44,7	44,5	15,38	0,755	43,0	45,3	15,63	26,24	40,5	42,1	
	LVd_{5C}	após colapso 200kPa	14,28	27,0	0,891	47,1	40,0	15,42	0,751	42,9	82,3	16,03	26,50	39,5	40,6	
1 1 1	LVd_{7A}	indeformada	14,97	26,9	0,797	44,3	35,3	14,97	0,797	44,4		14,7	26,62	44,9	45,4	
LVd ₇ (9,35m)	LVd_{7B}	antes colapso 800kPa	16,13	26,9	0,668	40,0	42,3	17,34	0,551	35,5	46,7	17,4	26,46	34,1	35,1	
	LVd_{7C}	após colapso 800kPa	16,56	26,9	0,624	38,4	44,8	17,69	0,521	34,3	80,0	17,6	26,28	33,0	34,5	

Tabela 5.33 – Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de porosimetria – Perfil III

⁽¹⁾ Peso específico dos sólidos determinado pelo método do picnômetro
⁽²⁾ Características dos corpos de prova obtidos através dos ensaios de porosimetria
⁽³⁾ Porosidade calculada com γ_d obtido no ensaio de porosimetria e γ_s determinado pelo método do picnômetro



Figura 5.76 - Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil III - prof. 0,65m)



Figura 5.77 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil III -prof. 0,65m)


Figura 5.78 - Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil III - prof. 1,45m)



Figura 5.79 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil III -prof. 1,45m)



Figura 5.80 - Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil III - prof. 5,15m)



Figura 5.81 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil III -prof. 5,15m)



Figura 5.82 - Curvas de distribuição de poros - material natural e ensaiado (Perfil III - prof. 9,35m)



Figura 5.83 - Histogramas de freqüência de poros - material natural e ensaiado (Perfil III -prof. 9,35m)

As curvas representadas nas Figuras 5.76 a 5.83 mostram para todos os níveis uma distribuição bimodal composta por duas famílias de poros (interagregados e intra-agregados). Para os materiais mais superficiais (profundidade de 0,65 m e 1,45 m) e aquele referente a 9,35 m de profundidade, há evidências de maior participação da família dos poros interagregados. Após carregamento e após colapso ocorrem pequenos deslocamentos das curvas para esquerda em relação aos materiais indeformados e achatamentos das curvas (mais significativos para 1,45 m e 9,35 m).

Para o material da profundidade de 5,15 m, os picos observados (Figura 5.81) para as duas famílias são aproximadamente iguais. Nessa profundidade a presença de maior teor argila e principalmente pela forma como se apresenta (microagregada) a contribuição dos vazios texturais é mais evidente.

Na Tabela 5.34 são apresentadas, de forma mais elucidativa, as parcelas referentes às porosidades estrutural e textural para os materiais indeformados e ensaiados.

Prof. (m)	Condição	n _c (%)	Porcentagem de poros				
			macro	meso	micro	ultramicro	cripto
			> 75 µm	30 - 75 µm	5 - 30µm	0,1 - 5µm	< 0,1µm
0,65	natural	45,5	9	46	23	5	17
	antes do colapso	41,6	5	39	27	5	24
	após colapso	35,7	4	6	50	8	32
1,45	natural	47,0	15	40	18	5	22
	antes do colapso	47,5	10	48	16	4	22
	após colapso	39,6	4	18	41	9	28
5,15	natural	41,3	5	14	38	9	34
	antes do colapso	42,1	5	19	34	10	32
	após colapso	40,6	4	9	44	10	33
9,35	natural	45,4	10	45	17	4	24
	antes do colapso	35,1	3	11	39	8	39
	após colapso	34,5	5	11	33	10	41

Tabela 5.34 – Classificação dos poros de acordo com Brewer(1976)–Perfil III (solo natural e ensaiado)

As posições das curvas de distribuição de poros apesar de refletirem os comportamentos dos materiais, quantitativamente não expressam as exageradas deformações por colapso que ocorreram para o material da profundidade de 1,45 m em relação à condição anterior ao colapso.

A maior redução da porosidade interagregados (estrutural) que ocorreu pelo efeito da inundação, pela posição das curvas, é observada para o material do nível mais profundo (9,35m) e não para o nível que se mostrou mais sensível à inundação. No entanto, a porcentagem de poros interagregados para o material (9,35m) na condição anterior ao colapso era de 53% e reduziu para 49% após colapso, enquanto que para o material (1,45 m) a porcentagem era de 74% e foi reduzida para 63% após colapso.

5.3.5 Síntese dos Resultados

Os ensaios edométricos efetuados para a avaliação da colapsibilidade do solo arenoso constituinte do Perfil III, denominado Latossolo Vermelho distrófico, mostraram uma extrema sensibilidade à inundação para todos os níveis. No entanto, a parte mais superficial, até aproximadamente 1,45 m de profundidade, os coeficientes de colapso obtidos foram muito mais elevados do que para os níveis inferiores (até 5,0 m de profundidade).

Os coeficientes resultantes dos ensaios duplos foram, na maioria dos casos, maiores do que aqueles obtidos nos ensaios simples, para uma mesma tensão aplicada.

As análises micromorfológicas apontaram que os arranjos apresentados pelos materiais mais superficiais propiciam a geração de uma porosidade muito aberta com a presença de grandes poros intergranulares e interagregados comunicantes, e essa deve ser a principal causa desse comportamento mais colapsível observado. A mineralogia dos materiais do perfil é bastante simples constituída por caulinita, gibbsita, hematita, quartzo e anatásio no solo evoluído e mais simples no solo de alteração onde apenas caulinita, quartzo e hematita foram detectados.

Os ensaios de porosimetria apontaram, para o material da profundidade de 5,15 m, uma distribuição de poros diferenciada dos demais níveis do perfil. A parcela de poros interagregados corresponde a 57% e os vazios intra-agregados, 43%, enquanto que para os demais níveis esses percentuais ficaram em torno de 75% e 25%, respectivamente. Isso pode ser justificado pela presença de maior teor de argila nesse nível e de como ela se apresenta (microagregada), observado através das análises micromorfológicas.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As discussões conjuntas serão feitas com base nas sínteses de resultados elaboradas para cada perfil de solo estudado, com o objetivo de poder associar comportamentos característicos observados para as diferentes classes de solos, sob o ponto de vista pedológico.

6.1 PERFIS I E II

Os solos argilosos, analisados neste trabalho, são exemplos típicos dos solos evoluídos a partir de rochas vulcânicas (basalto), sob condições tropicais e, estão sobrepostos a um nível de alteração de basalto (solo residual).

Ambos estão localizados na cidade de Maringá e, apesar de serem provenientes da mesma rocha mãe, evoluíram e evoluem ainda sob condições hídricas distintas, em função de suas posições na vertente. Como o Perfil I está posicionado em região de topo, a camada de solo evoluído (Latossolo Vermelho distroférrico) é de elevada espessura, enquanto que no Perfil II, por estar em baixa vertente, a camada de solo evoluído (Nitossolo Vermelho eutroférrico) se apresenta mais delgada.

Embora apresentem um certo número de atributos comuns, esses solos possuem características físicas, mineralógicas, morfológicas e de comportamento distintas, as quais serão discutidas a seguir.

6.1.1 Caracterização Geotécnica

As sondagens revelaram que o Perfil I (Latossolo) possui uma camada espessa de solo evoluído de aproximadamente 9,50 m, enquanto que no Perfil II (Nitossolo) essa camada é muito mais delgada com espessura em torno de 2,80 m.

No Latossolo, os índices de resistência à penetração N_{SPT} apresentados na parte mais superficial desta camada, até aproximadamente 4,0m, foram de no máximo 4 e, na parte mais profunda, entre 4,0m e 8,0m, os valores se mostraram entre 4 e 7. No Nitossolo, os valores obtidos para a parte mais superficial (horizontes AB e Bt) se assemelham com a parte mais profunda do Latossolo, enquanto que aqueles obtidos para o horizonte Bw apresentam maior similaridade com a parte mais superficial do Latossolo. Na camada do solo de alteração ambos apresentaram valores de N_{SPT} maiores do que os do conjunto superior, mas com comportamentos aleatórios em profundidade. As maiores variabilidades ocorreram para o Nitossolo.

Os pesos específicos dos sólidos variam muito pouco, na camada de solo evoluído os valores encontrados estão entre 29,8 kN/m³ e 30,8 kN/m³ e no solo de alteração essa faixa fica um pouco reduzida, com valores entre 29,7 kN/m³ e 30,5 kN/m³.

Os índices de Plasticidade e os Limites de Liquidez mais elevados no Latossolo são encontrados para o solo de alteração, valores entre 24% a 41% e valores acima de 80% (até 96%), respectivamente. No Nitossolo, os maiores valores são encontrados na camada de solo evoluído, os índices de Plasticidade estão entre 23% a 40% (mesma faixa obtida para o solo de alteração do Latossolo) e os Limites de Liquidez entre 72% e 84%, sendo os limites superiores correspondentes à parte mais superficial dessa camada.

Como se observa, a camada superficial (solo evoluído) do Nitossolo apresenta uma plasticidade elevada, com valores entre 35% e 40% para a parte mais superficial (horizontes AB e Bt). A argila neste nível se mostrou mais ativa com tendência à expansão e dispersão em

presença de água. Apesar da abundância do ferro ser semelhante para os dois perfis, acreditase que no Nitossolo a argila não se encontra bloqueada por ele, ao contrário do comportamento observado para o Latossolo que se apresentou mais estável face à água.

6.1.2 Caracterização Física – Solos Evoluídos

Os solos evoluídos, para os dois perfis, por serem argilosos, mostraram grande capacidade de retenção de água. No Latossolo, os teores de umidade foram superiores à 30% e os graus de saturação da ordem de 50%, com crescimento em profundidade alcançando 67% no limite com o solo de alteração. No Nitossolo, os teores de umidade encontrados foram acima de 38% e o grau de saturação de aproximadamente 70% nos horizontes mais superficiais (AB e Bt), decrescendo em profundidade, atingindo valores em torno de 60% no horizonte Bw.

Os índices de vazios são elevados e tendem à crescer em profundidade no perfil do Nitossolo, enquanto que no Latossolo esses valores tendem a decrescer. No Nitossolo os valores são da ordem de 1,7 na parte mais superficial e alcança valores até ligeiramente superiores a 2,0 no horizonte Bw. No Latossolo valores como 2,5 foram encontrados na profundidade de 3,0m e ainda são maiores do que 1,5 no limite com o solo de alteração (profundidade de 9,25m).

Esses elevados índices de vazios implicam em baixos pesos específicos secos. Nos horizontes superficiais (profundidades < 4,50m) do Latossolo, valores tão baixos como 9kN/m³ foram encontrados. No Nitossolo valores em torno de 10 kN/m³ foram encontrados no horizonte Bw, próximo ao solo de alteração (profundidade de 2,80m).

Quanto às características físicas, no Latossolo os coeficientes de variação dos índices físicos foram maiores do que 2% em toda camada de solo evoluído, atingindo valores de até 8% entre 3,0 m e 4,5 m de profundidade. O Nitossolo apresentou variabilidade menor das

características físicas do que o Latossolo. Mesmo assim, coeficiente de variação de 4% do índice de vazios foi encontrado para o horizonte Bw.

6.1.3 Micromorfologia dos Solos Constituintes da Camada Evoluída - Natural

No horizonte B latossólico que se inicia a partir de 0,85m, o solo é constituído, até cerca de 4,50m de profundidade, por microagregados de formas arredondadas a subarredondadas, com dimensões variadas, cujo arranjo gera uma elevada porosidade intermicroagregados (empilhamento composto), altamente comunicante. Em meio às áreas microagregadas ocorrem pequenos setores de plasma contínuo. Nas áreas de plasma microagregado são freqüentes a ocorrência de tubos (secções ovaladas ou circulares) e cavidades, resultantes de atividade biológica.

Em profundidades superiores a 4,50m, destaca-se a presença de zonas de plasma mais contínuo, com redução significativa da porosidade, entremeadas por zonas microagregadas, com alta porosidade (empilhamento composto). Essa passagem normalmente não é repentina, apresentando diferentes estágios de evolução. O plasma contínuo evolui para um plasma contínuo microdividido por fissuras finas e curtas passando para zonas onde se destacam volumes arredondados – semelhantes a "nodulações", com porosidade essencialmente cavitária. Essas áreas tendem a evoluir para zonas microagregadas com porosidade de empilhamento composto altamente comunicante.

A 7,50m de profundidade, o material é formado por microagregados de tamanhos e formas variadas. Nas zonas microagregadas com porosidade interconectada de empilhamento composto observam-se volumes ovalados de até 1000µm, com variações para mais ou menos denso, se nodulando. Em algumas zonas, os microagregados apresentam poucos pontos de conexão entre si, criando uma porosidade muito aberta. Há evidências de grande pedoturbação geradas por fluxo de água, atividade biológica ou associadas. A essa

profundidade ainda são observados poros de seção ovalada (tubos). Nas zonas contínuas aparecem setores aparentemente mais enriquecidos em ferro, com tons mais escuros e porosidade predominantemente cavitária.

Na interface da camada solo evoluído para a camada de solo de alteração de basalto, que ocorre a aproximadamente 9,00m de profundidade observam-se lado a lado, fragmentos de rocha e grãos minerais em diversos estágios de alteração que gradam para zonas de plasma argilo-férrico contínuo e/ou microagregado. A porosidade, como nos níveis acima, é maior na zona microagregada; nas áreas contínuas ela é reduzida e os poros são essencialmente fissurais e finos.

O Nitossolo Vermelho estudado se caracteriza por apresentar na parte superior (horizontes AB e Bt), até aproximadamente 2,0m de profundidade, blocos poliédricos centimétricos delimitados por rede de fissuras de maior abertura (fendas ou rachaduras) que se conectam entre si e, na escala micro, por blocos poliédricos milimétricos, cuja rede de fissuras é constituída por microfissuras com fraca conectividade. No entanto, para o horizonte Bt a estrutura se apresenta um pouco mais contínua, com poliedros de maior dimensão.

Observa-se, freqüentemente, uma forte orientação do plasma do tipo estriada (principalmente junto às fissuras e onde o plasma é mais claro) e também como manchas isoladas.

A partir de 1,8m até 2,0m de profundidade, gradualmente, a estrutura em blocos poliédricos dá lugar a uma estrutura microagregada, próxima àquela observada no Perfil I.

A partir de 2,0m de profundidade até o início do solo de alteração da rocha (profundidade de 2,8m), o material que constitui o horizonte Bw é caracterizado por apresentar setores microagregados alternados com setores onde o plasma tem um arranjo

contínuo e é cortado por fissuras finas e curtas, abrigando ainda cavidades, algumas de origem biológica (circulares e ovaladas).

As áreas microdivididas (em menor quantidade) se mostram com um aspecto de microagregação, mas diferente daquele observado no Latossolo. Enquanto no Latossolo os microagregados são predominantemente arredondados, apresentando uma porosidade de empilhamento composto altamente comunicante, no Nitossolo, nessas áreas, os agregados são poliédricos e separados por fissuras gerando uma porosidade intermicroagregados menor e mais fechada do que aquela observada no horizonte Bw do Latossolo. Eventualmente ocorrem zonas de porosidade mais aberta e, nessas, os microagregados tendem a ter formas mais arredondadas.

6.1.4 Porosidades Predominantes – Solos Evoluídos

As análises micromorfológicas e os ensaios de porosimetria permitiram observar, para as amostras indeformadas de cada perfil estudado, os tipos, predominâncias, tamanhos de poros presentes e suas variações ao longo da profundidade. Essas observações são descritas de forma mais concisa a seguir:

Perfil I

Até aproximadamente 4,50m de profundidade há predomínio de porosidade intermicroagregados elevada (empilhamento composto), altamente comunicante. Nestas áreas também são freqüentes a ocorrência de tubos (secções ovaladas ou circulares) e cavidades, resultantes de atividade biológica. Os diâmetros desses grandes poros variam entre 2000μm e 4000μm.

À profundidades superiores a 4,50m, a porosidade total do material é reduzida, pois passam a predominar zonas de plasma contínuo com porosidade essencialmente do tipo fissural e cavitária. A porosidade de empilhamento composto aparece com menor freqüência nas áreas entremeadas microagregadas.

A partir de 7,50m de profundidade, nas zonas microagregadas a porosidade é interconectada de empilhamento composto. Em algumas zonas, a porosidade é muito aberta, e ainda aparecem poros de seção ovalada (tubos). Nas zonas contínuas a porosidade é reduzida, predominantemente cavitária passando a fissural em profundidade.

Perfil II

Nos horizontes mais superficiais AB e Bt (até aproximadamente 2,0m de profundidade) predominam os vazios planares (fendas ou rachaduras e fissuras), canais e cavidades.

As fendas ou rachaduras delimitam os agregados poliédricos, são interconectados, geralmente com paredes conformes e rugosas. Correspondem ao tipo de poros interagregados (porosidade estrutural). As fissuras que ocorrem no interior dos agregados (vazios intraagregados), que correspondem à porosidade estrutural, são mais finas e geralmente não estão conectadas entre si. Entretanto, podem estar conectadas, algumas vezes, com cavidades, canais ou às outras fissuras maiores. As cavidades, por sua vez, ocorrem preferencialmente no interior dos agregados e apresentam formas irregulares e tamanhos variados (com a menor dimensão em torno de 200µm e a maior até aproximadamente 800µm). Conectam-se com as fissuras ou fendas, mas raramente entre si.

A partir de 2,0m de profundidade até o início do solo de alteração da rocha (profundidade de 2,8m), a porosidade interagregados é menor e mais fechada do que aquela observada no horizonte Bw do Latossolo (Perfil I), predominantemente fissural. Eventualmente ocorrem zonas de porosidade mais aberta. Nas zonas mais contínuas as fissuras são mais finas e curtas (vazios intra-agregados), abrigando ainda cavidades, algumas

de origem biológica (as maiores com diâmetros em torno de $2000\mu m$ – circulares e as ovaladas com a maior dimensão de até aproximadamente $7000\mu m$).

Os resultados das análises porosimétricas mostram que a distribuição de poros para os materiais constituintes do Perfil II difere muito daquela observada para o Perfil I. A porosidade, antes interagregados (estrutural) abundante, com percentuais em torno de 70%, observada para o Perfil I, dá lugar, no Perfil II, à porosidade intra-agregados (textural), valores de até 76%, representadas principalmente por criptoporos.

Os resultados das análises porosimétricas efetuadas para os solos evoluídos dos Perfis I e II demonstraram coerências com aqueles observados nas análises micromorfológicas. Mesmo assim, há evidências de que, em função das pequenas dimensões da amostra requerida para o ensaio, a porosidade macro não estivesse totalmente representada. Essa porosidade macro se deve à existência de poros com diâmetros maiores do que 1000µm, constatados principalmente no Perfil I, e das redes de fissuras (fendas), observadas para os materiais constituintes do Perfil II.

6.1.5 Mineralogia

Apesar das mudanças significativas na organização do plasma ao longo da parte evoluída do Perfil I, a constituição mineralógica detectada pela Difração de raios X é homogênea (caulinita, gibbsita, hematita e quartzo). Entretanto, a espectroscopia Mössbauer revelou a presença de diferentes populações de hematita, quanto ao grau de cristalinidade e tamanho de partícula. Essas diferenças nas populações de hematita aparentemente interferem em suas relações com a caulinita, provocando mudanças no comportamento do plasma como, por exemplo, o bloqueio da atividade, formação de microagregados e "nodulações".

A constituição mineralógica da parte evoluída do Perfil II é homogênea e não expressa a existência de horizontes estruturalmente distintos. Entretanto, o estudo de detalhe através da

espectroscopia Mössbauer revelou a presença de diferentes populações de hematita, quanto ao grau de cristalinidade e tamanho de partícula. É, especialmente, a diferença entre as porcentagens das populações constituídas por partículas de menor tamanho que distingue os horizontes Bt e Bw, respectivamente 38% e 25 % do total.

Os resultados da caracterização mineralógica permitem concluir que os plasmas dos horizontes Bt e Bw apresentam constituições diferenciadas entre si apenas em termos de fases ferruginosas e essas devem ser as responsáveis pelas variações de organização microestrutural observadas que, por sua vez interferem no comportamento dos materiais que os constituem.

A espectroscopia Mösbauer mostrou que, em média, o material constituinte do Perfil II apresenta grau de cristalinidade mais baixa do que o material do Perfil I.

6.1.6 Solo Ensaiado (Comportamentos Observados com Carregamentos e Inundação)

Na avaliação da colapsibilidade dos solos, os resultados comprovam que as deformações por carregamento foram maiores ou muito maiores (Nitossolo) do que por inundação.

Os materiais constituintes do Perfil I (Latossolo) mostraram sensibilidade à inundação. Entretanto, a parte mais superficial, até aproximadamente 4,5m de profundidade, se mostrou mais susceptível ao colapso do que os níveis mais profundos (até 9,5m), na interface com a alteração do basalto (solo residual).

As deformações por inundação apresentadas pelos materiais constituintes do Perfil II (Nitossolo) foram muito menores do que aquelas observadas para os materiais mais superficiais (até 4,50m de profundidade) constituintes do Perfil I. Os menores valores foram encontrados para o material do horizonte intermediário (Bt) enquanto que os materiais dos horizontes AB e Bw apresentaram comportamentos praticamente similares.

Considerando um coeficiente de colapso de 2% como o limite entre solos colapsíveis e solos não colapsíveis, pode-se concluir que apenas o horizonte característico do Nitossolo (Bt) é classificado como solo não colapsível.

De acordo com Reginatto e Ferrero (1973) observa-se na Figura 6.1 um comportamento diferenciado desses materiais ao longo dos perfis. O solo constituinte do Perfil II apresenta, segundo os autores, menores coeficientes de colapso, observado principalmente para o horizonte característico (Bt) do Nitossolo Vermelho. De fato, as análises mostraram para esse solo menor vulnerabilidade à mudanças pelo efeito do umedecimento.



Figura 6.1 - Coeficiente de colapsibilidade do solo para os perfis estudados (REGINATTO; FERRERO, 1973)

Para os dois perfis, os coeficientes de colapso obtidos nos ensaios simples diferiram, em muitos casos, daqueles obtidos nos ensaios duplos. Constatou-se que esses valores são fortemente afetados pelas características físicas iniciais dos corpos de prova (teor de umidade e índice de vazios). Para o Perfil I houve uma tendência de maiores valores do coeficiente de colapso nos ensaios simples para as amostras dos níveis mais superficiais (profundidades <4,5m) enquanto que nos ensaios duplos isto ocorreu para as amostras dos níveis mais profundos (profundidades > 4,5m). Já no Perfil II, as deformações por inundação obtidas nos ensaios duplos, foram, em geral, maiores ou muito maiores do que as obtidas nos ensaios simples.

A magnitude do colapso mostrou uma forte relação com a tensão de pré-adensamento virtual. No Perfil I, exceto para a profundidade de 3,20m, os maiores coeficientes de colapso obtidos para os materiais ao longo do perfil, nos ensaios simples e duplos, estão associados às menores tensões de pré-adensamento natural e inundada, respectivamente. Para o Nitossolo isso também foi observado nos ensaios duplos. Os máximos valores do coeficiente de colapso foram obtidos para as menores tensões de pré-adensamento na condição inundada. Na condição natural, os valores das tensões de pré-adensamento encontrados para os materiais dos horizontes Bt e Bw foram muito próximos, mas os comportamentos observados quando da sua inundação (ensaios simples) foram distintos.

Para os dois perfis as máximas deformações de colapso nos ensaios simples são comandadas por relações entre a tensão de inundação e a tensão de pré-adensamento natural (σ_i/σ_{pn}) entre 1,5 e 2,5.

Esses diferentes comportamentos observados para os materiais analisados quando submetidos a carregamentos e inundação podem ser explicados pelas variações das características físicas (principalmente em relação aos índices de vazios) e morfológicas.

6.1.7 Comportamentos Observados através das Diferentes Técnicas de Estudo Empregadas e suas Associações

Perfil I

A parte superior (profundidade < 4,50m) desse perfil apresentou maiores deformações por colapso do que a parte mais profunda. As análises micromorfológicas revelaram mudanças na organização do plasma a partir desse nível. Na parte superior do perfil há o predomínio de plasma microagregado, associado a uma porosidade intermicroagregada, altamente comunicante, com presença, ainda, de macrocavidades de origem biológica. Essa microestrutura é favorável ao mecanismo do colapso. Abaixo de 4,5m de profundidade, a predominância de zonas mais contínuas e de zonas com coalescência de microagregados induz uma redução na porosidade intermicroagregada e na sua conectividade. Estas feições estão associadas aos níveis que apresentaram menores colapsos, portanto são menos favoráveis ao desenvolvimento desse mecanismo.

O aumento das relações entre a tensão de pré-adensamento virtual e a tensão geostática entre 4,5 e 6,0m de profundidade, indicando um comportamento sobreadensado, também foram observadas, sugerindo que provavelmente estejam relacionadas com as condições estruturais desses níveis (redução da microagregação).

As análises porosimétricas realizadas mostraram que na parte mais superficial do solo evoluído (até 4,50 m) há um predomínio de poros interagregados sobre os vazios intraagregados, correspondendo a um percentual de no mínimo 68% (BREWER, 1976). A partir de 4,50m, ocorre uma redução na classe dos macroporos (12% para 7%) e um aumento na classe dos microporos (33% para 41%), confirmados pelas análises micromorfológicas: predomínio de plasma contínuo com redução do plasma microagregado.

Os ensaios de porosimetria realizados para as amostras ensaiadas em edômetros acusaram que os carregamentos e inundação provocam um crescimento da porosidade textural em detrimento da porosidade estrutural, o que também foi verificado nas análises micromorfológicas. Essas variações foram ainda mais significativas entre o material indeformado (natural) e carregado (antes do colapso) do que entre o material antes e após colapso. De fato, os ensaios realizados para a avaliação da colapsibilidade revelaram que as maiores deformações volumétricas ocorrem pelo efeito do carregamento do solo (deformações por carga) do que pela sua inundação (deformações por colapso).

Perfil II

As análises micromorfológicas revelaram que até aproximadamente 2,0m de profundidade (horizontes AB e Bt) a estrutura do Nitossolo é caracterizada por blocos poliédricos centimétricos (delimitados por fendas ou rachaduras) que se conectam entre si e por blocos milimétricos (delimitados por fissuras) com fraca conectividade. No entanto, no horizonte Bt a estrutura se apresenta um pouco mais contínua, com poliedros de maior dimensão.

O horizonte subjacente (Bw) é caracterizado por apresentar setores microagregados, em geral de formas poliédricas angulares a subangulares, alternados com setores onde o plasma tem um arranjo contínuo e é cortado por fissuras finas e curtas, abrigando ainda cavidades, algumas de origem biológica. Eventualmente ocorrem zonas de porosidade mais aberta e, nessas, os microagregados tendem a ter formas mais arredondadas. A presença dessas cavidades e zonas microagregadas com maior porosidade geram condições mais favoráveis à manifestação do colapso quando o solo é carregado e inundado.

Os ensaios de porosimetria acusam que a porosidade dominante é do tipo textural (intraagregados). Nos horizontes AB e Bt, a porosidade intra-agregados está em torno de 70%, chegando até 76%. No horizonte Bw, em função das modificações estruturais observadas nas análises micromorfológicas, a porosidade textural representa um percentual de 56%. As deformações mais pronunciadas nesse nível provavelmente são comandadas pelos 44% restantes, correspondentes à porosidade estrutural (interagregados).

6.2 PERFIS I E III

Os latossolos (textura muito argilosa e textura média) embora se diferenciem em muitos aspectos apresentam alguns comportamentos peculiares característicos de zona tropical. Ambos são espessos, altamente evoluídos, laterizados e com microagregação característica.

As análises granulométricas indicaram que o solo evoluído do Perfil III é constituído essencialmente pela fração areia (em torno de 70% ou mais) e uma porcentagem máxima de argila de 30%, observado para a profundidade de 5,0 m. Mesmo nesse solo de textura predominantemente arenosa, as análises micromorfológicas apontam que nesse nível a argila presente também se encontra microagregada.

A estrutura do material, especialmente na parte mais superficial do Perfil III, observada através de lupa e microscópio óptico, evidenciaram a existência de grandes poros intergranulares e interagregados comunicantes, resultantes principalmente de atividade biológica, o que também foi detectado para o Perfil I.

Os materiais constituintes desse Perfil III apresentaram os maiores coeficientes de colapso entre todos os materiais dos perfis estudados. Valores entre 7% e 14% são exibidos pelas amostras referentes às profundidades de 0,65 m e 1,45 m para uma larga faixa de tensões (50kPa – 1600 kPa). Para os materiais dos níveis mais profundos (5,15 m e 9,35 m) os coeficientes obtidos são também bastante expressivos, valores entre 4% e 7%, registrados para tensões entre 200 kPa e 1600 kPa.

Os Latossolos estudados se mostraram muito sensíveis à inundação. De fato, pelas características apresentadas formam as condições mais favoráveis para a ocorrência do colapso.

7 CONCLUSÃO

No desenvolvimento deste trabalho, dois aspectos importantes devem ser ressaltados: os resultados obtidos e a metodologia empregada.

7.1 Resultados do Estudo do Colapso com Ênfase nos Aspectos Estruturais

a) A maioria dos solos estudados mostrou-se sensível à inundação. Os Latossolos são, de modo geral, considerados colapsíveis. O Nitossolo apresentou menor susceptibilidade ao colapso. O horizonte característico Bt não apresentou um nível de deformação por inundação que o caracterizasse como colapsível.

b) As análises micromorfológicas acusaram que:

- as características estruturais apresentadas pelos Latossolos: predomínio de zonas microagregadas especialmente nos horizontes mais superficiais gerando uma porosidade intermicroagregados (porosidade estrutural) importante e a presença de tubos e cavidades, resultantes de atividade biológica formam as condições mais propícias ao desenvolvimento do colapso.

- O Latossolo de textura média se mostrou muito mais colapsível do que o latossolo de textura argilosa. Além da presença de macroporos, os graus de saturação extremamente baixos devem também ter contribuído para esse comportamento.

- Os Nitossolos, por apresentarem uma estrutura distinta, em blocos poliédricos, mais contínua, onde prevalece a porosidade intra-agregados (porosidade textural) são menos susceptíveis à ocorrência do colapso.

- Os mecanismos do colapso, avaliados pelas análises micromorfológicas, aparentemente são diferentes no Latossolo e no Nitossolo. No Nitossolo as deformações parecem ocorrer por deslizamento das unidades poliédricas (ruptura), enquanto que no Latossolo as deformações parecem ser resultantes apenas do fechamento dos poros (sem deslizamento dos microagregados). Somente após colapso e recarregamento é que o Latossolo apresenta evidências de ruptura.

c) As análises porosimétricas confirmaram as observações micromorfológicas. A distribuição de poros para os materiais do Nitossolo (Perfil II) difere muito daquela observada para o Perfil I, onde a porosidade, antes interagregados (estrutural) abundante, com percentuais em torno de 70%, dá lugar, nesse perfil, à porosidade intra-agregados (textural), valores de até 76%, representadas principalmente por criptoporos (poros < $0,1\mu$ m).

d) Os ensaios edométricos mostraram que:

- as deformações por inundação obtidas através dos ensaios duplos, para a maioria dos solos estudados, foram mais severas do que aquelas referentes aos ensaios simples.

- há uma forte relação entre os valores do coeficiente de colapso estrutural e a tensão de préadensamento (virtual ou de cedência).

7.2 Metodologia Empregada

Os métodos e técnicas empregadas no estudo do colapso permitem concluir que:

a) Os conhecimentos da Pedologia, associados às análises micromorfológicas, permitiram analisar e justificar, mesmo que qualitativamente, todos os comportamentos observados para os materiais ensaiados (após carregamentos e inundação), mostrando ser totalmente adequada ao estudo do colapso. Desta forma, permitem a extrapolação e a aplicação desses conhecimentos a outros solos de ocorrência em zona tropical que se enquadrem nas mesmas classes dos materiais estudados.

b) A porosimetria por intrusão de mercúrio, por si só, não é suficiente para avaliar a porosidade do solo, em especial os tropicais, dadas às estruturas microagregadas, com a presença abundante de macroporos e poros cavitários (sem conectividade), resultantes de processos pedogenéticos. Isto se deve, às pequenas dimensões das amostras analisadas, exigidas pelo ensaio, e à impossibilidade da intrusão do mercúrio nos poros inacessíveis. Porém, é possível observar a tendência de comportamentos característicos como a redução da macroporosidade e aumento da microporosidade, como nos casos estudados.

c) As análises mineralógicas por Difração de raios X mostraram tanto para o Latossolo (argiloso) quanto para o Nitossolo uma constituição mineralógica homogênea que não expressa a existência de horizontes estruturalmente distintos.

d) O estudo mineralógico de detalhe por espectroscopia Mössbauer revelou a presença de diferentes populações de hematita, quanto ao grau de cristalinidade e tamanho da partícula. Os resultados mostraram que, em média, o material constituinte do Perfil II (Nitossolo) apresenta grau de cristalinidade mais baixa do que o material constituinte do Perfil I (Latossolo).

O Nitossolo Vermelho e o Latossolo Vermelho, genericamente chamados de "terras roxas", apesar de bastante conhecidos, padecem de um conhecimento mais aprofundado de sua mineralogia, havendo dúvidas quanto à presença e distribuição dos diferentes tipos de óxidos de Fe: hematita, goethita, maghemita, magnetita, ao longo do perfil de alteração. Assim, o estudo do papel do ferro na organização dos diferentes horizontes, poderá contribuir para o entendimento dos mecanismos de colapso.

Portanto, a espectroscopia Mössbauer mostrou um caminho para explicar as diferenças de comportamentos apresentados por esses solos que, aparentemente na engenharia, seriam considerados como um mesmo material, se constituindo, desta forma, em uma ferramenta importante no estudo do colapso.

Nesta pesquisa essas análises foram apenas iniciadas, necessitando ensaios complementares principalmente a baixas temperaturas e interpretações mais aprofundadas, merecendo pelos resultados apontados, um desenvolvimento que permita avançar esses estudos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6459: Solo -Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 7180: Solo -Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 7181: Solo Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 6457: Amostras de solo preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). NBR 12007: Solo -Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). NBR 12069: Solo -Ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT). Rio de Janeiro, 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). NBR 6484: Solo -Sondagens de simples reconhecimento com SPT. Rio de Janeiro, 17 p.

- AGNELLI, N. (1992). Estudo da colapsibilidade do solo de Bauru através de provas de carga diretas. Dissertação de Mestrado, USP / São Carlos, 169p.
- AITCHISON, G.D. & WOODBURN, J.A. (1969). Soil suction in foundation design. In: International Conference on soil Mechanics and foundation Engineering, México, v.2, p.1-18.
- AKEKSEEVA, T & ALEKSEEV, A. (1999). Factors affecting the structural stability of three contrasting soils of China. *Catena*, 38, p. 45-64.
- AL-MUKHTAR, M. (1995). Macroscopic behavior and microstructural properties of a kaolinite clay under controlled mechanical and hydraulic state. In: First International Conference on Unsaturated Soils, Paris, v.1, p.3-9.
- ARMAN, A. & THORNTON, S.I. (1973). Identification of collapsible soils in Louisiana. *Highway Research Record*, n.426, p.14-22.
- BARDEN, L.; MADEDOR, A.O. & SIDES, G.R. (1969). Volume change characteristics of unsaturated clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, v.95, n.SM1, p.33-51.
- BARDEN, L.; MCGOWN, A. & COLLINS, K. (1973). The collapse mechanism in partly saturated soil. *Engineering Geology*, Amsterdam, v.7, n.1, p. 49-60.
- BARDEN, L. & SIDES, G.R. (1969). The influence of structure on the collapse of compacted clay. In: Int. Res. and Eng. Conf. on Expansive Clays, 2, Proceedings, Texas A & M University, p. 317-326.
- BASMA, A.A. & TUNCER, E.R. (1992). Evaluation and control of collapsible soils. *Journal* of Geotechical Engineering Division, ASCE, v.118, n. 10, p.1491-1504.
- BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L. S.; MELFI, A. J.; NARDY,A. R. J; PAPATRECHAS, C.; PICCIRILLO, E. M.; ROISENBERG, A. & STOLFA, D.(1986). Petrogenetic aspects of acid and basalt lavas from the Paraná plateau (Brazil):

geological, mineralogical and petrochemical relationships. *Journal Petrology*, 27, p. 915-944.

- BOWEN, L. H.; DE GRAVE, E. & VANDENBERGHE, R. E. (1993). In: G. J. Long & F. Grandejean (eds). Mössbauer Spectroscopy Applied to Magnetism and Materials Science, Plenum, New York. p.115.
- BREWER, R (1976). Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley & Sons, New York, 482 p.
- BRINDLEY, G.W. & BROWN, G (1980). Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. *Mineralogical Magazine*, London, 495 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PEREIRA, J.H.F.; GUIMARÃES, R.C. & ABREU, P.S.B. (2001). Análise da influência da sucção nos resultados de SPT e SPT-T em solos porosos colapsíveis. In: 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, v.1, p.509-520.
- CARDOSO, F.B.F.; CARVALHO, J.C. & MARTINS, E.S. (1998). O fenômeno do colapso em solos de diferentes origens e profundamente intemperizados do Distrito Federal. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, v.1, p.59-65.
- CARVALHO, A.; CHAUVEL, A.; GUIMARAES, J.E.P.; MELFI, A.J. & NOBREGA, M.T. (1981). Caracterização mineralógica, morfológica e geotécnica de alguns solos lateríticos desenvolvidos sobre basalto na Bacia do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, p.340-381.
- CARVALHO, M.F. (1994). Estudo de solos colapsíveis no nordeste do estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, USP / São Carlos, 137p.
- CHANG, R. K. (1969). Pressure plate aparatus for volumetric measurement of suction; swelling pressure and consolidation in clay soils. *Canadian Geotechical Journal*, v.6, n.2, 209-212.

- CHAUVEL, A.; PEDRO, G. & TESSIER, D. (1976). Rôle du fer dans l'organisation dês matériaux kaoliniques. *Science du Sol*, 2: 101 113.
- CHAUVEL, A. (1976). Recherches sur la transformation dês sols ferrallitiques dans la zone tropicale a saisons contrastées. Évolution et reorganization dês sols rouges de Moyenne casamance (Sénegal), Thése Doct., Strasbourg, 495 p.
- CINTRA, J.C.A. (1998). Fundações em solos colapsíveis. Ed. Rima, São Carlos, 106p.
- CINTRA, J.C.A. (2004). Resenha: Aplicações da mecânica dos solos não-saturados Fundações em solos colapsíveis. In: 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não-Saturados, São Carlos, 18p.
- CLEMENCE, S.P. & FINBARR, A.O. (1981). Design considerations for collapsible soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v.107, n.GT3, p.305-317.
- COLLARES, A.C.Z.B. (2002). Influência de fatores estruturais e químicos no colapso e dispersão de dois solos. Tese de Doutorado, USP / São Carlos, 246p.
- COLLINS, K. (1985). Towards characterization of tropical soil microstructure. In: Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1st, Brasília, Proceedings, ABMS, v.1, p. 85-96.
- COLLINS, K. e MCGOWN, A. (1974). The form and function of micro fabric features in a variety of natural soils. *Géotechnique*, v.24, n.2, p. 223-254.
- CORNELL, R. M. e SCHWERTMANN, U. (1996). The Iron Oxides. VCH, Weinhein, p.573.
- COSTA, M.E.R. (1986). Estudo da colapsibilidade dos solos superficiais de Uberlândia. Dissertação de Mestrado, USP / São Carlos, 90p.
- CRUZ, P.T. (1996). 100 Barragens brasileiras. Oficina de Textos, São Paulo, 647p.

- CUI, Y.J.; DELAGE, P. & ALZOGHBI, P. (1998). Microstructure and colapse behavior of loess from northern France. In: International Conference on Unsaturated Soils, Pequim, v.1, p.31-36.
- DAY, R.W. (1990). Sample disturbance of collapsible soil. *Journal of Geotechical Engineering*, ASCE, v.116, n.1, p.158-161.
- DÉCOURT, L. (1971). Comparação entre recalques previstos e observados do terreno de fundação da Barragem de Promissão. In: VII Seminário Nacional de Grandes Barragens, v.II.
- DUDLEY, J.H. (1970). Review of collapsing soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, v.96, n.SM3, p.925-947.
- EDIL, T.B. & MOTAN, S.E. (1984). Laboratory Evaluation of soil suction components. *Geotechnical Testing Journal*, v.7, n.4, p.173-181.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (1999). Rio de Janeiro. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Embrapa Produção de Informação & Embrapa Solos, Brasília, 412 p.
- ESCARIO, V. (1967). Measurement of the swelling characteristics of the soil fed with water under tension. International Cooperative Research on the Prediction of Moisture Content under Roads Pavements, O.C.D.E., Madrid.
- ESCARIO, V. (1969). Swelling of soils in contact with water at negative pressure. In: International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas, v.1, 207-217.
- ESCARIO, V. & SAEZ, J. (1973). Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction, I.C.E.S., 3, Haifa, p.195-200.

- FASOLO, P. J.; HOCHMÜLLER, D. P.; CARVALHO, A. P.; CARDOSO, A.; RAUEN, M. J.; POTTER, R. O. (1986). Guia para identificação dos principais solos do estado do Paraná. Brasília, EMBRAPA, 36p.
- FEDA, J. (1966). Structural stability of subsident loess soil from Praha-Dejvice. *Engineering Geology*, Amsterdam, v.1, n.3, p.201-219.
- FERNANDES, J.C.S. & CINTRA, J.C.A. (1997). Influência da colapsibilidade do solo na capacidade de carga de grupos de estacas. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, v.1, p.91-97.
- FERREIRA, S.R.M. (1993). Comportamento de mudança de volume em solos colapsíveis e expansivos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Poços de Caldas, v.1, p.283-299.
- FERREIRA, S.R.M.; FUCALE, S.P. & AMORIM, S.F. (1998). Comportamento de variação de volumes em solos colapsíveis avaliados por meio de ensaios de campo. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, v.1, p.171-178.
- FERREIRA, S.R.M. & LACERDA, W.A (1993). Variação de volume em solo colapsível medidas através de ensaios de campo e de laboratório. *Revista Solos e Rochas*, v.16, n.4, p.245-253.
- FERREIRA, S.R.M. & LACERDA, W.A. (1995). Volume change measurements in collapsible soil by laboratory and field test. In: First International Conference on Unsaturated Soils, Paris, v.2, p.847-854.
- FERREIRA,S.R.M. & TEIXEIRA, D.C.L.(1989). Collapsible soil A practical case in construction. In: Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Pernambuco,Brasil. Proceedings, v.1, p.603-606.
- FREDLUND, D.G. & MORGENSTERN, N.R. (1976). Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 13, 3.

- GASPARETTO, N.V.L. (1999). As formações superficiais do noroeste do Paraná e sua relação com o Arenito Caiuá. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências / USP, São Paulo, 185p.
- GIBBS, H.J. & BARA, J.P. (1967). Stability problems of collapsing soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE, v.93, n.SM4, p.577-594.
- GONÇALVES, N.M.M. (1987). Transformações mineralógicas e estruturais relacionadas à alteração hidrotermal e intempérica de rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná setentrional – (região de Ribeirão Preto – SP, Brasil). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências / USP, São Paulo, 212p.
- GUIMARÃES, J.S.F.N. & FERREIRA, S.R.M. (1998). Colapso devido à inundação em solos compactados. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, v.1, p.165-170.
- HAWTHORNE, F.C. (1988). Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology. Mineralogical Society of America, Washington, 698 p.
- HILF, J.W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. *Technical Memorandlum* N. 654, Bureau of Reclamation U.S. Department of Interior, Denver.
- HOLTZ, W.G. & HILF, W. (1961). Settlement of soil foundations due to saturation. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, v.1, p.673-679.
- HOUSTON, S.L.; HOUSTON, W.N. & SPADOLA, J.D. (1988). Prediction of field collapse of soils due to wetting. *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, v.114, n.1, p.40-58.
- IAPAR (2005). Cartas climáticas do Estado do Paraná. Escala 1:50.000. Disponível no site http://www.pr.gov.br/iapar/sma/Cartas_climaticas. Consultado em 16/03/2005.

- JENNINGS, J.E. & KNIGHT, K. (1957). The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, Proceedings, v.1, p.316-319.
- JENNINGS, J.E. & KNIGHT, K. (1975). A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to "collapse of grain structure". Regional Conference for African on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, 99, 105p.
- KNODEL, P. C. (1981). Construction of large canal on collapsing soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v. 107, n. GT1, p. 79-94.
- LAWTON, E.C.; FRAGASZY, R.J. & HARDCASTLE, J.H. (1989). Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering Division*. ASCE, 115(9): 1252-1267.
- LAWTON, E.C.; FRAGASZY, R.J. & HETHERINGTON, M.D. (1992). Review of wettinginduced collapse in compacted soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v.118, n.9, p. 1376-1394.
- LEMOS, R. C. & SANTOS, R. D. (1984). Manual de descrição e coleta do solo no campo. 2^a Ed. Campinas, SBCS/SNLCS, 45p.
- LUTENEGGER, A.J. & SABER, R.T. (1988). Determination of collapse potential of soils. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, v.11, n.3, p.173-178.
- MAACK, R. (1968). Geografia Física do Estado do Paraná. Livraria José Olympio Editora S.A.ou Úrsula Maack Kurowski, Rio de Janeiro, 450p.
- MACHADO, S.L. (1995). Estudo da compressão confinada e do colapso de um solo arenoso compactado em edômetro com sucção controlada. Dissertação de Mestrado, USP / São Carlos, 161p.

- MARTINS, F.B.; GEHLING, W.Y.;BRESSANI, L.A. & BICA, A.V.D. (1997). Comportamento em condições edométricas de um solo residual de arenito. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, v.1, p.121-130.
- MELFI, A. J. (1997). Lateritas e processos de laterização. Aula inaugural de 1994. USP / São Carlos, 29p.
- MINEROPAR (2001). Mapa geológico do estado do Paraná. Curitiba, PR.
- MITCHELL, J.K. (1956). The fabric of natural clays and its relation to engineering properties. Proceedings, 35^a HRB, v.35.
- MITCHELL, J.K. (1976). Fabric, structure and property relationships. *Fundamentals of soil behaviour*, John Wiley & Sons, New York, p.222-252.
- MONTEIRO, L.B. (1985). Alguns aspectos da capacidade de carga de solos colapsíveis. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais, São Paulo, v.2, p.193-202.
- MUSY, A. & SOUTTER, M. (1991). Physique du sol. 1ª Ed. Benteli AG, Lausanne, 335p.
- NAKASHIMA, P. & NÓBREGA, M. T. (2003). Solos do Terceiro Planalto do Paraná. In: 1° Encontro Geotécnico do terceiro Planalto Paranaense, Maringá, CD-Room.
- NADEO, J.R. & VIDELA, E.P. (1975). Comportamiento de pilotes en suelos colapsibles. In: V Congresso Pan-Americano de Mecánica dos Suelos e Ingenieria de Fundaciones, Buenos Aires, v.5, p.303-312.
- NÓBREGA, M. T. (1988). Contribuição ao estudo da estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários. Aspectos mineralógicos e morfológicos de alguns solos das regiões sul e sudeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociencias / USP, São Paulo, 189p.

- NUÑES, E. (1975). Suelos especiales: colapsibles, expansivos, preconsolidados por desecacion. In: V Congresso Pan-Americano de Mecánica dos Suelos e Ingenieria de Fundaciones, Buenos Aires, v.4, p.43-73.
- PALOCCI, A; CARVALHO, J.C. & CASTRO,S.S. (1999). Infuencia de la microestructura en el comportamiento de suelos compactados. In: XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguaçu, v.1, p.315-321.
- QUEIROZ, L.A. (1960). Compressible foundation at Três Marias Earth Dam. In: Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México. Proceedings, v.2, p.763-777.
- REGINATTO, A.R. & FERRERO, J.C. (1973). Collapse potencial of soils and soil-water chemistry. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Proceedings, v.2.2, p.177-183.
- REZNIK, Y.M. (1989). Discussion of "Determination of collapse potential of soils". *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, v.12, n.3, p.248-249, paper by LUTENEGGER,
 A.J. & SABER, R.T. (1988). *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, v.11, n.3, p.173-178.
- ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G.; GILLESPIE, D. & GRIEG, J. (1986). Use of piezometer cone data. Proceedings, *In situ*'86. ASCE Specialty Conference, Blacksburg, Virgínia.
- RÜEGG, N.R. (1969). Aspectos geoquímicos, mineralógicos e petrográficos de rochas basálticas da Bacia do Paraná. Tese de Doutorado, USP / F.F.C.L., 172p.

RUELLAN, A. & DOSSO, M. (1993). Regards sur le sol. Les Éditions Foucher, Paris, 192 p.

SERAPHIM, L.A. (1997). Influência da lixiviação na colapsibilidade de solo. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, v.1, p.55-63.

- SOUZA, A.; CINTRA, J.C.A. & VILAR O.M. (1995). Shallow foundations on collapsible soil improved by compaction. In: First International Conference on Unsaturated Soils, Paris, v.2, p.1017-1021.
- STOOPS, G. & JONGERIUS, A. (1975). Proposal for a micromorphological classification of soil materials. I. A classification of related distributions of fine and coarse particles. *Geoderma* 13 (5): 189-199.
- SUGUIO (1980). Fatores paleoambientais e paleoclimáticos e subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru. In: Mesa Redonda, A Formação Bauru no estado de São Paulo e regiões adjacentes, Coletânea de Trabalhos e Debates, Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, p. 15-30.
- TERZARIOL, R. & ABBONA, P. (1999). Determinacion del potencial de colapso mediante ensayos in situ. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguaçu, v.1, p.201-207.
- TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. (2000). Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. Oficina de Textos, São Paulo, p. 139-166.
- VARGAS, M. (1973). Structurally unstable soils in southern Brazil. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, v.2, p.239-246.
- VARGAS, M. (1977). Fundações de barragens de terra sobre solos porosos. *Revista Construção Pesada*, março, p.77-81.
- VARGAS, M. (1993). Solos porosos e colapsíveis. Aula inaugural de 1992, USP / São Carlos, 40p.
- VATSALA, A.; MURTHY, B.R.S. & HERKAL, R.N. (1998). Response of unsaturated soils under different probes. In: International Conference on Unsaturated Soils, Pequim, v.1, p.167-172.

- VERBEKE, R.(1969). Sur um procédé de fabrication de lames minces dans roches peu cimentées et des sols. *Bull. de la Soc. Géol. France*, Tomo XI, 3: 426-433.
- VILAR, O.M. (1979). Estudo da compressão unidirecional do sedimento moderno (solo superficial) da cidade de São Carlos. Dissertação de Mestrado, USP / São Carlos, 110p.
- VILAR, O.M.; CINTRA, J.C.A.; PARAGUASSU, A.B.; MACHADO, S.L.; CARVALHO, M.F. & CARNEIRO, B.I.J. (1995). Ensaios de campo e de laboratório em solos não saturados. In: Encontro Sobre Solos Não Saturados. Porto Alegre, p. 184-201.
- VILAR, O.M.; MACHADO, S.L. & BUENO, B.S. (1998). Collapse behaviour of a compacted lateritic soil. In: International Conference On Unsaturated Soils, Pequin, v.1, p.173-178.
- VILAR, O.M.; RODRIGUES, J.E. & NOGUEIRA, J.B. (1981). Solos colapsíveis: Um problema para a engenharia de solos tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, 1^a sessão, p.209-224.
- WEBB. P.A. & ORR, C. (1997). Analytical methods in fine particle technology. Micromeritics Instrument Corporation, 301 p.
- WHITE, I. C. (1908). Relatório final da comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil. Relatório sobre "coal measures" e rochas associadas do sul do Brasil. Parte I, Geologia, 201 p.
- WOLLE, C.M.; BENVENUTO, C. & CARVALHO, P.A.S. (1981). Collapsible soil foundation of Canals in Central Brazil. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stocolmo, v.1, p.277-280.
- WOLLE, C.M.; BENVENUTO, C.; VICTORIO, F.C.; POLLA, C.M.; SAAD, A.M. &
 PULEGHINI, P. (1978). Estudo preliminar da colapsividade dos solos no Projeto Jaíba
 MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, São Paulo, v.1, p.179-193.
ANEXO

TERMINOLOGIA MICROMORFOLÓGICA

A terminologia e os conceitos micromorfológicos adotados na pesquisa são aqueles

apresentados por Brewer (1976) e eventualmente por Stoops e Jongerius (1975).

- Fundo matricial: é o material que compõe os "peds" (agregados) primários ou o material dos solos apedais. Constitui o fundo ou o "cenário" onde aparecem as feições pedológicas. Compreende o plasma, o esqueleto e os vazios.
- Plasma: é a parte do solo que é capaz de ser, ou já foi, mobilizada, reorganizada e ou concentrada pelos processos de formação do solo. Inclui todo o material, orgânico ou mineral, de tamanho coloidal e relativamente solúvel não relacionado aos grãos do esqueleto.
- Esqueleto: são os grãos individuais, relativamente estáveis e não são facilmente deslocados, concentrados ou reorganizados. Inclui os grãos minerais e corpos silicosos e orgânicos resistentes maiores que o tamanho coloidal.
- Separações plásmicas: são feições caracterizadas por uma mudança significativa no arranjo (fabric) dos constituintes, mais do que uma mudança de concentração de determinada fração do plasma.
- Estrutura plásmica: é a maneira como estão organizados os constituintes do plasma e os vazios (poros) muito pequenos que resultam do arranjo das partículas do plasma. É definido a partir de características ópticas resultante da orientação das partículas do plasma.
- Estrutura Porfírica: as partículas maiores (areia, por exemplo) distribuem-se numa matriz de partículas muito finas (argila, por exemplo) podendo ser aberta, dupla ou simples, dependendo da proporção entre as partículas.
- Estrutura Gefúrica: as unidades mais grosseiras são ligadas por braços ou pontes de material fino.
- Estrutura Enáulica: grânulos de plasma microagregados Porfirogrânico: plasma englobando grãos do esqueleto

Estrutura Chitônica: partículas minerais rodeadas de material fino.

Estrutura Mônica: partículas de um só grupo de tamanho, ou ainda, material amorfo.

Plasma isótico: o plasma é isótropo, isto é, indeterminado mesmo com grandes aumentos.

- Plasma argilassépico: plasma dominantemente anisótropo, "manchado", onde se reconhecem domínios de argilo-minerais anisótropos, não orientados entre si.
- Plasma insépico: o plasma apresenta separações plásmicas estriadas que ocorrem como zonas isoladas, ou ilhas.
- Plasma massépico: o plasma apresenta separações plásmicas estriadas, não associadas a paredes de poros ou superfície de grãos do esqueleto. As zonas podem ser subparalelas ou desorientadas em relação em relação umas às outras.
- Plasma granossépico: as separações plásmicas com orientação estriada ocorrem subcutanicamente no contato com os grãos do esqueleto. A orientação estriada das separações plásmicas é dominantemente paralela à superfície dos grãos do esqueleto.
- Plasma porossépico: as separações plásmicas com orientação estriada ocorrem subcutanicamente associadas com as paredes dos vazios (poros). A orientação estriada das separações plásmicas é dominantemente paralela às paredes dos vazios, especialmente nas fissuras.
- Cristalária: cristais simples ou agrupados de frações relativamente puras, que não englobam a matriz do solo, mas formam massas coerentes. Sua morfologia (forma e estrutura interna) está de acordo com a sua formação atual nos vazios contidos no material estudado.
- Poros de empilhamento composto: são poros resultantes do empilhamento aleatório dos grãos e dos "peds" (agregados) que não se acomodam uns em relação aos outros.
- Cavidades: vazios relativamente grandes geralmente de forma irregular, normalmente não interconectados com outros vazios de tamanho comparável. Não são orientados e têm um padrão de distribuição aleatório.
- Fissuras: são vazios planares. Podem ser subdivididos em vários grupos:
 - a) poros aplainados de juntas: são vazios planares que atravessam o material do solo com um padrão regular. Ocorrem como sistemas;
 - b) poros aplainados irregulares: são vazios planares que cortam o material do solo de forma irregular. Não têm uma distribuição específica básica ou padrão de orientação entre os indivíduos.
 - c) Fendas são vazios essencialmente planares com uma complexa conformação.
- Padrão de distribuição relativa: classifica o tipo de distribuição (no fundo matricial) de elementos semelhantes em relação a indivíduos diferentes a distribuição do plasma em relação ao esqueleto.

Distribuição relativa granular: sem plasma (grãos simples) ou o plasma ocorre como nódulos.

Distribuição relativa porfirogrânica: grãos isolados do esqueleto dentro de plasma quase contínuo.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração Baixar livros de Agronomia Baixar livros de Arquitetura Baixar livros de Artes Baixar livros de Astronomia Baixar livros de Biologia Geral Baixar livros de Ciência da Computação Baixar livros de Ciência da Informação Baixar livros de Ciência Política Baixar livros de Ciências da Saúde Baixar livros de Comunicação Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE Baixar livros de Defesa civil Baixar livros de Direito Baixar livros de Direitos humanos Baixar livros de Economia Baixar livros de Economia Doméstica Baixar livros de Educação Baixar livros de Educação - Trânsito Baixar livros de Educação Física Baixar livros de Engenharia Aeroespacial Baixar livros de Farmácia Baixar livros de Filosofia Baixar livros de Física Baixar livros de Geociências Baixar livros de Geografia Baixar livros de História Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura Baixar livros de Literatura de Cordel Baixar livros de Literatura Infantil Baixar livros de Matemática Baixar livros de Medicina Baixar livros de Medicina Veterinária Baixar livros de Meio Ambiente Baixar livros de Meteorologia Baixar Monografias e TCC Baixar livros Multidisciplinar Baixar livros de Música Baixar livros de Psicologia Baixar livros de Química Baixar livros de Saúde Coletiva Baixar livros de Servico Social Baixar livros de Sociologia Baixar livros de Teologia Baixar livros de Trabalho Baixar livros de Turismo