

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS
TROPICAIS NATURAIS E COMPACTADOS**

JOHN FREDY BURGOS LOPERA

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.
COORIENTADORA: CLAUDIA MARICELA GÓMEZ MUÑETÓN, DSc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM- 272/16

BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DOS SOLOS TROPICAIS NATURAIS E
COMPACTADOS**

JOHN FREDY BURGOS LOPERA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**RENATO CABRAL GUIMARÃES, DSc. (UEG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**CLAUDIA MARICELA GOMEZ MUÑETÓN, DSc. (UnB)
(COORIENTADOR)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 de Junho de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

BURGOS LOPERA, JOHN FREDY

Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados [Distrito Federal] 2016

xix, 149 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2016)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Solos tropicais	2. Intemperismo
3. Compactação	4. Microestrutura
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BURGOS, J.F. (2016). Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-272/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: John Fredy Burgos Lopera

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados.

GRAU / ANO: Mestre / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

John Fredy Burgos Lopera

Carrera 72 AB Número 71-26 Apto 101, - El volador

Medellín-Antioquia-Colômbia

e-mail: johnburgos517@gmail.com

DEDICATÓRIA

À minha mãe Martha Gisella por seu esforço, sacrifício e apoio. Agradeço especialmente todo o seu amor e apoio à minha formação.

À meu pai German, agradeço seus conselhos e bênção eterna, sempre na minha mente e coração.

À meu irmão Miguel Angel a quem amo indescritivelmente.

À meus amigos Jader, Cristina, Wilber e Jose, por toda esta experiência e tudo que foi vivido será recordado para sempre.

À minha família pelo apoio e paciência.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe por sempre dedicar e me apoiar em cada situação de minha vida, por seu amor incondicional e único. A meu pai que sempre deu o melhor dele para mim, por seus conselhos e seu cuidado, eternos. A meu irmão que por sua alegria e amor inocente me motivaram. Amo vocês.

Aos meus amigos pela companhia e ajuda, ao Jader por seu conhecimento, à Cristina por seu apoio, ao Wilber e Jose. A meus amigos e colegas que estiveram comigo neste processo e a todos com quem compartilhei.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pela oportunidade. A todos seus professores da geotecnia pela dedicação e por compartilharem seus conhecimentos. Aos técnicos do laboratório. Aos professores Marcio Muniz, André Pacheco, Hernán Carvajal, José Camapum, Gregório Araújo, Luis Martins e Manoel Neto, agradeço e admiro sua boa forma de ensinar e compartilhar conhecimento e suas ajudas na minha formação e pesquisa.

Ao professor José Camapum de Carvalho, pela orientação, apoio, disponibilidade e acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho, por ajuda e compreensão.

Aos professores Edwin Fabián Garcia Aristizabal que ensinou e compartilhou o interesse na geotecnia e ao Carlos Alberto Riveros Jerez pela motivação para continuar aprendendo e me formando. Agradeço a eles por suas contribuições na minha formação, por acreditarem em mim, por serem um exemplo a seguir e inspiração.

Ao laboratório de microscopia da Universidade Federal de Goiás, UFG, LabMic do Instituto de Física, Goiânia. À Tatiana pelo apoio e ajuda nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura. Ao laboratório de FURNAS em Goiânia que também contribuiu na minha pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pelo apoio financeiro.

INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS TROPICAIS NATURAIS E COMPACTADOS

RESUMO

Nas obras de engenharia e em especial na geotecnia, o comportamento dos materiais empregados é estudado, geralmente, considerando-se suas propriedades e características. As diferentes interações entre os componentes de um material atuam nas respostas que esse material apresenta sob diferentes situações de solicitação, tornando-se relevante compreender esses componentes e como eles interagem. Os componentes, os fenômenos que neles e/ou entre eles atuam e as solicitações impostas ao sistema refletem não só no comportamento, mas também na própria estrutura, todos em sinergia. A principal motivação desse trabalho é colocar em destaque a importância de se conhecer a microestrutura dos solos tropicais de modo a fazer um aporte na compreensão dos resultados de ensaios e análises realizadas, que levem, por exemplo, a melhores projetos e execução de aterros, barragens de terra, rodovias e obras geotécnicas em geral. A metodologia desta pesquisa envolveu a coleta de amostras deformadas e indeformadas ao longo de um poço com 12 metros de profundidade, realizado em um perfil de solo tropical. Essas amostras foram submetidas à caracterização física, ensaios de compactação, ensaios de resistência à compressão simples, ensaios de tração indireta por meio da compressão diametral, análise microestrutural do solo em estado natural e compactado e usadas na determinação de curvas características de retenção de água. O estudo foi realizado para quatro diferentes profundidades de modo a cobrir o perfil de intemperismo como um todo, solo altamente intemperizados: 2 e 5 m; solo de transição: 8,6 m; solo saprolítico: 11,6 m. A influência do processo de compactação na microestrutura do solo foi analisada comparando-se os métodos estático e dinâmico. Avaliou-se, no estudo, a relação entre a condição de compactação e a microestrutura do solo. O modelo tradicional proposto com base em estudos realizados sobre solos oriundos de regiões temperadas requer reavaliação considerando-se o perfil de intemperismo tropical, tendo em vista que, nesse caso, as partículas contidas nos agregados ou nos pacotes de argila possuem menor liberdade para o rearranjo que as partículas individualizadas presentes nos solos sedimentares de região temperada. Salienta-se que os solos tropicais já se distinguem dos demais por sua estrutura no estado natural, o que realça a importância de suas avaliações estruturais quando compactados.

INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF NATURAL AND COMPACTED TROPICAL SOILS

ABSTRACT

In engineering interventions, especially geotechnical ones, the behavior of the materials used is generally studied considering its properties and characteristics. The different interactions between the material's components influence on the response that the material presents to different situations, making it important to understand such components and their interactions. The components, the phenomena acting within and between them and the loads imposed to the system reflect not only on its behavior but also on its structure, all together. The motivation of this work is to highlight the importance of understanding the microstructure of tropical soils. Thus, the author expects to make a contribution towards better analyzing test results and design situations, leading, for example, to the conception of better projects and building procedures of landfills, earth dams, roads and geotechnical interventions in general. The methodology of this research involves the extraction of disturbed and undisturbed samples over a 12 meters deep pit, in a tropical soil profile. These samples were subjected to physical characterization, compaction tests, simple compression strength tests, indirect tensile tests by diametral compression and microstructural analysis of the soil in both natural and compacted states. Also, the samples were tested to determine the soil's characteristic water retention curves. The study was conducted by taking samples from four different depths to cover the whole weathering profile. The profile consists of: highly weathered soil - 2 and 5 m; transition soil - 8.6 m and saprolite: 11.6 m. The influence of the compaction process to soil's microstructure has been analyzed by comparing the static and dynamic methods. In the present study, the relationship between the compaction condition and soil's microstructure has been established. The standard model presented in the literature is based on studies performed on soils from temperate regions, thus it requires reevaluation when applied to soils from a tropical weathering profile. This comes from the fact that in the latter case, the particles contained in the aggregates or in the clay packages have less freedom for rearrangement while compared to the individual particles present in sedimentary soils from temperate regions. It is important to notice that tropical soils already differ from others with respect to their structure in natural state, which enhances the importance of their structural assessments when compacted.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	3
1.2	MOTIVAÇÃO.....	4
1.3	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	6
2.1	SOLOS TROPICAIS: MINERALOGIA E MICROESTRUTURA.....	6
2.1.1	MINERALOGIA.....	14
2.1.2	MICROESTRUTURA.....	16
2.2	TEORIAS SOBRE COMPACTAÇÃO.....	18
2.3	ESTRUTURA E COMPORTAMENTO DE SOLOS TROPICAIS COMPACTADOS.....	23
2.4	ESTRUTURA DO SOLO EM ESTADO NATURAL.....	27
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	30
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	32
3.2.1	LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE.....	32
3.2.2	PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS γ_s	34
3.2.3	MASSA ESPECIFICA APARENTE SECA γ_d	35
3.2.4	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	35
3.2.5	CLASSIFICAÇÃO.....	37
3.3	MINERALOGIA.....	38
3.4	COMPACTAÇÃO.....	39
3.4.1	COMPACTAÇÃO DINÂMICA.....	39
3.4.2	COMPACTAÇÃO SEMI-ESTÁTICA.....	41

3.5	MICROSCOPIA.....	42
3.6	CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	48
3.7	COMPRESSÃO SIMPLES	52
3.8	TRAÇÃO SIMPLES INDIRETA.....	52
3.9	SÍNTESE DO ESTUDO	53
4	RESULTADOS E ANÁLISES	55
4.1	MINERALOGIA	55
4.2	CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	59
4.2.1	LIMITE DE LIQUIDEZ, LIMITE DE PLÁSTICIDADE E ÍNDICES FÍSICOS.....	61
4.2.2	MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS, POROSIDADE E SATURAÇÃO.	67
4.2.3	MASSA ESPECÍFICA NATURAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA	70
4.2.4	ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	71
4.2.5	CLASSIFICAÇÃO	77
4.3	COMPACTAÇÃO.....	82
4.4	MICROSCOPIA.....	89
4.4.1	ESTRUTURA DO SOLO EM ESTADO NATURAL.....	90
4.4.2	ESTRUTURA DO SOLO COMPACTADO	105
4.4.3	DISTRIBUIÇÃO DE POROS NO SOLO AVALIADA A PARTIR DAS IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	115
4.5	CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	124
4.6	COMPRESSÃO SIMPLES	131
4.7	TRAÇÃO SIMPLES INDIRETA.....	139
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	141
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	144
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Propriedades para a compactação segundo a ABNT NBR7182 (1986).	40
Tabela 3.2 Exemplo das tabelas de distribuição de frequências na distribuição de poros.	47
Tabela 3.3 Curvas de calibração para o papel Whatman N42 (Campos, 1995).	49
Tabela 3.4 Ensaio realizados.	54
Tabela 4.1 Mineralogia do perfil de solo (Carvalho, 1995, apud Guimarães, 2002).	55
Tabela 4.2 Massa específica dos minerais (modificado Kiehl, 1979).	56
Tabela 4.3 Umidade natural (wn) Limites de Atterberg e índices de plasticidade (IP), índice de liquidez (Il), índice de consistência (Ic) e coeficiente de atividade de Skempton do perfil de solo estudado.	62
Tabela 4.4 Ic do perfil para as umidades máximas e mínimas apresentadas por Guimarães (2002).	64
Tabela 4.5 Índices físicos do perfil de solo estudado.	68
Tabela 4.6 Granulometria e classificações do perfil de solo.	73
Tabela 4.7 Classificações do perfil do solo.	78
Tabela 4.8 Classificação MCT.	79
Tabela 4.9 Granulometria do solo para as quatro profundidades estudadas.	81
Tabela 4.10 Propriedades e índices físicos dos solos estudados nas quatro profundidades.	81
Tabela 4.11 Especificações adotadas na compactação dinâmica.	83
Tabela 4.12 Condições referentes às compactações dinâmica e semi-estática.	83
Tabela 4.13 Avaliação semiquantitativa dos vazios presentes no solo ao longo do perfil de intemperismo em estado natural. Observação por meio de lupa óptica.	93
Tabela 4.14 Avaliação quantitativa do perfil natural de solo por meio de imagens obtidas no MEV.	98
Tabela 4.15 Avaliação semiquantitativa do perfil de solo natural observado no MEV.	99
Tabela 4.16 Avaliação quantitativa condições especiais no solo natural.	103

Tabela 4.17 Tamanho dos argilominerais. (Modificado Grim, 1962).	105
Tabela 4.18 Avaliação semiquantitativa da porosidade do horizonte laterítico compactado dinâmica e estaticamente.	112
Tabela 4.19 Avaliação semiquantitativa da porosidade dos horizontes de transição e saprólito compactado dinâmica e estaticamente.	113
Tabela 4.20 Tabelas de frequências de distribuição dos macro e microporos para a profundidade de 2 m.	116
Tabela 4.21 Variação dos valores de sucção para cada profundidade com o solo em estado natural e compactado.	127
Tabela 4.22 Resultados dos ensaios de compressão simples para o perfil de solo estudado.	132
Tabela 4.23 Resultados de RCS.	138
Tabela 4.24 Valores de resistência a tração simples indireta para ensaios realizados na condição ótima das três energias.	139
Tabela 4.25 Variação do maior valor de resistência a tração simples indireta em relação a outras variáveis.	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ciclo geológico (Modificado Pedro & Melfi, 1983).....	6
Figura 2.2 Processo alteração. (modificado - Buckman & Brady, 1960).	7
Figura 2.3 Alteração tropical (modificado de Gilkes <i>et al.</i> , 1973).....	9
Figura 2.4 Modelo de evolução químico mineralógica dos solos tropicais (Cardoso, 1995).	9
Figura 2.5 Evolução mineralógica devido ao intemperismo químico (Modificado de Araki, 1997).....	10
Figura 2.6. Desenvolvimento dos minerais de argila. (Modificado de Sherman, 1952).	12
Figura 2.7 Estrutura de um solo compactado. (Modificado Lambe, 1958b).....	21
Figura 2.8. Comportamento mecânico durante compactação. (Modificado Simon, 1964).	22
Figura 2.9. Envoltória de estado limite oriunda do processo de compactação (Camapum de Carvalho <i>et al.</i> , 1987).	23
Figura 3.1 Preparação de um bloco indeformado no fundo do poço.....	31
Figura 3.2 Amostras para massa específica dos grãos.	34
Figura 3.3 Pentapicnômetro modelo pentapyc 5200E (Chrusciak, 2011).	35
Figura 3.4 Amostras para balança hidrostática.....	35
Figura 3.5 Peneiramento grosso e fino.....	36
Figura 3.6 Amostras destorroadas manualmente para peneiramento.	37
Figura 3.7 Ensaio de sedimentação com e sem defloculante.	37
Figura 3.8 Grupos e parâmetros de classificação MCT expedita (Nogami & Villibor, 1994).	38
Figura 3.9 Corpos de prova compactados.	41
Figura 3.10 A) Amostras naturais e compactadas; B) estufa com vácuo.....	43
Figura 3.11 Preparação e metalização das amostras para MEV.....	43
Figura 3.12 A) Camará de vácuo para metalização; B) microscópio eletrônico de varredura.....	43

Figura 3.13 Análises semiquantitativos no software Imagej das imagens obtidas na lupa ótica e no MEV.....	45
Figura 3.14 Processo de medição e contagem de poros.....	46
Figura 3.15 Corpos de prova usados na determinação das curvas características.....	51
Figura 3.16 Ensaio de Compressão simples.....	52
Figura 4.1 Distribuição dos principais minerais ao longo da profundidade (Guimarães, 2002).	56
Figura 4.2 Microscopias solo natural.	57
Figura 4.3 EDS natural, concentração de minerais óxidos e hidróxidos.	58
Figura 4.4 Índice de consistência, máximo e mínimo.....	64
Figura 4.5 Perfil de umidade natural, máxima, mínima e de saturação.....	65
Figura 4.6 Limites de Atterberg do perfil de solo estudado.....	66
Figura 4.7 Índice de plasticidade.	66
Figura 4.8 Índice de atividade e índice de consistência ao longo do perfil.....	67
Figura 4.9 Densidade relativa dos grãos Gs.	68
Figura 4.10 A) porosidade do perfil de solo; B) Índice de vazios.	69
Figura 4.11 Perfis de grau de saturação (Sr).	70
Figura 4.12 Peso específico úmido e aparente seca do perfil de solo estudado.	71
Figura 4.13 Perfis de umidades (wn - umidade natural; wh - umidade higroscópica, w Sr – umidade correspondente à saturação).	71
Figura 4.14 Curvas granulométricas (1 m a 3 m).	75
Figura 4.15 Curvas granulométricas (4 m a 7 m).	76
Figura 4.16 Curvas granulométricas (8 m a 9 m).	76
Figura 4.17. Curvas granulométricas (10 m a 12 m).	77
Figura 4.18 Curvas granulométricas das profundidades estudadas com uso de defloculante.	82
Figura 4.19 Curvas granulométricas das profundidades estudadas sem usar defloculante.....	82

Figura 4.20	Curvas de compactação dinâmica.	84
Figura 4.21	Variação do peso específico e do índice de vazios dos solos compactados.	86
Figura 4.22	Curvas de compactação dinâmica e estática por profundidade.	88
Figura 4.23	Variação dos índices de vazios com a umidade compactação.....	88
Figura 4.24	Configuração macro do solo natural.	90
Figura 4.25	Microestrutura do solo natural coletado de 1 m a 4 m de profundidade observada por meio de lupa óptica.	91
Figura 4.26	Microestrutura do solo natural coletado de 6 m a 9 m de profundidade observada por meio de lupa óptica.	92
Figura 4.27	Microestrutura do solo natural coletado de 10 m a 12 m de profundidade observada por meio de lupa óptica.	92
Figura 4.28	Comparação de "índices de vazios" globais (a) estimados desde análises de imagens.....	95
Figura 4.29	Microestrutura observado no MEV do solo no estado natural.	95
Figura 4.30	Variação da relação dos macro, meso e microporos do solo natural.	99
Figura 4.31	Imagens obtidas no MEV para 1 m a 3 m no perfil de solo natural.....	100
Figura 4.32	Imagens obtidas no MEV para 4 m a 7 m no perfil de solo natural.....	101
Figura 4.33	Imagens obtidas no MEV para 8 e 11 m no perfil de solo natural estudado.	102
Figura 4.34	Distribuição da porosidade em função da ampliação da imagem.	102
Figura 4.35	Análises condições especiais MEV.....	104
Figura 4.36	Partículas e minerais, agregados e pacotes de partículas.	105
Figura 4.37	Observações na lupa óptica de amostras compactadas coletadas a 2 m e 5 m de profundidade na energia Proctor normal (PN).....	106
Figura 4.38	Observações na lupa óptica de amostras compactadas na energia Proctor normal (PN) 8,6 m e 11,6 m PN.	107
Figura 4.39	Macroestrutura do solo compactado dinâmica vs. estática lupa óptica.....	108
Figura 4.40	Microestruturas observadas no MEV do solo compactado dinâmica e estaticamente.	108

Figura 4.41 Variação estrutural nas compactações dinâmica e estática do solo coletado a 2m de profundidade.	109
Figura 4.42 Variação estrutural nas compactações dinâmica e estática do solo coletado a 8,6m de profundidade.	110
Figura 4.43 Variação da microestrutura na compactação dinâmica e estática de amostra coletada a 8,6 m de profundidade e compactada.	111
Figura 4.44 Comparação relações de porosidade compactação estática e dinâmica.	115
Figura 4.45 Frequência e distribuição de poros para a profundidade de 2 m.	117
Figura 4.46 Semelhança das curvas de frequência com curvas de distribuição de poros.	119
Figura 4.47 Frequência de distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 2 m.	120
Figura 4.48 Frequência de distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 5 m.	120
Figura 4.49 Frequência da distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 8,6 m.	121
Figura 4.50 Frequência da distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 11,6 m.	122
Figura 4.51 Famílias de curvas características por profundidade em função do grau de saturação (S_r).	126
Figura 4.52 Famílias de curvas características por profundidade em função do teor de umidade (w).	127
Figura 4.53 Curvas características por estado dos solos em função do grau de saturação (S_r). 128	
Figura 4.54 Curvas características em função da umidade agrupadas por estado do solo.	129
Figura 4.55 Variação do índice de vazios com a variação da umidade da saturação das curvas características.	130
Figura 4.56 Curvas características transformadas por estado do solo (e_pF - Saturação).	130
Figura 4.57 Resistência a compressão simples dos solos lateríticos (2 m e 5m).	133

Figura 4.58 Resistência a compressão simples solo de transição (8,6m) e solo saprolítico (11,6m).	135
Figura 4.59 RCS em função: a) da umidade; b) do índice de vazios, c) do grau de saturação; d) da sucção.....	136
Figura 4.60 Relação entre os valores de módulo e a RCS ao longo do perfil de intemperismo estudado.....	137
Figura 4.61 RTSI na condição ótima em relação: a) ao índice de vazios; b) à umidade; c) ao grau de saturação; d) à sucção; e) pF/e.....	139
Figura 4.62 Comportamento da RTSI máxima em relação a: a) índice de vazios; b) umidade; c) saturação; d) sucção; e) pF/e.	140

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações.

a1	Componente de mudança volumétrica de poros interagregados
a2	Componente de mudança volumétrica de poros intra-agregados
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Símbolo químico do Alumínio
Al ₂ O ₃	Hidróxido de Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ca	Símbolo químico do cálcio
c	Coesão total do material
c'	Coesão efetiva do material
c'	Coefficiente de contração
CBR	Californian bearing ratio test
CD	Ensaio de granulometria por sedimentação com defloculante
ct	Contração
cm	Centímetro
Cp	Corpo de prova
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cv	Coefficiente de adensamento
D	Diâmetro
DEC	Estado Limite Critico
E	Módulo de rigidez
e	Índice de vazios
EDS	Espectrômetro de Energia Dispersiva
EEL	Estado Limite da Envoltória
e ₀	Índice de vazios inicial
e _f	Índice de vazios final
<i>et al.</i>	E outros
<i>Fe</i>	Ferro
<i>Fe₂O₃</i>	Óxido de Ferro
<i>f_i</i>	Frequência
<i>Fi</i>	Frequência acumulada
g	Grama
G _s	Gravidade específica dos grãos
h	Horas
H	Altura de queda do soquete na compactação
Ia	Índice de atividade
Ic	Índice de consistencia
Ip	Índice de plasticidade
Il	Índice de liquidez
K	Potássio
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
ki	Coefficiente do índice de laterização Martin & Boyne, 1927
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
kr	Coefficiente do índice de laterização Joachin & Kandiacj, 1941
LA	Areia laterítica
LA'	Solo arenoso laterítico

LabMic	Laboratório de microscopia, instituto de física UFG
LC	Loading Collapse Curve
LG'	Solo argiloso laterítico
LI	Limite de liquidez
Lp	Limite de plasticidade
M	Modulo de resiliência
m	Metro
max	Valor maximo
min	Valor mínimo
MCT	Miniatura, compactado, tropical
MCV	Ensaio de compactação em miniatura
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
Mg	Símbolo do Magnésio
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Número de golpes na compactação dinâmica
Nat	Natural, estado natural
NA	Areia não laterítica
NA'	Solo arenoso não laterítico
n	Número de camadas
n	Porosidade
Na	Símbolo do Sódio
NG	Argila não laterítica
ni	Frequência relativa
Ni	Frequência relativa acumulada
NBR	Norma Brasileira
NS'	Solo siltoso não laterítico
P	Peso do soquete na compactação dinâmica
Pa	Pascal
P _a	Tensão de pré-adensamento
pF	Logaritmo da sucção em centímetro de coluna de água
pn	Penetração agulha padrão
PN	Proctor normal
PNE	Proctor normal na compactação estática
PI	Proctor intermediário
PIE	Proctor intermediário na compactação estática
PM	Proctor modificado
PME	Proctor modificado na compactação estática
PSD	Poros Size Distributions
Psi	Pounds by square inches, medida de pressão
Pz	Profundidade
RCS	Resistência a compressão simples
RTSI	Resistência a tração simples indireta
s	Sucção mátrica
sat	Saturada
SD	Ensaio de granulometria por sedimentação sem defloculante
Si	Símbolo do silício
SiO ₂	Óxido de silício
SPT	Ensaio de penetração estándar

S_r	Grau de saturação
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
T	Temperatura
Ti	Símbolo químico do Titânio
UFG	Universidade Federal de Goiás
$u_a.u_w$	Sucção mátrica
USCS	Unified Soil Classification System
ua	Pressão no ar
u_w	Pressão na água
V	Volume
V_s	Volume de sólidos
V_w	Volume de água
w ω	Teor de umidade
w ω_n	Teor de umidade natural
w ω_h	Umidade higroscópica
w ω_{op}	Teor de umidade ótima
ϵ	Deformação
ϵ_a	Deformação axial
γ_d	Peso específico seco
γ	Peso específico
γ_s	Peso específico dos sólidos
Φ	Ângulo de atrito
μm	Micrômetro
σ_1	Tensão principal maior
σ_2	Tensão principal intermédia
σ_3	Tensão principal menor
%	Porcentagem
Δ	Gradiente, Mudança
Δe	Variação do índice de vazios, mudança do volume
#	Número
°C	Graus Celcius, temperatura
ρ	Massa específica
ρ_s	Massa específica seca aparente

1 INTRODUÇÃO

Os solos tropicais devem ser entendidos desde sua formação e conhecidos completamente, até os componentes que influenciam nos comportamentos. Cada fenômeno natural ou externo ao solo pode alterar sua composição, sua estrutura e, portanto, o seu desempenho. Durante a atuação de determinado fenômeno, tem-se interação dos componentes com o comportamento até atingir um estado de equilíbrio refletido em um resultado final e uma composição da estrutura específica. Na área geotécnica, dentro das análises de comportamento, destacam-se como necessidade o estudo das características e o entendimento da estrutura e da microestrutura do solo. Como consideração é tida a questão dos solos tropicais com composição químico-mineralógica específica e características estruturais próprias no estado natural e, em muitos casos, quando compactados, intervindo no comportamento hidromecânico.

Para cada material, e em especial os solos tropicais, existe uma série de diferentes processos, uma interação ou ação, seja natural ou artificial, com origem própria no material ou externa, que modifica suas propriedades e o seu comportamento, bem como intervém em sua resposta a uma determinada ação, seja ela de origem mecânica ou hidráulica, e que pode ser analisada para compreender como é possível aproveitar cada fator para melhorar os resultados e o desempenho desse material. Para os solos uma das melhores opções é a compactação.

De acordo com Queiroz (2015), os estudos dos solos estiveram concentrados no comportamento mecânico e hidráulico com análises separadas, quando na realidade, eles apresentavam uma dependência mútua, com melhores resultados com acoplamento dos estudos destes fenômenos aos comportamentos, revelando a necessidade de inclusão da importância da estrutura.

Os solos, de um modo geral e, mais especificamente, os solos finos, apresentam comportamento hidromecânico diretamente relacionado à sua estrutura, seja no estado natural, seja no estado alterado. Por isso procurou-se entender a origem do solo e da sua estrutura, entender como age certa ação mecânica ou hidráulica na variação da estrutura e do comportamento, buscando entender como a estrutura atua na variação das respostas ante o fenômeno que é analisado. Uma das ações para melhoria do comportamento hidromecânico do solo mais empregadas na geotécnica é a compactação, ela tem sido

constantemente usada e analisada. Porém deve-se buscar dar maior ênfase ao estudo dos fenômenos envolvidos na compactação do solo e em suas consequências. Esses fenômenos devem sofrer alterações segundo o estado inicial do solo, e, portanto, no caso dos solos tropicais, estaria fortemente ligado ao nível de intemperismo por ele sofrido, daí o foco dessa pesquisa em se analisar um perfil de intemperismo como um todo.

Também é importante dentro do estudo do solo, entender como e por que o processo de solitação afeta sua estrutura. A compactação dos solos objetiva a melhoria do comportamento por meio da redução do volume de vazios. Essa redução do volume de vazios pode se dar em consequência do simples rearranjo estrutural das partículas finas ou por quebra e reorganização de elementos mais grossos, de agregados e pacotes de argila.

A estrutura do solo começa a ter importância a partir dos estudos feitos por Arthur Casagrande (1932), mas foram os estudos realizados por Lambe (1958) que foram desenvolvendo a ideia da interação da água, dos minerais, da capacidade de troca iônica e de outros fatores, na formação de diferentes estruturas na composição do solo, seja natural ou compactado (Vargas, 1978).

Lambe (1958a) foi um dos primeiros a levantar a questão da importância da estrutura dos solos compactados no seu comportamento e propôs um modelo no qual a estrutura varia com a energia e com a umidade de compactação, gerando uma estrutura floculada pela ação das partículas e falta da água, ou dispersa com ajuda da água. Esse modelo proposto com base em estudos realizados sobre solos oriundos de regiões temperadas requer ser reavaliado considerando-se o perfil de intemperismo tropical, tendo em vista que, enquanto no modelo original as partículas dispunham de certa liberdade para serem organizadas segundo um determinado modelo estrutural imposto pela energia e umidade de compactação, nos caso dos solos tropicais intemperizados as partículas são contidas nos agregados ou nos pacotes de argila possuindo menor liberdade para o rearranjo.

Devido à ligação direta do comportamento dos solos, em especial os solos finos, com a sua estrutura, é preciso avaliar as variações impostas na estrutura e as consequências das diferentes teorias e métodos de compactação, com a consideração que os postulados foram feitos em solos diferentes dos tropicais ou solos pouco

intemperizados. Para encontrar e entender as diferenças é necessário conhecer os solos tropicais, sua origem, composição e comportamento, conhecer a mineralogia e microestrutura, entender as variações e diferenças dadas pela origem, saber como cada fator age e como ele é diferente em um solo tropical em relação a um solo de região temperada.

O estudo apresenta como as características resultantes da ação do intemperismo atuante nas regiões tropicais afetam o solo, sua resposta nos ensaios de compactação, suas propriedades e comportamento e analisa a ligação dessas propriedades e comportamento com as estruturas apresentadas pelo solo. O estudo foi feito a partir de amostras coletadas em três horizontes levando-se em consideração o solo em estado natural e quando compactado: horizonte profundamente intemperizado (2 m e 5 m); horizonte de transição (8,6 m); horizonte de solo saprolítico (11,6 m). Considerou-se ainda a necessidade de avaliar a influência do método de compactação nas propriedades e comportamento do solo ao longo do perfil, sendo usados no estudo os métodos dinâmico e estático com emprego das energias Proctor normal, intermediário e modificado. A base principal do estudo parte da busca do entendimento da composição químico-mineralógica e estrutural do solo oriundos de sua formação e de como as propriedades estruturais são alteradas pela compactação intervindo no comportamento.

1.1 OBJETIVOS

- Analisar a contribuição de Lambe sobre a estrutura dos solos compactados, observando a variação da estrutura ao longo do perfil de intemperismo tropical em função da umidade, energia e tipo de compactação.
- Analisar e entender as interferências causadas pelas diferentes estruturas e mineralogias presentes ao longo do perfil de intemperismo tropical sobre o comportamento do solo. Compreendem ainda os objetivos desta pesquisa, o estudo dos aspectos do comportamento que poderão ser afetados pela estrutura do solo, tais como, curva de retenção de água e resistência à compressão simples.

Para cumprir esse objetivo, estudou-se a microestrutura do solo compactado ao longo do perfil de intemperismo variando-se a umidade, o método e a energia de compactação, para o perfil de solo localizado no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Para efeito de comparação e melhor análise, também foi estudada a microestrutura do solo em estado natural. Fez-se

a avaliação dos resultados dos diferentes ensaios realizados e comparou-se com outros estudos.

1.2 MOTIVAÇÃO

Contribuir para a construção de uma engenharia mais fundamentada no entendimento dos fenômenos que nos simples resultados apresentados nos estudos de comportamento. Dentro dessa perspectiva, acredita-se ser possível ampliar a eficiência e o alcance da engenharia. Nesse sentido é importante conhecer a microestrutura dos solos de modo a melhorar a compreensão dos resultados encontrados e análises realizadas que levem, por exemplo, a melhores projetos e execução de obras geotécnicas. Avançar no conhecimento da microestrutura como aporte a compreensão dos resultados, e de sua alta influência no comportamento, como acontece em solos tropicais.

1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi elaborada com conteúdos que expliquem e sustentem os fins da pesquisa, e permitam entender ou discutir os resultados da mesma. Para facilitar o transcurso no tema e na pesquisa desenvolveram-se 6 capítulos descritos a seguir:

- Capítulo 1: Realiza uma introdução e contextualização da pesquisa, apresentando porque ela é importante e quais são os objetivos e motivação que nascem nesta temática.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica que permite principalmente conhecer o estado da arte ou marco teórico atualizados e existentes. Este capítulo se inicia com a explicação de conceitos básicos e importantes para compreensão da pesquisa, assim como desenvolve distintos pontos de vista, resultados e análises das condições atuais da investigação, informa sobre as condições conhecidas e as esperadas. Centra-se no entendimento dos termos chaves como o intemperismo, solos tropicais, macro e microestrutura, e compactação. De acordo com estas informações se sustenta ou discutem os resultados. Este capítulo é constitui-se em base para o entendimento dos resultados e contem argumentos para entender como esta pesquisa contribui para o entendimento das propriedades e comportamento dos solos tropicais.

- Capítulo 3: Apresentam-se os método e materiais empregados durante o processo de investigação, onde se explicam com base nos objetivos e no marco teórico da revisão bibliográfica, quais ensaios e a maneira como serão realizados dependendo das condições dos materiais empregados. Estes materiais são pré - visualizados na revisão bibliográfica, preparados segundo as metodologias e especificadas e analisados nos resultados.
- Capítulo 4: Apresenta os resultados e os analisa, considerando o conteúdo do capítulo 2, discutindo, apoiando ou discordando dos entendimentos postos com explicações e argumentos e considerando-se as implicações das metodologias apresentadas no capítulo 3 e trazendo à luz novas percepções oriundas dessa pesquisa.
- Capítulo 5: Apresenta as conclusões e sugestões da pesquisa baseado nos resultados obtidos e nos que poderiam se obter.
- Finalmente são apresentadas as referencias bibliográficas utilizadas como suporte no desenvolvimento desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A seguir serão apresentados conceitos relacionados ao estudo, que servem como referência e estão baseados em pesquisas que trataram de temas gerais e de temas relacionados aos solos tropicais, composição, estrutura e comportamento dos solos.

2.1 SOLOS TROPICAIS: MINERALOGIA E MICROESTRUTURA.

A formação de solos e rochas faz parte de todo um ciclo geológico (Figura 2.1), que tem a influência de diferentes fatores que repetidos em diferentes condições causam variações nos processos dos fenômenos atuantes gerando diversos resultados. Fatores como umidade, temperatura, pressão, assim como a física, química e origem são protagonistas em ações de fenômenos ou processos importantes, como o intemperismo.

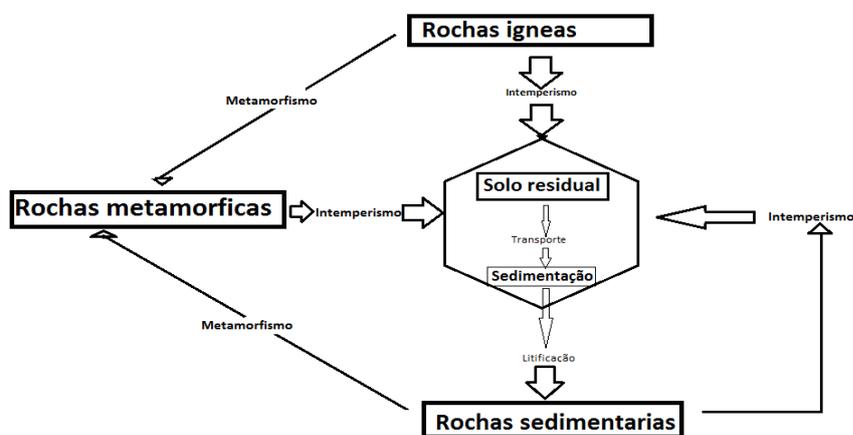


Figura 2.1 Ciclo geológico (Modificado Pedro & Melfi, 1983).

De acordo com Pedro & Melfi (1983) existem diferentes tipos de intemperismo atuantes na produção dos solos:

- Intemperismo diacrônico de locais com climas úmido e frio, temperados, onde acontece alteração dos minerais mais vulneráveis (feldspatos, micas, etc.) com pouca produção de minerais secundários (argilominerais) e solos produzidos em camadas de baixa espessura.
- Intemperismo sincrônico produzido em locais úmidos e quentes de zona intertropical de alta variação, que geram muita presença de minerais secundários, na maioria das vezes solos de grandes espessuras, mas que podem variar pela topografia, com um perfil que apresenta um solo de alta alteração na parte superior e

solos saprólitos nos níveis mais profundos, que podem ou não estar em altas profundidades.

A estrutura altera-se através do perfil de intemperismo dando origem a formação de agregados, maior porosidade e distribuição de poros bimodal nas camadas superiores até atingir em maiores profundidades, uma estrutura mais homogênea em termos de poros e distribuição (Guimarães, 2002).

O mecanismo do intemperismo gera camadas de pouca espessura em locais onde se tem clima seco e quente. No entanto, em climas úmidos e quentes, as espessuras podem atingir centenas de metros, (Cardoso, 2002).

Um solo tropical é produzido pela ação do intemperismo, que se reflete como um conjunto de modificações físicas e químicas, desintegração e decomposição respectivamente, que conjugadas da maneira apresentada na Figura 2.2 alteram as propriedades e estrutura do solo impactando diretamente em seu comportamento hidromecânico. Essa mudança é causada pelas ações do clima, onde as temperaturas e a água alteram o solo, com ajuda de outros fatores, como pressão. O intemperismo pode ter maior ação física ou química, de acordo as componentes de temperatura, do ar, da água e de pressão. Nos solos tropicais tem-se mais intemperismo químico, onde a ação da água é muito importante, alterando as forças internas e externas, gerando hidrólises, lixiviação, acumulação, oxidação e outros processos nos quais se alteram algumas propriedades e minerais do solo, gerando-se os solos lateríticos. Isso pode acontecer em todos os solos, sejam eles residuais ou transportados.

No processo de intemperismo de um solo qualquer atua o clima, as propriedades da rocha mãe, a topografia e o tempo, mas em um solo antigo é mais importante à alteração do clima que a alteração na origem (Santos, 1975).

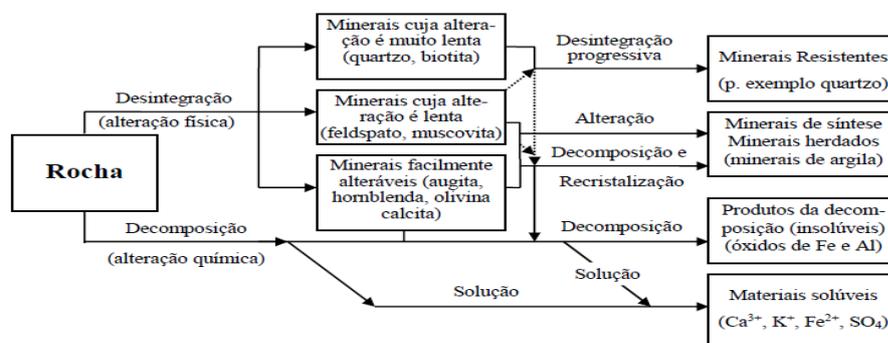


Figura 2.2 Processo alteração. (modificado - Buckman & Brady, 1960).

Nos solos tropicais, o intemperismo químico gera lixiviação dos álcalis (K, Mg, Na, Ca etc.) e ficam os componentes de Al, Fe e Si, com sedimentação dos minerais lixiviados nas camadas inferiores do solo e a alteração dos minerais que ficam, gera-se cimentações de suas partículas (grãos ou argilominerais) formando agregados, ao mesmo tempo em que podem ser gerados preenchimentos de vazios com lixiviados ou com coloides. Formam-se ainda nódulos que são parcelas microscópicas de solos menos alterados e, finalmente, novos vazios. Todas essas alterações originam solos lateríticos com formações granulares, sem orientação, com agregados unidos por pontes de argila e/ou oxi-hidroxidos de ferro e/ou alumínio, formando estrutura porosa com distribuição de poros geralmente bimodal. Assim, quanto maior o grau do intemperismo ter-se-á mais agregados podendo ocorrer floculação em ambientes com maior acidez (Santos, 1975).

Todas as características anteriores oferecem uma descrição qualitativa da composição do solo, dos minerais e de sua distribuição definida pela micromorfologia. Existe também a descrição quantitativa que avalia a orientação da partículas e grãos e se chama micromorfometria. A micromorfologia e micromorfometria não devem se separar do estudo prévio de campo, pois, elas ajudam na avaliação da porosidade, da granulometria e até de comportamentos mecânicos e hidráulicos dos solos (Cardoso, 1995).

A ação da água é muito importante nos fenômenos presentes no intemperismo dos solos tropicais, fenômenos como a oxidação, hidratação, dissolução, hidrólises, acumulação e lixiviação são os principais (Cardoso, 1995). Devido a sua importância, cada fenômeno e suas consequências devem ser compreendidos.

Dentro dos fenômenos atuantes, encontra-se a hidrólise que é a "lavagem" ou modificação de algum mineral ou de suas componentes, frequentemente, o silício. Esse mineral pode ser retirado na sua totalidade ou parcialmente, classificando-se como hidrólises total ou parcial, respectivamente. Os processos de hidrólises geram óxidos e hidróxidos que não são solúveis e se acumulam no perfil de intemperismo. Outro processo diferente é a acumulação gerada por lixiviação ou outros mecanismos. A acumulação acontece de forma relativa ou absoluta, na primeira se gera uma perda progressiva dos álcalis, o que frequentemente gera caulinita, na segunda geram-se hidróxidos de ferro com a perda total, o que origina lateritas ferruginosas como é apresentado na Figura 2.3 (Santos, 1975).



Figura 2.3 Alteração tropical (modificado de Gilkes *et al.*, 1973).

O intemperismo tropical tem ações físicas, químicas e biológicas, sendo que no Distrito Federal ela é mais de natureza química ou químico-mineralógica, produzindo maior hidrólise e acumulação relativa. A conjugação de fenômenos origina argilominerais como caulinita, gibbsita e ilita, e grandes quantidades de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou de alumínio responsáveis pela agregação, cimentação, porosidade e distribuição de poros, geralmente propiciando alta suscetibilidade ao colapso independentemente de sua origem ser residual ou transportada (Figura 2.4, Cardoso, 1995).

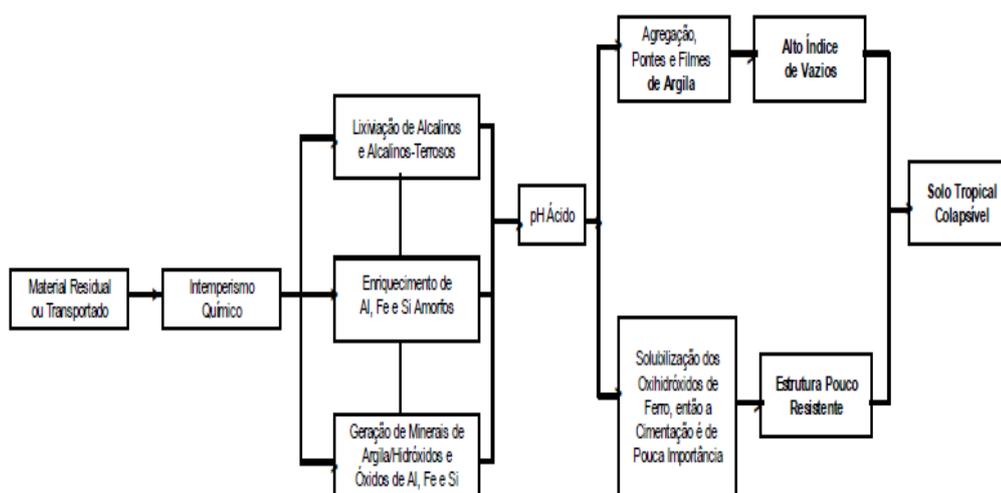


Figura 2.4 Modelo de evolução química mineralógica dos solos tropicais (Cardoso, 1995).

Em Brasília os solos profundamente intemperizados têm abundante teor de gibbsita. Estes solos por serem bem drenados são caracterizados por sofrer processos de alitização, similar a uma hidrólise, mas com perda de álcalis. Este processo é o maior gerador de agregação das partículas e das fracas ligações interestruturais nos latossolos (Guimarães, 2002).

no comportamento e na estrutura do solo. Estes óxidos e hidróxidos são geralmente componentes amorfos, abundantes, de alta agregação, que atuam como agente de cimentação, são carregados positivamente ou neutros, tem alta superfície específica, não são expansivos, não possuem plasticidade e tem pouca atividade. Sendo os mais comuns a bauxita, a gibbsita, a hematita e a goethita. Eles são pigmentos fortes que dão a cor vermelha nos solos tropicais, podendo ser amarela (Cardoso, 2002).

O solo de Brasília é resultado de climas seco-frio, seco-quente e úmido. Assim o intemperismo químico gera perda da sílica, e facilita a formação de muitos óxidos e hidróxidos, os quais são os maiores responsáveis pelas altas cimentações. Nessa alteração tem-se como resultado minerais de baixa capacidade de troca catiônica como caulinita (Otalvaro, 2013)

Aqueles solos formados ou alterados por alto intemperismo podem ter ligações fracas, mas pelos minerais mais finos podem ter cimentações fortes, onde tem que se avaliar e separar quais efeitos do comportamento se relacionam com as ligações, com a sucção e com a coesão (Guimarães, 2002).

Os solos tropicais podem ser lateríticos de intemperismo alto e médio, geralmente os latossolos, ricos em caulinita, ou de intemperismo baixo com montmorillonitas ou argilominerais de composição 2.1, com outros poucos minerais e muitos óxidos e hidróxidos. Na primeira situação, em que se apresentam os argilominerais como caulinita, são solos permeáveis, porosos e de baixa atividade, com óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio, no entanto, na segunda situação, com os minerais 2.1 reduz-se a permeabilidade e a porosidade, e aumenta-se a atividade. Podem existir solos podsolicos de média a alta atividade, com argilominerais mais instáveis, solos dispersáveis e com matéria orgânica, ou cambissolos com menos argilominerais (Olmos *et al.*, 1981).

Nos locais com longos períodos úmidos e alta temperatura é favorecida a oxidação ou hidrólise dos minerais de ferro, dando origem a solos lateríticos com caulinita e gibbsita e/ou goethita e hematita, posteriormente com maiores temperaturas alguns minerais presentes degradam-se em ilitas e cloritas, com algumas micas, como solos podsolicos. O comportamento do solo vem condicionado por esses minerais presentes e pela estrutura (Grim, 1962). A formação desses minerais é condicionada pelas condições de intemperismo (Figura 2.6).

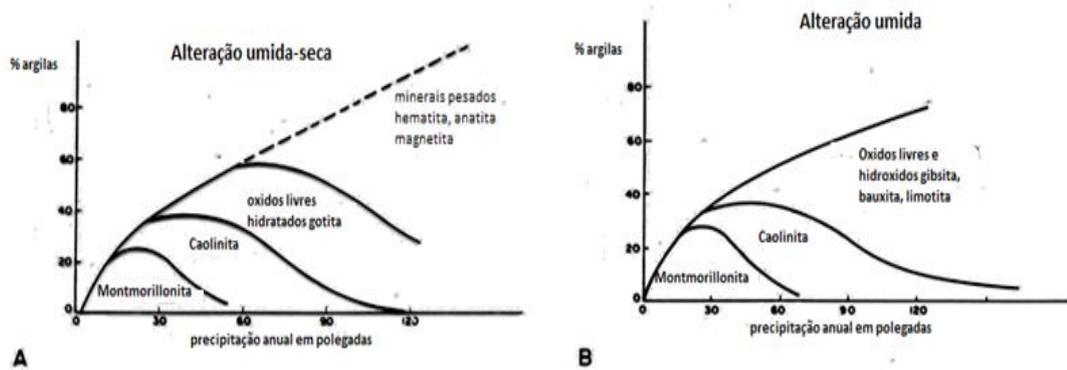


Figura 2.6. Desenvolvimento dos minerais de argila. (Modificado de Sherman, 1952).

Algumas propriedades, como plasticidade, atividade, capacidade de troca catiônica, entre outras assim como alguns comportamentos mecânicos e hidráulicos, podem se explicar pela mineralogia, onde suas variações são dependentes da concentração, tamanho e natureza dos argilominerais e das condições químicas de cada mineral. O estudo da mineralogia visa o entendimento dos solos e a redução de incertezas com a identificação dos componentes e a descrição das ações físico-químicas que governam seu comportamento. A mineralogia ajuda no entendimento dos solos coesivos, suas propriedades e variação. A ação do intemperismo que determina a formação dos minerais e condiciona a estrutura vai reduzindo com a profundidade até encontrar o saprólito e posteriormente a rocha mãe. Assim, a mudança na mineralogia é menor com a queda da alteração (Grim, 1962).

A pedogênese é um processo de alteração dos solos que transforma, além da química e física do solo, sua estrutura (Vargas, 1978).

O processo pedogenético de constituição dos solos seja ele transportado, residual, ou com outra origem, gera variação na estrutura. Com os processos de intemperismo como ações de lixiviação, cimentações e outros fenômenos que alteram o solo, vão criando-se condições de alteração física e/ou química que definem o estado final do solo e suas estruturas (Vargas, 1978).

Os finos dos solos tropicais são constituídos geralmente por argilominerais, sílica, quartzo, óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio, amorfos e outros. Os argilominerais apresentam uma frequência de concentração e de tamanho, de maior a menor, de caulinita, ilita e montmorillonita, e esses mesmos minerais apresentam plasticidade, atividade, capacidade de troca catiônica e coesão, de menor para maior na

ordem mencionada. Todas as propriedades anteriores são muito comuns nos solos tropicais, e além de permitir sua identificação, ajudam no entendimento do comportamento, (Santos, 1975; Vargas, 1978).

Geralmente se tem diferentes formas de referir-se ao solo e atribuir-lhe propriedades. Para os solos finos geralmente se fala mais da atividade e plasticidade. Skempton definiu atividade relacionando o índice de plasticidade com a concentração dos argilominerais. Os solos finos chamados de coesivos devem seu comportamento em grande parte a interações eletromagnéticas entre as partículas associando-se ao grau de atividade do solo. Coesão é a resistência ao cisalhamento na ausência de carga e atrito, com um componente de cimentação e pontes de argila dada pelos coloides depositados entre grãos, com uma componente das forças de Van der Waals, as quais são influenciadas pela água intersticial, pela distância entre grãos e pelos minerais e sua capacidade de troca catiônica e, por último, nos solos não saturados tem-se ainda a componente do efeito capilar dos meniscos de água de acordo com o grau de saturação, o que confere ao solo coesão aparente (Vargas, 1978).

Muitos dos componentes no solo que são determinantes estão condicionados pelos argilominerais presentes e pela capacidade de troca catiônica que apresentam (Vargas, 1978).

As análises que permitem um melhor estudo do solo têm diferentes escalas para cada item que tem relevância no conhecimento do solo. A macro estrutura permite avaliar o solo quanto à textura, umidade e formas. No entanto, a microestrutura permite conhecer os cristais, a estrutura, os poros e os microporos, e ainda existe um nível de nano estrutura que detalha a estrutura cristalina (Santos, 1975).

As condições do solo são oriundas da sua formação, sendo eles classificados de diferentes formas, no entanto, classificações quanto à origem, transportados ou residuais, geralmente não respondem de modo apropriado quando se trata de caracterizar as propriedades e comportamento dos solos tropicais profundamente intemperizados (Vargas, 1978).

Junto com a granulometria, as classificações podem permitir estimar que parcela do comportamento é devida à física, à química, à estrutura ou à microestrutura do solo.

Um solo granular, que é comumente de baixa atividade, possui pouca interação químico-mineralógica, possui partículas predominantemente equidimensionais e a

variação da estrutura tem relação direta com o comportamento. Diferentemente um solo fino é mais ativo, possui geralmente partículas lamelares e tem o comportamento sendo influenciado pela ação da água pela sua natureza químico-mineralógica (Olmos *et al.*, 1981).

O comportamento dos solos tropicais e não saturados tem características da mineralogia e microestrutura não quantificadas nem bem relacionadas de modo direto, o que torna preciso maiores estudos, tanto no estado natural quanto compactado, (Crispin, 2007).

Os solos tropicais por sua formação criam condições particulares quanto à física, química, mineralogia e estrutura o que os diferencia dos solos não intemperizados seja no estado natural seja quando compactados (Santos, 1975).

2.1.1 MINERALOGIA

As argilas presentes nos solos tropicais geralmente têm compostos oriundos de processos de hidrólise. Nesses solos apresentam-se quantidades variáveis de minerais não argilosos como quartzo, feldspatos e pirita entre outros. A composição dos solos argilosos é de grande influência no comportamento. Dois solos argilosos com igual composição podem ser diferentes pela organização estrutural dos minerais (Grim, 1962).

De acordo com Millot (1964), os argilominerais, óxidos e hidróxidos presentes nos solos podem ter três origens: serem herança da rocha mãe; ser oriundos da transformação de outros minerais e, neoformados a partir de diferentes reações (Cardoso, 2002).

Os argilominerais produtos da intemperização das rochas são constituídos por silicatos hidratados, alumínio, ferro e magnésio e diferenciam-se por suas estruturas cristalinas, ligações estruturais e formas das partículas. Existem sete grupos de argilominerais criados por substituições atômicas isomórficas, sendo eles compostos de oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio (Grim, 1962).

Os diferentes argilominerais presentes nos solos tropicais enquadram-se em três famílias, determinadas por sua composição formada de tetraedros e octaedros de silício e alumínio, respectivamente, com estruturas que podem ser difórmicas (1:1) um

tetraedro e um octaedro (por exemplo, a caulinita), trifórmicos (2:1) (por exemplo, a montmorillonita), ou tetrafórmicos (2:2) (por exemplo, a clorita) (Santos, 1975).

A composição dos argilominerais presentes pode ser hidratada ou desidratada, os quais, dentro de sua estrutura podem ter uma configuração referente às quantidades de octaedros que estão ocupadas em enlaces fortes, configuração dioctaédrica ou trioctaédrica, 2/3 ou completo, respectivamente. As estruturas trioctaédricas são geralmente mais estáveis. Assim mesmo, uma estrutura hidratada ou desidratada é mais estável que uma parcialmente hidratada (Grim, 1962).

De acordo com Grim (1962), tem-se estes argilominerais com estas características:

A caulinita propriamente dita pertence ao grupo da caulinita e é geralmente o argilomineral com maior presença nos solos tropicais e em estado bem cristalizado é eletricamente neutra. Sua forma é lamelar e hexagonal. É comumente estável em presença de água e seu tamanho varia entre 1 a 5 micrometros.

A halosita pertence ao grupo da caulinita (família 1:1), possui forma predominantemente tubular podendo ser esférica. Pode apresentar-se em estado hidratado ou desidratado, sendo que na forma hidratada sua desidratação é irreversível.

As micas pertencem à família 2:1 e é geralmente considerado um mineral primário. Elas podem ser segundo a origem, divididas em ígneas, metamórficas e argiláceas sendo a illita pertencente às micas argiláceas.

A clorita constitui o grupo 2:1:1 sendo formada por camadas de mica intercaladas por a brucita. Possui forma de placa e embora predominantemente estável em presença de água pode ser expansiva.

O grupo das montmorillonitas ou esmectitas pertence à família 2:1. Possuem forma variadas sendo predominantemente lamelas delgadas com alta capacidade de troca catiônica e elevada superfície específica e plasticidade sendo mineralogicamente expansivas.

A vermiculita pertence à família 2:1 e é um argilomineral expansivo.

A Paligorsquita e atapulgita são argilominerais com forma fibrosa, geralmente ausente nos solos tropicais.

Argilominerais interestratificados são aqueles constituídos pela junção de camadas pertencentes a dois ou mais argilominerais.

Óxidos e hidróxidos são componentes geralmente amorfos e com forma esférica que atuam na agregação e cimentação nos solos tropicais. Nos solos tropicais regionais é comum a presença de gibbsita, hematita e goethita.

Os solos tropicais lateríticos geralmente apresentam altos teores de óxidos e hidróxidos de alumínio e de ferro e são ricos no argilomineral caulinita. No Distrito Federal geralmente o teor de gibbsita é elevado nos três primeiros metros iniciais passando a diminuir em seguida o que proporciona uma elevação no teor de caulinita. Com o aumento da profundidade no perfil e conseqüente redução do nível de intemperização surge o grupo de argilominerais 2:1 e em seguida os minerais primários.

O nível de intemperização e laterização de um solo pode ser medido mediante o uso do coeficiente k_i apresentado por Martin & Doyné (1927) ou com o coeficiente k_r de Joachin & Kandiah, (1941), o primeiro é uma relação entre sílica e alumínio (SiO_2/Al_2O_3), enquanto o segundo é uma relação entre sílicas e sesquióxidos (Fe, Al, Ti, Mn) (Araki, 1997). Mas a melhor proposta de classificação é feita de acordo com Schellmann, (1982) que apresenta uma relação igual de sesquióxidos $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ dando importância tanto à ausência da sílica como aos óxidos e hidróxidos, que são a configuração que identifica os solos lateríticos (Cardoso, 2002).

2.1.2 MICROESTRUTURA

De acordo com Grim (1962), o principal fator que interage na definição da estrutura e em seu comportamento é a quantidade de água. Ela se apresenta em diferentes situações como, por exemplo:

- Nos poros existentes no solo e na superfície das partículas atuando como fator de agregação.
- No interior da estrutura de minerais como a vermiculita e a montmorilonita, entre as suas camadas, sendo a variação do seu teor responsável por expansões e contrações do argilomineral.
- Compondo a estrutura do mineral.

Na primeira condição a água precisa de pouca energia para ser retirada da estrutura do solo, no entanto, na segunda e especialmente na terceira se requer maior energia para sua remoção (Grim, 1962). Esse item dará ênfase à água presente no solo na primeira condição.

Essa água pode estar presente entre as partículas dos minerais nos solos pouco intemperizados e nos macroporos e nos microporos da estrutura dos solos profundamente intemperizados. A natureza dos minerais é quem define a forma com que eles interagem com a água. Nos minerais pouco ativos, como o quartzo, por exemplo, atua o fenômeno capilar, fenômeno esse eminentemente físico. Nos argilominerais geralmente predominam interações de natureza adsorviva em mecanismos com alta dependência da composição química da água e do solo e forte interferência na microestrutura e no comportamento do solo (Otalvaro, 2013).

Os limites de Atterberg refletem a interação mineral-água e como tal são função da mineralogia do solo. No entanto, nos solos tropicais profundamente intemperizados a presença dos óxidos de ferro e alumínio e a estrutura agregada como se apresentam tornam e modificam esses limites, intervindo nessa relação direta com a mineralogia, ou seja, a estrutura do solo tropical intervém nos limites de Atterberg (Grim, 1962).

A estrutura agregada dos solos tropicais intervém diretamente em sua permeabilidade encontra-se o solo em estado natural ou compactado (Grim, 1962).

Em um perfil de intemperismo a maior ou menor presença de agregados assim como sua maior ou menor estabilidade interferem diretamente na compactação dos solos e a teoria de Lambe (1958b) quanto a influência da umidade e energia de compactação na estrutura do solo compactado só prevalece para as camadas de solo pouco intemperizadas dentro do perfil de intemperismo, pois nelas as partículas encontram-se em estado independente ou formando pacotes de argila.

Ozelim *et al.* (2014), apresentam uma análise da colapsividade dos solos tropicais profundamente intemperizados em que considera a estrutura e a natureza das ligações entre os agregados um aspecto relevante para a ocorrência do fenômeno.

O estado de agregação do solo e a umidade em que ele se encontra interferem diretamente na resistência do solo como mostraram Guimarães e Cardoso (2002) ao estudarem solos tropicais do Distrito Federal.

Em todo tipo de solo a macro e a microestrutura são importantes para definir as propriedades e o comportamento do solo sendo relevante conhecer o papel de cada uma delas.

2.2 TEORIAS SOBRE COMPACTAÇÃO

Procurando um melhor desempenho das obras geotécnicas, alguns processos foram postulados no passado e estudados ao longo do tempo, apresentando as bases, características e consequências dos métodos e teorias de compactação, sendo a compactação um dos diferentes processos para melhoramento da qualidade técnica das obras feitas com emprego de solos (Vargas, 1978). Recentemente foi publicado um capítulo de livro que aborda diferentes aspectos sobre a compactação dos solos e leva em consideração a questão relativa a sucção/capilaridade (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015a).

É comum nas obras da engenharia o uso dos como solos e, dependendo das características e necessidades das obras, opta-se pelo emprego de solos finos ou granulares. Independentemente da escolha, eles serão tratados com processos que aperfeiçoam sua função e melhoram seu desempenho mecânico e/ou hidráulico. De acordo com as características requeridas ter-se-á diferentes processos para tratar cada solo, por isso, deve-se conhecer como funciona o processo, como o solo reage a ele e quais as consequências para o comportamento do solo. Deve-se conhecer o porquê de cada resultado apresentado pelo solo e como ele pode ser alterado em função de modificações nos processos e nas variáveis empregadas.

O comportamento mecânico e hidráulico dos solos encontra-se relacionado à sua estrutura, podendo esta ser dividida em macro e microestrutura. A macroestrutura diz respeito a observação do todo e a microestrutura ao arranjo estrutural dos grãos e partículas. Nos solos granulares geralmente predomina a influência da macroestrutura, enquanto nos solos finos é relevante a microestrutura. Mesmo em termos de microestrutura os poros dos solos encontram-se distribuídos em macro, meso e microporos, sendo evidente que os macroporos presentes nos solos finos não correspondem ao tamanho dos poros presentes nos solos granulares, pois nestes os poros presentes são muito maiores colocando em destaque a importância da macroestrutura (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987).

É possível conhecer e representar o solo de acordo com as condições iniciais, em função do índice de vazios e da umidade, esteja o solo em um estado natural ou compactado. Mas enquanto nos solos granulares, nos solos sedimentar e nos solos tropicais pouco intemperizados essas duas propriedades se relacionam bem com as propriedades e comportamento do solo, nos solos tropicais profundamente intemperizados elas deixam a desejar, pois o comportamento passa a ser função também da distribuição dos poros nos solos (Alonso, 2004).

De acordo com Llorent *et al.*, (2003) e Alonso(2004), a compressibilidade de um solo natural ou compactado é função da macroestrutura e microestrutura, com grande nível de ação da macroestrutura e grande nível de importância da microestrutura. Assim, a compressibilidade do solo relaciona-se aos esforços externos com reflexo na variação da macroestrutura, enquanto a ação e a variação da compressibilidade no tempo vão depender da microestrutura.

Sintetizando, a compactação define a estrutura do solo e intervém diretamente em seu comportamento hidromecânico. Destaca-se, no entanto, que o grau de intervenção da compactação na estrutura do solo depende de sua natureza e do estado em que se encontram as partículas no solo a ser compactado.

No passado, as obras que utilizaram o solo como material de construção, não o compactavam. Essas obras precisavam de grandes tempos de espera para concluir o processo de consolidação natural. Com o avanço da engenharia, nasceram técnicas para melhorar os aspectos necessários em menor tempo. Ao longo dos anos as técnicas de compactação foram evoluindo na procura de maior densidade, resistência e estabilidade para o solo. Algumas das técnicas utilizaram carregamentos estático, dinâmico ou vibratório, visando melhorar o comportamento dos solos, aplicando as diferentes metodologias e equipamentos para cada tipo de solo (Vargas, 1978). Mas os estudos indicaram a necessidade de conhecer melhor a composição e a procedência do solo para ajustar as opções de melhoramento a um processo adequado e eficiente. Como resultado da variedade de técnicas de melhoramento do solo, têm-se hoje muitas opções de configuração de estruturas, densidades e resistências, porém, a maior dificuldade é garantir qual combinação de umidade, energia e método de compactação confere a melhor configuração de estrutura, resistência e estabilidade ao sol.

A condição de maior estabilidade do solo não corresponde sempre ao estado de maior resistência, ele é aquele estado onde a resistência tem pouca variação quando se tem mudanças de variáveis como umidade e estado de tensões atuantes. As compactações no ramo seco, empregando maiores energias, comumente geram maiores resistências, mas, de acordo com a sucção/capilaridade atuante, os solos compactados nessa condição podem apresentar maior ou menor susceptibilidade a mudanças de umidade, tensões e, portanto, da estrutura. Com o aumento da umidade no ramo seco, ainda que o solo possua inicialmente alta resistência, gera-se sua redução, o que pode proporcionar a instabilidade volumétrica do solo, (Alonso, 2004).

Próctor (1933), estudando métodos de controle em novos mecanismos de compactação de barragens de terra, visando melhores propriedades mecânicas e hidráulicas, achou que para ter uma melhor densidade de um solo é preciso dar a ele uma estrutura estável. Essa condição de estabilidade é dependente da umidade no momento da compactação e do arranjo estrutural conferido ao solo.

O ensaio desenvolvido por Próctor (1933), normalizado pela American Association of State Highway and transportation Officials (AASHTO) é conhecido como ensaio de Próctor Normal ou AASHTO Standard. No Brasil foi normalizado pela norma técnica NBR 7182/86.

Verificou-se que os solos compactados também tinham seu comportamento afetado por condições salinas, orgânicas e de plasticidade. Devido a variações destas condições em configurações similares de compactação, os solos apresentavam variação nos níveis de densidade ou resistência quando compactados, e assim se criou um motivo para que se iniciassem os estudos da composição e das macro e microestruturas dos solos compactados. Outros motivos para realizar pesquisas sobre a microestrutura dos solos devem-se à necessidade de análise do comportamento hidráulico e mecânico que visavam explicar as diferenças em algumas propriedades de materiais compactados com energias iguais, mas método e umidade de compactação, distintos (Alonso, 2004).

Lambe (1958) foi um dos primeiro a falar especificamente da estrutura dos solos compactados, a partir de estudos micro óticos que revelaram a microestrutura do solo. Ele realizou a análise dos gráficos resultantes da compactação, indicando como a estrutura se alterava nos ramos seco e úmido e com a variação da energia de compactação. Ele estabeleceu para o ramo seco uma estrutura aberta e floclada,

oriunda da atuação de forças de atração entre partículas de argilominerais que são carregados positivamente nos bordos e negativamente nas faces, situação onde a interferência da água na orientação das partículas é pequena. O ramo úmido foi estabelecido como aquele de estrutura dispersa ou orientada, com disposição paralela das partículas. Em tais estruturas, devido à polaridade da água, é induzida uma alteração da carga dos minerais, cria-se uma configuração entre partículas e água, chamada de uma camada dupla, gerando uma repulsão entre grãos, que conjuntamente com forças externas, tende a gerar o paralelismo entre os argilominerais, mas esta ação não acontece ou é muito fraca no ramo seco. A Figura 2.7 apresenta a proposta de Lambe, (1958b) para a estrutura dos solos argilosos compactados.

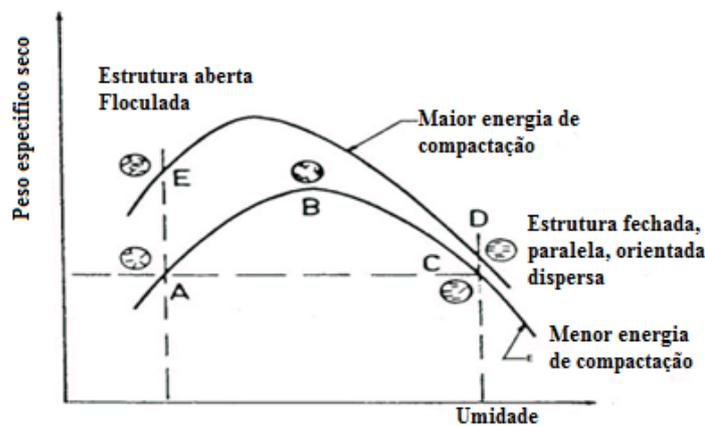


Figura 2.7 Estrutura de um solo compactado. (Modificado Lambe, 1958b).

As forças de ação que interagem definindo o comportamento do solo são geralmente: forças externas, forças de contato, forças de atração, forças de repulsão e forças capilares no caso de solo não saturados. Aquelas de contato ocorrem entre minerais, grãos ou agregados e podem se dar entre minerais, minerais e fluidos e fluido-fluido. As forças de atração e repulsão são aquelas de valência secundária descrita como forças de Van der Waals, que são forças fracas susceptíveis de serem alteradas pela mudança na força externa e pela mudança no grau de saturação ou porosidade. As forças externas são causadas por qualquer tipo de carregamento, esforço ou tensão atuante sobre o solo (Lambe, 1960).

Segundo Seed *et al.* (1960), a magnitude das forças atuantes na microestrutura dos solos compactados têm uma relação inversa ao cubo da separação entre partículas.

A compactação gera alteração na estrutura e até pode interatuar com os minerais, mas diferenças que não foram ocasionadas pelo método de compactação vêm como resultado das condições impostas na formação do solo pelo intemperismo, o que ocasiona alteração na estrutura e afeta os comportamentos mecânico e hidráulico. Essa diferença observada na estrutura, considerando a participação da mineralogia, tem relação com as condições que levam aos fenômenos de expansão ou colapso (Araki, 1997).

De acordo com o método de compactação pode-se ter diferentes comportamentos mecânico e hidráulico de um mesmo solo em função de sua composição e nível de sensibilidade ao método de compactação. Em função da umidade e da mineralogia do solo as forças atuantes têm maior ou menor influência sobre a compactação e comportamento do solo compactado.

Avaliando a compactação em termos de tensão confinante e cisalhante, (Simon, 1964), apud (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987) propõe um modelo (Figura 2.8) no qual até um determinado nível de tensão aplicado o solo deforma-se elasticamente (D1) e ultrapassado esse limite até atingir o limite D2 o solo passa pelo processo de compactação. No entanto, se o estado de tensões aplicado ultrapassar o limite D2 ocorre uma expansão do solo. Esse fenômeno ocorre com certa frequência em campo quando se aplica uma sobre compactação ao solo.

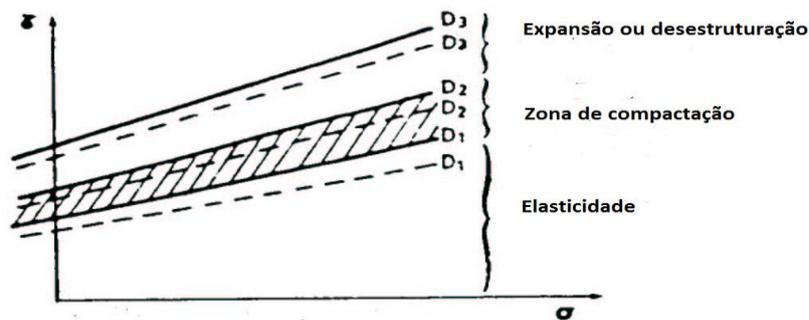


Figura 2.8. Comportamento mecânico durante compactação. (Modificado Simon, 1964).

Ampliando a proposta de Simon (1964), Camapum de Carvalho *et al.* (1987), propuseram um modelo mais abrangente, considerando um limite elástico independente da trajetória de tensões seguida e considerando o fato de que dependendo da trajetória de tensões o limite D1 não seria atingido e o solo seria compactado. Nesse modelo a linha D1 de Simon é substituída pela linha de estado limite (E. E. L) e a linha limite D2

é substituída pela linha de estado crítico do solo (D. E. C) (Figura 2.9) observa-se uma proposta na qual troca-se o limite elástico D1 por um estado limite de envoltória, e troca-se também a zona de ruptura por um estado limite crítico. Nessa figura as linhas pontilhadas indicam limites elásticos atingidos a medida que se aumenta a energia de compactação. Conhecer essa superfície limite de envoltória permite caracterizar mecanicamente o solo compactado para uma determinada energia.

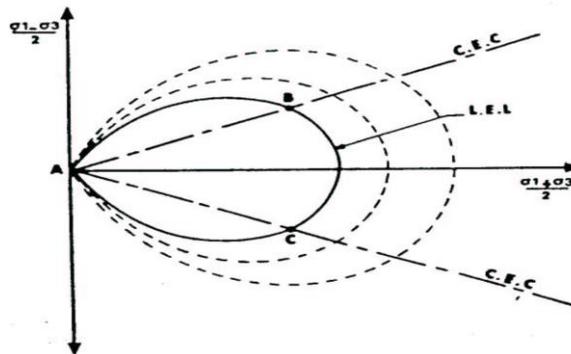


Figura 2.9. Envoltória de estado limite oriunda do processo de compactação (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987).

Pode-se concluir que, devido à complexidade do comportamento dos solos, bem como a sua variada composição, nenhuma teoria é completamente satisfatória, mas cada uma contribui na análise da compactação (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987).

2.3 ESTRUTURA E COMPORTAMENTO DE SOLOS TROPICAIS COMPACTADOS

A abordagem desse item volta-se para os solos finos. Antes de entrar na questão estrutural propriamente dita faz-se oportuno definir os limites de tamanho dos poros a serem considerados nas discussões embora não haja necessariamente, conforme apontado por Farias (2012), uma separação espacial clara e bem definida entre poros pequenos, médios e grandes.

Embora existam na literatura várias propostas de classificação dos poros quanto ao tamanho, alguns autores dividindo-os em micro e macroporos (Richards, 1965; Kiehl, 1979), e outros introduzindo entre eles uma terceira classe de poros (Luxmoore, 1981; Klein & Libardi, 2002). A título de exemplo, Klein & Libardi (2002), consideram como macroporos, os poros de diâmetro maior que 0,05 mm, como microporos poros com diâmetro entre 0,05 mm e 0,0002 mm e como criptoporos aqueles com diâmetro menor que 0,0002 mm. Outros autores além de adotarem outros limites para os

tamanhos dos poros introduzem entre os micro e macroporos os mesopores, mas os valores adotados por Klein & Libardi (2002) foram apresentados apenas para que se tenha uma ideia de faixas de tamanho de poros, pois nas discussões que se seguem quase sempre se referirá apenas a poros intra-agregados, considerados como microporos e poros interagregados, considerados como macroporos ou meso e macroporos.

A estrutura dos solos finos sedimentares e solos saprolíticos compactados tende a seguir a teoria de Lambe (1958) segundo a qual a orientação das partículas aumenta com a energia e umidade de compactação. Nesses solos o nível de anisotropia de comportamento é, portanto, diretamente relacionado às condições de compactação. Assim, solos compactados no ramo seco embora possa apresentar a mesma porosidade de um solo compactado no ramo úmido apresenta forma de poros que tende a lhe conferir comportamento isotrópico enquanto no ramo úmido o comportamento tende a ser anisotrópico. No ramo seco tem-se uma distribuição de vazios interconectados maior que aquela do ramo úmido (Diamond, 1971).

Nos solos tropicais profundamente intemperizados como a grande maioria das partículas de argila encontram-se formando os agregados praticamente não ocorre orientação de partículas, não dando assim origem a estruturas floculadas ou dispersas. Nesse caso tem-se apenas poros intra-agregados e poros interagregados, geralmente classificados respectivamente como micro e macroporos (Cetin *et al.*, 2007; Ferner & Yesiller, 2013).

Na compactação dos solos tropicais, portanto, apresenta-se uma dupla condição de distribuição de poros, interagregados e intra-agregados, de maior e menor tamanhos, definindo o que se denominará aqui de macro e microestrutura respectivamente. Os poros interagregados são compressíveis e seu volume é associado com o índice de vazios final do solo compactado. O efeito da compactação é, portanto, refletido nesses poros afetando a macroestrutura. Variações térmicas e ciclos de secagem e molhagem desses solos terminam afetando a microestrutura, nos intra-agregados e muitas vezes proporcionando o surgimento de microfissuras (Li & Zhang, 2009).

A variação volumétrica dos poros interagregados é maior em compactações maior nível de energia, enquanto a variação dos poros intra-agregados tem um comportamento quase indiferente, altamente dependente da formação do solo (Li & Zhang, 2009).

A mudança no volume total do solo se relaciona com as mudanças de volume dos poros interagregados e intra-agregados, embora esses últimos sejam quase sempre pouco afetados pelo processo de compactação (equação 2.1)

$$\Delta a_1 + \Delta a_2 = \frac{\Delta e}{\gamma_s} \quad (2.1)$$

Onde Δe é a variação do índice de vazios do estado natural ao compactado, γ_s é a massa específica dos grãos, a_1 e a_2 são as componentes de mudança volumétrica dos poros (cm^3/g) nos interagregados e intra-agregados respectivamente, levando em consideração que a variação dos poros intra-agregados é menor que 10% (Li & Zhang, 2009).

Em solos tropicais profundamente intemperizados contendo agregados pode ser assumido que o comportamento de deformação microestrutural em nível de microporos é reversível e não é afetado por estados da macroestrutura. Também esses microporos tendem a permanecerem sempre saturado. No entanto, a macroestrutura mesmo no ramo úmido da curva de compactação permanece não saturada devendo ser analisada com fundamento nas teorias de solos não saturados, (Llorent *et al.*, 2003).

Nos solos tropicais profundamente intemperizados, como já indicado, as características dos microporos são pouco ou não alteradas pela compactação (Otalvaro, 2013). Observação semelhante foi feita por Farias *et al.* (2011) e Queiroz (2015), que afirmam a dificuldade de alterar a microestrutura dos solos altamente intemperizados.

Destaca-se que enquanto os solos sedimentares e os solos saprolíticos geralmente apresentam curvas características monomodais, os solos tropicais profundamente intemperizados apresentam curvas características bimodais que tendem a monomodais à medida que se aumenta a energia de compactação e elimina-se a macroporosidade.

De acordo com Alonso *et al.* (2012), com a presença de solos altamente plásticos, pode-se ter maior variação dos microporos na estrutura do solo compactado (Queiroz, 2015).

O comportamento mecânico e hidráulico dos solos argilosos compactados guarda relação com a estrutura que possuem e com a sucção que apresentam. No ramo seco o solo apresenta-se geralmente com comportamento frágil. Nos solos sedimentares e nos solos tropicais pouco intemperizados esse comportamento se deve geralmente à

presença de estrutura flokulada e à elevada sucção/capilaridade enquanto nos solos profundamente intemperizados como praticamente inexiste a característica de floclação esse comportamento fica atrelado à sucção/capilaridade e à própria coesão atuante no solo sendo que em ambos os casos tende a prevalecer um comportamento isotrópico no solo. No ramo úmido, no primeiro caso devido à orientação das partículas de argila e à baixa sucção predomina o comportamento dúctil e anisotrópico e no segundo, apesar da ductibilidade acentuada devido à baixa sucção atuante o comportamento tende a permanecer isotrópico, (Seed *et al.*, 1960; Crispin, 2007).

A compactação ao diminuir a porosidade dos solos sedimentares e dos solos tropicais pouco intemperizados assim como os macroporos dos solos profundamente intemperizados reduz a compressibilidade do solo. Essa compressibilidade é ainda função da sucção/capilaridade presente no solo, geralmente aumentando à medida que diminui a sucção/capilaridade. Nos solos sedimentares e nos solos tropicais pouco intemperizados a compressibilidade é ainda afetada pela estrutura gerada com a compactação, (Otalvaro, 2013).

Um fenômeno comum nos solos tropicais e mesmo em solos sedimentares é o colapso. Nos solos sedimentares e nos solos tropicais pouco intemperizados o colapso geralmente ocorre quando da presença de estrutura flokulada e nos solos tropicais profundamente intemperizados quando da presença de macroporosidade ou em consequência da desestruturação dos agregados. O colapso é na maioria dos casos fruto do aumento das tensões aplicadas ou da umidade do solo que gera por consequência a redução da sucção/capilaridade. É importante salientar que o fenômeno de colapso está relacionado ao aspecto estrutural e mineralógico dos solos (Cardoso, 1995).

Quanto à expansão estrutural ela praticamente só ocorre no solos sedimentares e nos solos tropicais pouco intemperizados em consequência da redução da tensões atuantes ou da diminuição da sucção/capilaridade (Llorent *et al.*, 2003; Alonso, 2004).

A forma e a condição como se dá a compactação em laboratório é suscetível de gerar gradientes de umidade e peso específico ao longo do corpo de prova, e por consequência diferenças estruturais (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987).

Camapum de Carvalho *et al.* (1987) ao estudarem um solo calcário contendo agregados mostraram que o método de compactação interfere na estrutura e afeta o comportamento mecânico do solo. Segundo esses autores para o solo estudado a

compactação estática foi a que propiciou ao solo comportamento mecânico mais próximo daquele obtido para o solo compactado *in situ*.

Em um solo compactado, a secagem pode gerar alteração da microestrutura e do comportamento sendo comum o surgimento de trincas. Esse é um fato importante, já que alguns métodos que permitem a análise estrutural, dentre eles microscopia eletrônica de varredura (M. E.V) e a porosimetria, requerem a secagem prévia do solo. Mas além das trincas, a secagem pode ainda alterar a estrutura do solo (Diamond, 1971). Na secagem do solo gera-se uma redistribuição dos tamanhos de poros intra-agregados (Li & Zhang, 2009).

2.4 ESTRUTURA DO SOLO EM ESTADO NATURAL

Nos solos sedimentares e nos solos saprolíticos, se forem ignoradas as forças externas ao maciço, e avaliada a estrutura de acordo com as propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo e considerando-se a quantidade de água presente, observar-se-á a influência marcante da ação das forças de atração ou repulsão entre suas partículas conduzindo o solo respectivamente a uma estrutura floclada ou dispersa (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987). Quanto maior a quantidade de água mais aproxima-se o estado físico desses solos a uma estrutura dispersa considerando o carregamento próprio do solo. Nos solos tropicais, observa-se um grau de agregação elevado das partículas de argila e/ou silte oriundo do processo de formação gerando formas equidimensionais assumindo a estrutura forma simples ou alveolar como nos solos granulares. A estrutura agregada presente nos solos tropicais resultado da atuação dos mecanismos de intemperismo como hidrólise, lixiviação e cimentação.

O comportamento dos solos não saturados é fortemente influenciado pela sucção/capilaridade, e por consequência, a estrutura também o é. A ação da sucção/capilaridade sobre a estrutura dos solos sedimentares e dos solos saprolíticos pode ser entendida de maneira simplificada ao se considera que ela atua no solo como uma pressão isotrópica gerada pela água intersticial que permite a sua expansão quando ela diminui e sua contração quando ela aumenta sendo que o mecanismo de contração pode conduzir de modo semelhante a uma compactação à orientação das partículas enquanto a organização das partículas em consequência da expansão dependerá ainda do predomínio das forças de atração ou de repulsão entre as partículas, (Seed & Chan, 1959).

Nos solos tropicais profundamente intemperizados a influência das variações de sucção/capilaridade na estrutura já não é a mesma. Nesses solos as partículas de argila se encontram em duas situações compondo os agregados e/ou fazendo o elo entre eles. No primeiro caso, as variações de sucção capilaridade quanto atinge a desaturação ou a saturação dos agregados tende a intervir no volume de microporos que estes possuem com se verá nessa dissertação ao se comparar as análises feitas com o solo em estado natural e após pré-secagem. No segundo caso em que as argilas atuam como pontes entre os agregados, essas pontes podem ser rompidas proporcionando a instabilidade estrutural do solo.

Cabe ainda salientar que nos solos tropicais profundamente intemperizados a abolida expressão “solos parcialmente saturados” volta à tona, pois para sucções inferiores a correspondente à entrada de ar nos microporos estes se mantêm saturados enquanto os meso e macroporos podem se encontra em estado não saturado.

De acordo com Alonso *et al.* (2010), as considerações estudadas por Bishop (1959) e outros autores que explicaram o comportamento do solo não saturado com relação ao nível de saturação apresentam problemas para os solos finos, já que eles ainda com altos graus de saturação mantêm valores de sucção, isso devido aos componentes da sucção dos microporos e dos macroporos (Queiroz, 2015). Faz-se necessário ainda entender, que mesmo no limite de liquidez e plasticidade, situação em que o solo encontra-se saturado, existe uma sucção nele atuante.

O grau de saturação atua no comportamento hidráulico por meio da sucção, condicionando a capacidade de transporte e facilidade de deslocamento do fluido assim como as conexões da estrutura por onde ele atua. No comportamento mecânico atua em interação com outras formas de energia presentes no solo com as tensões isostáticas e induzidas. Na análise do comportamento tem-se com a desaturação condição de alta sucção na microestrutura e condições de baixa sucção na macroestrutura (Queiroz, 2015).

A água presente no solo pode estar armazenada de duas maneiras: na macroestrutura em forma de água livre, formando meniscos e como água adsorvida às partículas de argila livres e externas dos agregados e na microestrutura, geralmente como água adsorvida. A sucção nessas condições de adsorção é governada pelas ligações físico-químicas (Romero & Vanaut, 2000). Assim, pode-se concluir que o teor

de umidade do solo é o somatório de duas contribuições, da umidade macroscópica e da umidade microscópica. Este fato é bem definido nas curvas de retenção de água do solo, possibilitando ao usuário um perfeito entendimento dos limites de atuação de cada tipo de estrutura e umidade (Queiroz, 2015).

Os solos profundamente intemperizados apresentam uma distribuição de poros bimodal com macroporos interagregados e microporos intra-agregados. Entretanto, os solos menos intemperizados tem uma distribuição de poros uniforme a bem graduada (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015b)

De acordo com Alonso (2004), a distribuição de poros bimodal é característica dos solos tropicais, solos alterados com agregados de lodos, solos residuais e sedimentários, (Li & Zhang, 2009).

Na distribuição de poros bimodal de um solo tropical profundamente intemperizado apresentam-se dois pontos de pressão de entrada de ar, um correspondente aos macroporos ocorre para menores valores de sucção e o outro correspondente à entrada de ar nos microporos ocorre para maiores valores de sucção. Os valores dessa sucção de entrada de ar nos macroporos aumentam quando o solo e compactado e por consequência com a energia de compactação podendo atingir valores semelhantes aos dos microporos, momento em que a curva passa a assumir comportamento monomodal (Araki, 1997; Otalvaro, 2013).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo de revisão bibliográfica foram apresentados os conhecimentos e argumentos básicos dos temas mais importantes nesta pesquisa, tais como perfil de intemperismo na formação dos solos tropicais, sua estrutura e mineralogia. Teceu-se considerações e levantou-se informações contidas na literatura sobre a influência dos métodos e condições de compactação na estrutura, assim como os efeitos da compactação e da estrutura gerada nos comportamentos hidráulicos e mecânicos. O capítulo apresentou observações e conclusões de diferentes autores, mas também formulou entendimentos do autor a respeito dos assuntos tratados nessa dissertação encaminhando cada conceito e argumento dentro do marco conceitual da finalidade desta pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos geotécnicos podem ser conduzidos sobre amostras deformadas, indeformadas e compactadas segundo o que se pretende estudar. Por exemplo, estudos do solo voltados para a caracterização químico-mineralógica e física são geralmente realizados sobre amostras deformadas, exceto a análise da característica física estrutural do solo que é feita sobre amostra indeformada ou compactada, conforme o caso. Observa-se que exceto esse último caso relativo à estrutura, as características citadas geralmente só variam em espaço de tempo muito longo e não são alteradas com a manipulação. Já os comportamentos hidráulicos e mecânico dos solos dependem do estado em que o solo se encontra e geralmente são determinados para amostras naturais indeformadas e amostras compactadas. Diante dessas particularidades e dos objetivos da pesquisa foram coletadas amostras deformadas e indeformadas e as amostras deformadas foram compactadas, quando se objetivou a avaliação do comportamento mecânico.

Para o estudo foi importante ter os processos de coleta e preparação de amostras bem definidos, assim como os procedimentos de ensaios, de modo a permitir a análise comparativa dos resultados. No perfil de intemperismo faz-se necessário considerar profundidades representativas dos diferentes horizontes tanto para estudos sobre amostras naturais como compactadas.

Para a coleta de amostras deformadas e indeformadas realizou-se um poço com 12 m de profundidade e 1,2 m de diâmetro. Foram coletadas amostras indeformadas e deformadas nas profundidades de 2, 5, 8,60 e 11,60 m para todos os ensaios. Adicionalmente, para caracterização física e classificação foram retiradas amostras a cada metro em menores quantidades. Buscou-se realizar os ensaios a partir do solo na umidade e estados naturais, ou seja, sem secagem prévia e sem destorroamento. Análises microestruturais foram realizadas sobre amostras indeformadas e compactadas.

3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.

As amostras foram coletadas em um poço escavado de acordo com a norma ABNT NBR 9604 (1986) e as coletas realizadas segundo a norma ABNT NBR9820 (1997) para cada profundidade mencionada anteriormente. As amostras indeformadas foram tomadas de forma cúbica com dimensões de 30x30x30 cm. Elas foram parafinadas e guardadas em condições de temperatura estáveis. A norma ABNT

NBR6457 (1986), foi empregada, no que coube, na preparação das amostras para realização dos ensaios de caracterização e compactação. A principal ressalva que se faz é que os solos não se submeteram à secagem prévia até atingir a umidade higroscópica nem tão pouco até atingir umidades 3% ou 5% abaixo da umidade ótima presumida. Considerou-se a umidade natural e as secagens quando feitas se limitaram às necessidades dos ensaios.

Os ensaios de compactação foram realizados sem reuso da amostra.

As amostras indeformadas foram, após remoção de cada bloco, cobertas com parafina, envolvidas em tecido e filme plástico e novamente parafinadas. Foram então colocadas em caixas de madeira e transportadas para a câmara úmida.

As amostras deformadas foram coletadas colocando-se 32 kg de amostra em sacos plásticos duplos de 40x80 cm. Os sacos contendo as amostra eram logo após as coletas, etiquetados e hermeticamente fechados para preservar as umidades naturais. Em seguida as amostras eram conservadas em câmara úmida no laboratório de geotecnia. Foram coletadas 5 amostras de 32 kg em cada uma das 4 profundidades definidas para estudo.

Cabe destacar que a conservação tanto das amostras deformadas como das indeformadas em câmara úmida se deu mais em função da estabilidade de temperatura, pois como ambas as amostras encontravam-se isoladas da condição atmosférica externa a câmara ser úmida ou não era irrelevante.

O poço e amostragens foram realizados do dia 6/04/2015 ao dia 10/04/2015, portanto, ao final do período chuvoso, embora apenas em um dia verificou-se a ocorrência de precipitação, interrompendo-se, por uma questão de segurança, a escavação. A Figura 3.1 ilustra um bloco de amostra indeformada talhado no fundo do poço.



Figura 3.1 Preparação de um bloco indeformado no fundo do poço.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização foram realizados objetivando a classificação dos solos segundo metodologias e teorias existentes. Eles permitem ainda avaliar as alterações de propriedades ao longo do perfil de intemperismo. Foram realizados ensaios de limites de Atterberg, granulometria com e sem o uso de defloculante e massa específica.

Excetuando-se o fato das amostras não terem sido submetidas à secagem prévia, o ensaio de limite de liquidez foi realizado segundo a ABNT NBR6459 (1984), o ensaio de limite de plasticidade segundo a ABNT NBR7180 (1984), o de massa específica foi realizado utilizando-se o pentapicnômetro, a análise granulométrica foi realizada segundo a norma ABNT NBR7181 (1984), pelo peneiramento necessário e por sedimentação com e sem o uso de defloculante. Os teores de umidade foram determinados segundo a ABNT NBR6457 (1986). A mineralogia das amostras foi obtida de Carvalho (1995) apud Guimarães (2002).

3.2.1 LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Como já indicado, esse ensaio seguiu, no que coube, a norma ABNT NBR6457 (1986) sendo preparados por amostra aproximadamente 200 g de solo passando na peneira #40 (0,42 mm de abertura de malha). As amostras não foram submetidas à secagem prévia. Cada amostra do solo foi destorroada manualmente e posteriormente agregou-se água ou se secou parcialmente o solo de acordo com a necessidade do ensaio. Os limite de liquidez e os limite de plasticidade foram determinados, no que coube, de acordo com as normas ABNT NBR6459 (1984) e ABNT NBR7180 (1984) respectivamente.

Posteriormente aos ensaios foi realizado o cálculo do índice de plasticidade I_p (Equação 3.1),

$$I_p = Ll - Lp \quad (3.1)$$

Ll é o limite de liquidez e Lp é o limite plástico.

Conhecidos os índices de plasticidade e determinadas as curvas granulométricas determinou-se o índice de atividade de Skempton dado pelo relação entre o índice de plasticidade e a porcentagem de argila ($<2 \mu m$) considerando-se a fração que passa na peneira #200 (Equação 3.2).

$$Ia = \frac{Ip}{\%<2\mu m} \quad (3.2)$$

O solo foi classificado segundo os limites a seguir:

- $Ia < 0,75$ = solos inativos;
- $0,75 < Ia < 1,25$ = solos de atividade normal;
- $Ia > 1,25$ = solos ativos.

No processo de caracterização do perfil de solo tropical estudado determinou-se ainda o índice de vazios (e) por meio da Equação 3.3.

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (3.3)$$

Na equação 3.3 γ_s é o peso específico dos grãos, e γ_d peso específico aparente seco do solo.

A porosidade (n) foi determinada de acordo com a Equação 3.4.

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (3.4)$$

O grau de saturação (S_r), foi determinado a partir da Equação 3.5.

$$S_r = \frac{\gamma_s w}{e \gamma_w} \quad (3.5)$$

γ_w é o peso específico da água e w a umidade do solo.

Outros índices que podem ajudar na ideia de classificação do solo além de geralmente relacionar-se ao comportamento são o índice de liquidez (Equação 3.6) e o índice de consistência (Equação 3.7).

$$I_l = (\omega n - L_p) / I_p \quad (3.6)$$

$$I_c = (L_l - \omega n) / I_p \quad (3.7)$$

Onde ωn é a umidade natural do solo em campo.

- $I_c < 0,50$ = consistência plástica mole;
- $I_c = 0,50$ a $0,75$ = consistência plástica média;
- $I_c = 0,75$ a $1,00$ = consistência plástica rija;
- $I_c > 1,00$ = consistência dura.

Estes índices de liquidez e consistência representam um indicativo da condição de resistência ou comportamento do solo no estado natural caso este sofra perturbação estrutural. Ao relacionar os limites de Atterberg com a sua umidade natural verifica-se se o solo encontra-se no campo em condição moldável ($Il > 1$) ou não moldável ($Il < 1$) ou ainda em uma condição potencial fluídica (Ic positivo) ou não fluídica (Ic negativo). O índice de consistência é particularmente relevante, pois permite antever corridas de lama quando da ruptura do maciço por saturação (Ic positivo).

3.2.2 PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS γ_s

O peso específico dos grãos foi determinado por meio do pentapicnômetro utilizando-se 70 gramas de solo passando na peneira com abertura de #4 (4,8 mm). As amostras de solo de cada profundidade foram nesse ensaio excepcionalmente submetidas à secagem prévia ao ar e em estufa por 24 h e ao destorroamento para serem submetidas ao ensaio (Figura 3.2).

O pentapicnômetro é um equipamento de última geração que utiliza gás para medir a densidade verdadeira e volume de vários materiais como: pó, catalisadores, cerâmica, carvão, materiais de construção, etc., que apresentem uma granulometria em partículas. Existem diferentes modelos, mas o utilizado nesta pesquisa foi o Pentapyc 5200E (Chrusciak, 2011).

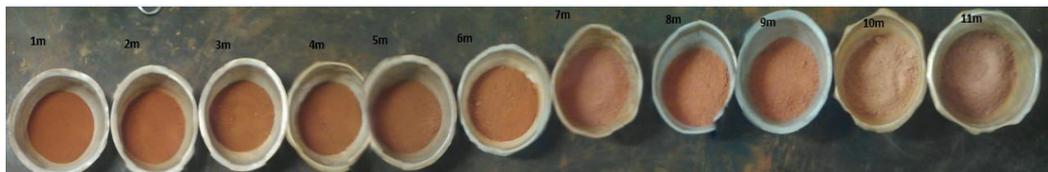


Figura 3.2 Amostras para massa específica dos grãos.

O pentapyc 5200E funciona da seguinte forma: pode ser carregado por até cinco amostras e, em seguida, as capsulas internas são preenchidas simultaneamente em todo o seu volume por gás Hélio. Cada uma das cinco amostras é então analisada e automaticamente são geradas leituras para cada célula e cada processo de preenchimento de gás, sem o envolvimento do operador. Para realização do ensaio, para cada amostra, é possível a utilização de três tipos diferentes de cápsulas internas com diferentes tamanhos. O tamanho é escolhido de acordo com o tamanho da amostra (pequeno, médio e grande) (Chrusciak, 2011).



Figura 3.3 Pentapicnômetro modelo pentapyc 5200E (Chrusciak, 2011).

3.2.3 MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA γ_d

Durante o processo de coleta das amostras, tomaram-se blocos indeformados de 10 cm de aresta, para cada metro do poço. Esses blocos foram fracionados em três com aproximadamente o mesmo tamanho (Figura 3.4) e submetidos ao ensaio de massa específica aparente pelo método da balança hidrostática, ou método da parafina.

Seguiu-se no ensaio a norma brasileira ABNT NBR1038 (1988), para determinar as massas específicas naturais e aparentes secas dos solos compondo o perfil de intemperismo (Figura 3.3). As umidades utilizadas na determinação da massa específica aparente seca foram determinadas a partir do anexo da norma brasileira ABNT NBR6457, (1986).



Figura 3.4 Amostras para balança hidrostática.

3.2.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Para a realização das análises granulométricas tomou-se a quantidade de solo estipulada na norma brasileira ABNT NBR6457 (1986) e realizou-se o ensaio conforme a norma ABNT NBR7181 (1984), fazendo uso das peneiras de 1 polegada até #200 para os peneiramentos grosso e fino (Figura 3.5). No presente ensaio não se deixou secar o solo completamente, mas para maior facilidade na realização do ensaio fez-se uma secagem ao ar, com o fim de reduzir um pouco as umidades para facilitar os

peneiramentos realizados posteriormente. O destorroamento do solo foi feito manualmente de modo a preservar ao máximo a integridade de formações estáveis (Figura 3.6). Essa desagregação de torrões foi efetivada em duas etapas. Primeiro destorroou-se e peneirou-se o solo, em seguida destorroaram-se novamente as frações retidas e repetiu-se o peneiramento.

O peneiramento fino realizado sobre o material que passou na peneira de malha #10 foi feito compreendendo as peneiras número #16 à #200. Destaca-se que este material foi aquele empregado para granulometria por sedimentação. Antes do peneiramento o material foi lavado na peneira #200 logo após o ensaio de sedimentação. O material retido na peneira #200 foi seco na estufa por 24 horas e em seguida peneirado. Considerando que o peneiramento grosso é feito sem que o solo se submeta à ação de defloculante como ocorre no peneiramento fino, os ensaios foram realizados apenas sobre amostras não submetidas à ação de defloculante. Já no peneiramento fino, feito depois da sedimentação, optou-se por analisar amostras submetidas e não submetidas aos efeitos do defloculante. Os cálculos foram feitos de acordo com as equações da norma ABNT NBR7181 (1984).



Figura 3.5 Peneiramento grosso e fino.

Para o ensaio de sedimentação tomou-se aproximadamente 70 g de solo que passa na peneira número 10 (2 mm) e seguindo o processo estipulado pela norma brasileira ABNT NBR7181 (1984) realizou-se para cada profundidade ensaio com e sem o uso de defloculante, (Figura 3.7). Os cálculos das percentagens e dos diâmetros das partículas foram feitos em documentos de Excel usando as equações indicadas na norma.



Figura 3.6 Amostras destorroadas manualmente para peneiramento.



Figura 3.7 Ensaio de sedimentação com e sem defloculante.

3.2.5 CLASSIFICAÇÃO

O comportamento de um solo é, geralmente, relacionado com sua granulometria e plasticidade, e grande parte das classificações se fundamentam nessas propriedades. Algumas classificações são baseadas só na granulometria, outras juntam granulometria e valores dos limites de Atterberg e algumas outras são feitas apenas em função destes últimos. Existem ainda métodos de classificação como o MCT que se fundamentam no comportamento para classificar o solo. Cada método deve ser analisado de acordo com os seus fundamentos, finalidade e os tipos de solos em que são aplicáveis.

Para efeito de comparação realizou-se a classificação metro a metro de todo o perfil de solo por três métodos distintos, um aplicado aos solos tropicais, chamado de: miniatura, compactado, tropical, (MCT) e dois desenvolvidos a partir de estudos realizados para solos provenientes de regiões temperadas, Unified Soil Classification System - USCS (SUCS) e American Association of State Highway Officials (AASHTO), estes dois últimos com grande reconhecimento internacional e o primeiro muito usado em projetos rodoviários no estado de São Paulo.

Os sistemas de classificação SUCS e AASHTO se fundamentam em análises da granulometria e dos limites de Attemberg.

Existem dois sistemas de classificação MCT, o convencional e o MCT expedito. Nessa pesquisa optou-se pelo uso do método expedito. Esse método se fundamenta na contração (ct) que se relaciona ao coeficiente de contração (c'), equação 3.8 e equação 3.9 e na penetração de uma agulha padrão no solo (pn). A classificação é feita a partir da Figura 3.8 tomada de Nogami & Villibor, (1994). Para melhor entendimento considerou-se a informação de Cozzolino & Nogami, (1993) que ajuda no entendimento da avaliação dos solos tropicais e como as variáveis do método MCT permitem caracterizar melhor estes solos.

$$c' = (\log_{10} ct + 1) / 0,904 \quad (3.8)$$

$$c' = (\log_{10} ct + 0,7) / 0,5 \quad (3.9)$$

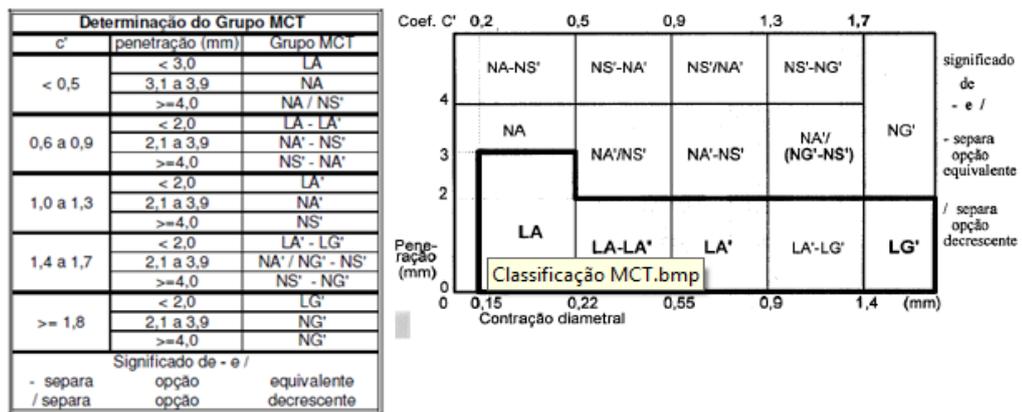


Figura 3.8 Grupos e parâmetros de classificação MCT expedita (Nogami & Villibor, 1994).

Nesse sistema de classificação tem-se: NA - Areia não laterítica, NA' – Solo arenoso não laterítico, NS' – Solo siltoso não laterítico, NG - Argila não laterítica, LA - Areia laterítica, LA' – Solo arenoso laterítico e LG' – Solo argiloso laterítico.

3.3 MINERALOGIA

Os resultados mineralógicos foram obtidos por Carvalho (1995) por meio de difração de raios X. Complementarmente foram realizados gráficos EDS (Espectrômetro de Energia Dispersiva) durante as análises no microscópio de varredura (item 3.5) de modo a se ter um melhor entendimento da composição do solo.

3.4 COMPACTAÇÃO

Dependendo do solo seu arranjo estrutural após compactação terá maior ou menor dependência e influencia do método, energia e umidade utilizadas. Como o solo muda ao longo do perfil de intemperismo optou-se por avaliar nessa pesquisa a influência do método, energia e umidade de compactação na estrutura e comportamento do solo para as quatro profundidades estudadas (2, 5, 8,6 e 11,6 m). Para avaliar o impacto de cada técnica de compactação na microestrutura do solo fez-se também análises microestruturais do solo em estado natural. Em termos de método utilizou-se a compactação dinâmica tipo Proctor sendo que para a determinação das curvas características ela foi substituída pelo método de compactação MCV, e a compactação semi-estática, também conhecida como compactação estática, por meio de um prensa axial impondo-se ao solo uma taxa de deformação constante. Como energia foram utilizadas a normal, intermediária e modificada.

No método semi-estático buscou-se, utilizando-se umidades semelhantes às das curvas de compactação dinâmica, reproduzir o peso específico fornecido pela compactação dinâmica de modo a se avaliar apenas a influência do método adotado na microestrutura e no comportamento. Em relação à umidade, embora obtendo-se as curvas de compactação completas para os dois métodos nas três energias, normal, intermediária e modificada, nos estudos mais detalhados como resistência e análise microestrutural limitou-se as análises à umidade ótima, ótima mais 2% e ótima menos 2%.

3.4.1 COMPACTAÇÃO DINÂMICA

Determinou-se as curvas de compactação dinâmica tipo Proctor para as energias normal, intermediária e modificada segundo a ABNT NBR7182 (1986). As amostras foram compactadas com solos provenientes das profundidades 2 m, 5 m, 8,6 m e 11,6 m. Todos os corpos de prova compactados foram pesados e medidos e em seguida cobertos com filme plástico, etiquetados e guardados na câmara úmida até serem utilizados nos demais ensaios de compressão simples.

Na compactação usou-se o cilindro pequeno ($D = 10$ cm, $h=12,5$ cm), e o solo foi compactado em três camadas nas três energias incluindo, portanto, o Proctor modificado, o que altera a previsão de norma indicada na Tabela 3.2, e requer o cálculo do número de golpes necessários. Empregaram-se apenas três camadas para garantir

uniformidade e as mesmas condições de espessura para distribuição da energia de compactação, de modo a permitir melhor comparação dos resultados. A Tabela 3.2 apresenta as características dos equipamentos e variáveis adotadas nas compactações dinâmicas.

Tabela 3.1 Propriedades para a compactação segundo a ABNT NBR7182 (1986).

Cilindro	Características de cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	pequeno	grande	grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	grande	grande	grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182/86.

Nesta pesquisa foi usado o soquete pequeno na energia Proctor normal e o grande nas demais energias. Na energia Proctor modificado o ajuste do número de golpes considerando-se o fato de empregar cilindro pequeno e três camadas, foi feito usando-se a equação 3.10. Como resultado o número de golpes na energia modificada foi 44 para um peso de 4,5 kg do soquete, adotando-se uma altura de queda de 45 cm.

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V} \quad (3.10)$$

Onde: P - peso soquete, h – altura de queda, N - número de golpes por camada, n – número de camadas e V - volume do cilindro.

Para definição das curvas de compactação, compactou-se o solo com no mínimo cinco umidades distintas para cada energia, sendo admitido um mínimo de dois pontos em cada ramo da curva de compactação.

Destaca-se que todas as compactações foram, por precaução, realizadas utilizando-se o solo a partir da umidade natural e destorroado manualmente de modo a perturbar o menos possível as agregações naturais existentes. Caitano Pessoa (2012) mostra que a secagem prévia pode alterar significativamente a curva de compactação de alguns solos pela alteração na estrutura e interação da água com as partículas modificando a sucção e/ou capilaridade.

Durante o processo de compactação dinâmica observou-se em especial para os solos mais plásticos, algumas formações de trincas quando compactados com maior

energia ou quando retirados do cilindro. Também foram visíveis tais trincas no centro do corpo compactado dinamicamente na energia modificada. Estas trincas podem interferir e afetar o comportamento do solo, como se menciona e se vê nas análises e observação de imagens.

3.4.2 COMPACTAÇÃO SEMI-ESTÁTICA

Determinadas as curvas de compactação dinâmica foram definidos os pontos referentes à umidade ótima para servirem como referencia. Em seguida, definiu-se os pontos para a compactação estática adotando-se para tal a umidade ótima, a umidade ótima – 2% e a umidade ótima + 2% nas três energias de compactação.

A compactação semi-estática foi realizada em uma prensa usada para ensaio CBR com adaptação no pistão para 10 cm de diâmetro e adotando-se uma velocidade de um milímetro por minuto. Usou-se o cilindro Proctor pequeno obtendo-se os corpos de prova mostrados na Figura 3.9, similares em dimensão aos obtidos na compactação dinâmica, ou seja, 10 cm de diâmetro por 12,5 cm de altura. A compactação foi realizada, como na compactação dinâmica, em três camadas.

A compactação semi-estática foi realizada reproduzindo a curva de compactação dinâmica, não ocorrendo assim, a compactação dos solos para uma determinada energia. O controle de compactação foi realizado com base em pesos específicos e umidades pré-fixados, controlando-se a altura das camadas.

Após terminar todas as curvas de compactação estáticas realizou-se a moldagem dos corpos que seriam empregados em ensaios de resistência à compressão simples, configurando-os nas dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, cumprindo assim com a relação 2:1 recomendada pela norma do ensaio de compressão simples.



Figura 3.9 Corpos de prova compactados.

3.5 MICROSCOPIA

A microestrutura do solo foi analisada por meio de duas técnicas, usando-se lupas óticas com aumentos de 50, 100, 200 e 400 vezes, e microscopia eletrônica de varredura (MEV), com ampliações de 100, 200, 500, 1000, 3000, 5000, 10000 e 20000 vezes. Foram feitas imagens do solo nas condições compactadas e no estado natural. Nas análises das imagens tanto da lupa ótica como do MEV sobre o solo compactado, centraram-se as observações na umidade ótima, umidade ótima mais 2% e umidade ótima menos 2% das três energias de compactação: normal, intermediária e modificada.

A observação na lupa ótica foi realizada para todo o perfil de solo em estado natural, e para as condições já indicadas de compactação, excetuando-se o aumento de 400 vezes para as amostras compactadas. Embora as análises realizadas com MEV fossem feitas nas mesmas classes de amostras, a comparação não se realizou entre os métodos de observação, já que na lupa é possível analisar amostras úmidas e no MEV faz-se necessária a desidratação das amostras o que permite análises complementares, apesar do risco de contração do solo.

Na observação feita com a lupa ótica foi possível observar e comparar qualitativamente relações de densidade, estrutura, poros e textura do solo. Realizaram-se análises destas variáveis ao longo do perfil.

No MEV, visou-se comparar as microestruturas, os poros em dimensões macro e micro, a influência dos componentes, como minerais e argilominerais formando agregados, pacotes de argila e presentes de modo isolado, suas formas, e o arranjo estrutural.

As imagens de MEV foram na maioria obtidas no campus número dois da Universidade Federal de Goiás (UFG) em Goiânia, no laboratório multiusuário de microscopia de alta resolução, LabMic, no Instituto de Física, o microscópio usado foi um Jeol, JSM – 6610, equipado com EDS, Thermo scientific NSS Spectral Imaging. Alguns ensaios sobre amostras oriundas de maiores profundidades foram realizados no laboratório do Centro Técnico de Engenharia Civil, Eletrobrás Furnas (FURNAS) Centrais Elétrica S.A. em Goiânia.

A preparação das amostras para as observações no MEV passaram por diferentes etapas, iniciando-se no Laboratório de Geotécnia da UnB com o corte manual dos corpos de prova naturais e compactados (Figura 3.10 A). Posteriormente, ainda na UnB,

essas amostras foram congeladas por nitrogênio líquido e colocadas em câmara de vácuo com 60 Psi de pressão e 60 °C de temperatura por 16 horas (Figura 3.10 B), fazendo-se assim a liofilização da amostra com remoção da água passando diretamente do estado sólido (congelado) ao gasoso.

O processo de liofilização visa à secagem completa do solo sem alteração da estrutura, já que, para o MEV, a presença de água altera os resultados no equipamento utilizado e inviabiliza a metalização necessária à observação. Posteriormente, os corpos de prova foram isolados em cápsulas plásticas na seguinte configuração: sílica, algodão, amostras e algodão. Nos laboratórios em Goiânia as amostras foram metalizadas com ouro em câmara de vácuo (Figura 3.11 e Figura 3.12 A). Ao final foram analisadas no MEV (Figura 3.12 B).



Figura 3.10 A) Amostras naturais e compactadas; B) estufa com vácuo.

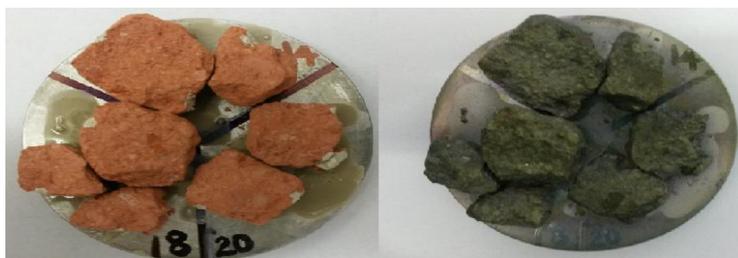


Figura 3.11 Preparação e metalização das amostras para MEV.

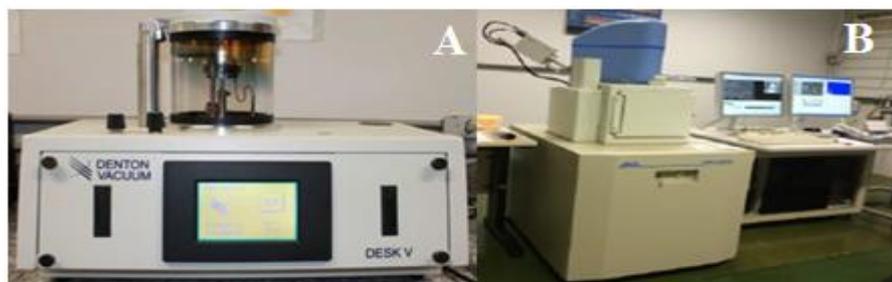


Figura 3.12 A) Camará de vácuo para metalização; B) microscópio eletrônico de varredura.

As imagens obtidas na lupa ótica e no MEV foram analisadas qualitativamente no aspecto macro e quantitativamente, de modo estimativo, no aspecto micro.

As análises qualitativas definidas como componente macro da estrutura do solo servem para avaliações da distribuição de poros, observação da conectividade entre eles e entre os grãos, análise textural e de homogeneidade entre outros fatores estimáveis visualmente. Para isso, empregaram-se as imagens das lupas óticas e os menores aumentos do MEV.

As análises semiquantitativas foram realizadas utilizando-se o programa Imagej com livre acesso na internet. Esse programa permite observar as áreas e magnitudes de determinadas componentes de uma imagem. No presente estudo observaram-se as áreas de vazios, distinguidas pela cor preta e ausência de brilho, característica que se faz presente nos minerais. Estimaram-se então diâmetros médios dos vazios e a quantidade deles. Analisaram-se ainda as partículas e suas condições de agregação, empacotamento ou orientações, de acordo com as amostras e profundidade de amostragem. A Figura 3.13 exemplifica as análises das imagens com medições de porosidade.

O programa Imagej trabalha com diferentes tipos de imagens importadas para o programa, que podem ser modificadas para 8 byte, 16 byte, 32 byte, RGB-cor e diferentes frequências de cor e canais, além de permitir a separação de imagens coloridas, para as quais se estabelecem ramos dos tons que são objeto de estudo e seleção. É possível após a seleção dos objetivos, neste caso os poros, realizar a contagem e medição dos mesmos. Seria possível ainda realizar a contagem das partículas, mas pela condição agregada presente nos solos tropicais profundamente intemperizados e a ocorrência de partículas sobrepostas e em pacotes nos solos tropicais pouco intemperizados, a aplicação do programa perderia, no caso, em exatidão.

Dentro da contagem de poros é possível gerar uma divisão e estabelecer os limites de contato e união dos mesmos, mas se observou que ao realizar esse processo o programa dividia muitos poros que estavam intra-agregados devido a sua fina ligação, o que fez com que não se estabelecesse essa divisão.

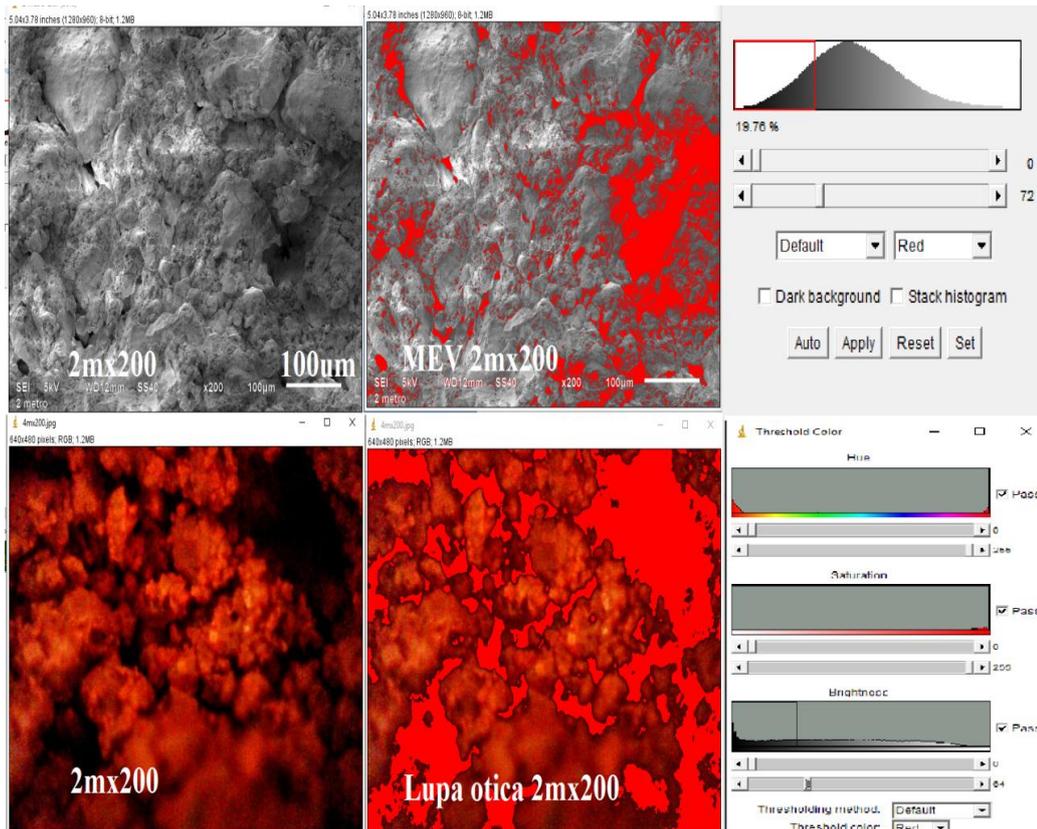


Figura 3.13 Análises semiquantitativos no software Imagej das imagens obtidas na lupa ótica e no MEV.

Posteriormente às análises realizadas da quantidade de poros, assim como de seus tamanhos, realizou-se uma seleção da porosidade total a qual foi analisada obtendo-se a quantidade de poros e suas magnitudes. Com os resultados obtidos realizou-se a análise da distribuição de frequências dos poros.

A análise foi realizada utilizando-se as imagens obtidas por meio do MEV para diferentes ampliações avaliando-se as variações dos macroporos e microporos ocorridas entre os solos no estado natural e compactado. O processo de análise consistiu em se realizar a partir das imagens o cálculo das áreas de poros, onde o software mede os diferentes tamanhos e determina as quantidades. Com a imagem em micrometros, realiza-se uma filtragem dos poros visíveis e, por último, com o mesmo programa utilizado, faz-se a contagem dos poros de cada faixa de tamanho especificada (Figura 3.14).

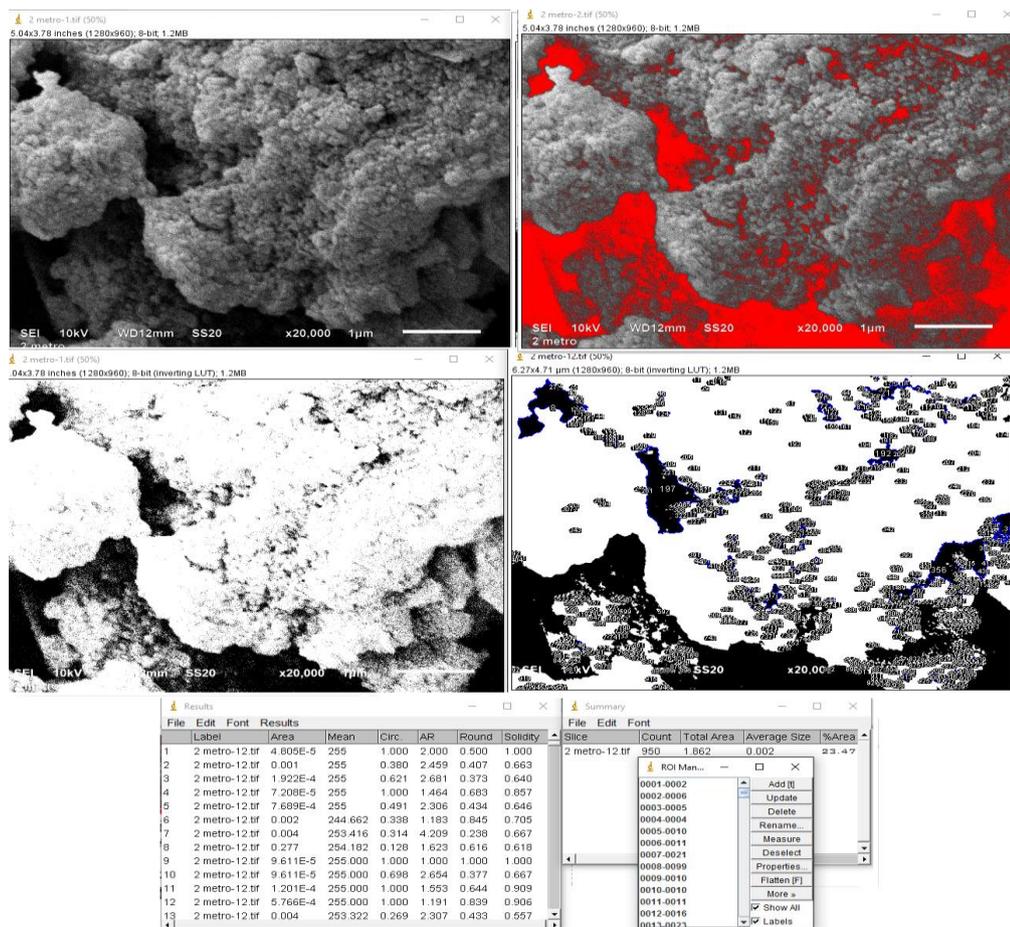


Figura 3.14 Processo de medição e contagem de poros.

Posteriormente exporta-se as tabelas dos resultados quantificados para o Excel e se calcula a frequência com que cada tamanho de poro se apresenta na imagem estudada, (Tabela 3.2). Para determinar a distribuição de poros considera-se as quantidades de poros e suas respectivas dimensões, com suas frequências e distribuições determinadas dentro dos intervalos de poros pré-estabelecidos. Os intervalos de poros foram determinados considerando as dimensões de referência da revisão bibliográfica. Assim, foram considerados microporos aqueles menores que 50 μm e macroporos os maiores que esse limite. Dentro da distribuição dos microporos, considerou-se aqueles que poderiam estar interagregados como os poros maiores que 3 μm e os intra-agregados os poros menores que 0,6 μm .

Tabela 3.2 Exemplo das tabelas de distribuição de frequências na distribuição de poros.

2mx100		Distribuição de frequências dos poros				2PNWopx100		Distribuição de frequências dos poros			
intervalo		fi	Fi	ni	Ni	intervalo		fi	Fi	ni	Ni
0,001	0,36	0	0	0,00%	0,00%	0,001	0,36	0	0	0,00%	0,00%
0,36	0,6	0	0	0,00%	0,00%	0,36	0,6	0	0	0,00%	0,00%
0,6	3	73	73	10,24%	10,24%	0,6	3	94	94	12,97%	12,97%
3	9	79	152	11,08%	21,32%	3	9	143	237	19,72%	32,69%
9	50	252	404	35,34%	56,66%	9	50	303	540	41,79%	74,48%
50	90633,85	309	713	43,34%	100,00%	50	20683,05	185	725	25,52%	100,00%

2Natx10000		Distribuição de frequências dos poros				2PNWopx10000		Distribuição de frequências dos poros			
intervalo		fi	Fi	ni	Ni	intervalo		fi	Fi	ni	Ni
0,001	0,36	510	510	81,60%	81,60%	0,001	0,36	1337	1337	78,51%	78,51%
0,36	0,6	61	571	9,76%	91,36%	0,36	0,6	155	1492	9,10%	87,61%
0,6	3	50	621	8,00%	99,36%	0,6	3	211	1703	12,39%	100,00%
3	9	2	623	0,32%	99,68%	3	9	0	1703	0,00%	100,00%
9	50	2	625	0,32%	100,00%	9	50	0	1703	0,00%	100,00%
50	2500	0	625	0,00%	100,00%	50	2500	0	1703	0,00%	100,00%

Nessa tabela, fi é a frequência, Fi a frequência acumulada, ni frequência relativa e Ni frequência relativa acumulada. O valor chamado de total é o número de poros contabilizados nessa distribuição.

Com base nas dimensões estabelecidas para os poros, ao se avaliar as áreas, considerou-se o comprimento ao quadrado, assemelhando o arranjo de poros ao formato quadrado. Essa é uma simplificação, pois como se sabe as formas dos poros são variadas.

Estabeleceu-se como intervalos de área dos poros: microporos intra-agregados de $0,001 \mu\text{m}^2$ até $0,36 \mu\text{m}^2$ e $0,36 \mu\text{m}^2$ até $0,6 \mu\text{m}^2$, poros interagregados com microporos de $0,6 \mu\text{m}^2$ até $3 \mu\text{m}^2$ e de $3 \mu\text{m}^2$ a $9 \mu\text{m}^2$, mesoporos de $9 \mu\text{m}^2$ até $50 \mu\text{m}^2$ e os macroporos com $50 \mu\text{m}^2$ ou mais.

Após a obtenção da tabela de frequências dos poros (Tabela 3.2), elaborou-se os gráficos de barras com os percentuais de macroporos e microporos de modo a possibilitar a análise comparativa entre as diferentes situações e se ter uma melhor percepção da distribuição global dos poros no solo. Cabe lembrar que como não se trata exatamente da mesma amostra certa diferença nos tamanhos e distribuição de poros deve ocorrer entre as diferentes amostras analisadas para uma mesma profundidade.

Dentro do processo realizado conforme inicialmente previsto, as quantidades de poros eram excessivamente grandes impondo-se a definição de um filtro com um limite inferior de tamanho de poro. Adotou-se para esse filtro o limite inferior de 0,001

micrometros e ainda assim, chegou-se para o estado compactado a mais de 7000 microporos nas amostras analisadas.

3.6 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Com o propósito de conhecer a variação da sucção atuante no solo determinaram-se as curvas características para o solo compactado estaticamente na condição ótima nas três energias e para efeito de comparação, realizaram-se curvas características na energia intermediária pelo método dinâmico. Ainda para efeito de comparação determinou-se as curvas características para o solo em estado natural coletado nas quatro profundidades estudadas. A comparação tem sua importância atrelada à questão das variações de porosidade e estruturais entre as amostras analisadas.

Em todos os casos, as curvas características foram obtidas para trajetórias mistas nas quais os solos naturais e compactados eram submetidos ao umedecimento ou secagem conforme o grau de saturação que se buscava para compor as curvas. Com essa técnica não aparece o fenômeno da histerese, pois ocorre uma graduação desse efeito entre as curvas que se obteria por secagem e por umedecimento. A trajetória mista dá resultados mais compatíveis com o que ocorre no campo. Muitos pesquisadores como Gon (2011) concentram seus estudos avaliando as modificações produzidas nas curvas características pela histerese. Este autor observou variação entre as curvas, mas assinalou que ela é baixa e que reduz com a profundidade.

Empregou-se a técnica do papel filtro na determinação das curvas características. Por meio dessa técnica é possível medir tanto a sucção total como a mática, dependendo do mecanismo de fluxo da água imposto. Ele pode ser na forma de vapor ou por capilaridade nos materiais mais granulares ou com baixa atividade superficial ou ainda devido à atuação de energia adsorviva no caso das argilas. Na situação onde o fluxo ocorre por meio de vapor, a sucção que será medida é a total, visto que para a saída das moléculas de água do interior do solo, estas deverão vencer as forças capilares ou de adsorção e as forças osmóticas. Quando acontece fluxo por capilaridade ou por atuação da energia adsorviva das argilas tem-se a sucção mática e o fluxo acontece fazendo migrar a água do sistema mineral-água para o papel filtro por meio do contato entre os dois sistemas, solo-água e papel filtro-água.

Essas situações de sucção mátrica ou total são proporcionadas respectivamente ao se estabelecer ou não o contato entre o papel filtro e o sistema solo-água (Queiroz, 2015) e (Campos, 1995). Em ambas as determinações após a montagem do ensaio cada conjunto, corpo de prova – papel filtro, ou corpo de prova – espaçador poroso – papel filtro é hermeticamente fechado isolando-se da atmosfera ambiente e armazenado por certo intervalo de tempo em local com temperatura estável.

No presente estudo realizou-se apenas o estudo da sucção matricial e adotou-se 20 dias como tempo de término do fluxo de água entre o solo e o papel filtro. Cabe esclarecer que geralmente o fluxo não termina nos intervalos de tempo geralmente estabelecidos como o do presente caso, no entanto, ele passa a ser tão reduzido que já não se consegue medi-lo nas balanças de precisão utilizadas. Muitas vezes, esse é aliás, o motivo das histereses registradas entre as trajetórias de secagem e umedecimento adotadas.

O papel filtro utilizado no ensaio deve ter sua curva característica de retenção de água pré-definida. No presente estudo utilizou um papel filtro similar ao Whatman número 42, que tem calibração feita por Campos (1995) apresentada na Tabela 3.3. Para o papel empregado foram feitas calibrações no equipamento WP4 do laboratório de geotecnia da UnB para verificar e determinar se seria possível o uso das equações pré-definidas. Avaliou-se o papel filtro empregado, sua sucção em diferentes umidades. Devido a similaridade dos resultados do papel empregado com o papel Whatman N42, se adotaram suas equações conforme definidas por Queiroz, (2015) e Campos (1995), tomadas de Chandler *et al.* (1992).

Tabela 3.3 Curvas de calibração para o papel Whatman N42 (Campos, 1995).

Referência	Curva de Calibração	
Hamblin (1981)	$\log S = 8.022 - 3.683 \times \log wf$	
Chandler et al. (1992)	$\log S = 4.84 - 0.0622 \times wf$	$wf \leq 47$
	$\log S = 6.05 - 2.48 \times \log wf$	$wf > 47$
ASTM (1997)	$\log S = 5.327 - 0.0779 \times wf$	$wf < 45.3$
	$\log S = 2.413 - 0.0135 \times wf$	$wf \geq 45.3$
Leong et al. (2002)	$\log S = 2.909 - 0.0229 \times wf$	$wf \geq 47$
Sucção Mátrica	$\log S = 4.945 - 0.0673 \times wf$	$wf < 45.3$
Leong et al. (2002)	$\log S = 8.778 - 0.222 \times wf$	$wf \geq 26$
Sucção Total	$\log S = 5.31 - 0.0879 \times wf$	$wf < 26$

S = Sucção em kPa; wf = umidade do papel filtro

Além dos aspectos metodológicos indicados por Marinho (1994, 1995), seguiu-se as recomendações indicadas em (Gomez Muñeton, 2009) no que tange às localizações, dimensões, quantidade de papel, condições de armazenamento e tempos de conservação em repouso e ao abrigo de variações térmicas do sistema papel filtro – solo úmido isolado da atmosfera ambiente.

Após o período de repouso na condição hermética entre solo e papel, os papéis filtros foram removidos e suas umidades determinadas pelo método da estufa. Conhecidas as umidades dos papéis filtros as sucções atuantes nos corpos de prova foram determinadas por meio das equações 3.11 e 3.12 (Marinho, 1995), sendo a Equação 3.11 usada para umidades do papel filtro superiores a 47% e a Equação 3.12 para umidades do papel filtro inferiores a esta.

$$Sucção = 10^{(6,05-2,48\log\omega)} \quad (3.11)$$

$$Sucção = 10^{(4,842-0,0622\omega)} \quad (3.12)$$

Sabendo que a sucção ditada pelas forças de adsorção depende diretamente da composição químico-mineralógica e da estrutura do solo e que o fenômeno capilar está atrelado à porosidade do solo e ainda de que na maioria dos solos atuam conjuntamente os dois fenômenos, as determinações e análises foram centradas nestas variáveis atentando-se para o fato de que ao se avaliar comparativamente o perfil de solo é possível analisar a influência da composição químico-mineralógica e da estrutura do solo, e quando se compacta o solo em diferentes energias torna-se possível averiguar a influência da porosidade na forma da curva característica.

As curvas características foram obtidas a partir de 15 pontos ou corpos de prova (CP) por curva (Figura 3.15). Os corpos de prova foram moldados com dimensões aproximadas de 20 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Para as curvas características da compactação estática os corpos de prova foram compactados no cilindro tripartido, numa só camada na prensa CBR numa velocidade de 1mm/min.

Usou-se três papéis filtros sobrepostos em cada corpo de prova. Um em contato com a amostra e outro externo com maior diâmetro e o terceiro central com diâmetro um pouco menor. Esse papel filtro central protegido contra contaminação e em condições favoráveis de equilíbrio de umidade é o usado na determinação da sucção. O que se encontra em contato com o solo é descartado devido ao risco de contaminação e determina-se ainda, por uma questão de segurança, a sucção do papel filtro externo. As

porcentagens de saturação inicialmente previstas variaram entre 5% e 98%. O tempo de estabilização adotado para cada um dos 15 pontos foi 20 dias. De modo a assegurar condições ambientais estáveis depois do fechamento hermético de cada corpo de prova eles foram guardados em caixas de isopor.

Foram determinadas 12 curvas características para o solo compactado estaticamente, compactando-se na umidade ótima das três energias os solos coletados nas quatro profundidades já indicadas. Para a compactação dinâmica, determinaram-se quatro curvas características, considerando-se apenas a umidade ótima da energia intermediária, para as quatro profundidades. Finalmente, foram ainda determinadas as curvas características do solo em estado natural coletado nas quatro profundidades estudadas. No total, foram determinadas 20 curvas características envolvendo as profundidades de 2, 5, 8,6 e 11,6 metros.



Figura 3.15 Corpos de prova usados na determinação das curvas características.

Na compactação dinâmica do solo usou-se a metodologia mini-MCV para a obtenção de CP com as mesmas dimensões dos CP oriundos da compactação estática. Usou-se o mesmo cilindro tripartido usado na compactação estática e o solo foi igualmente compactado na energia intermediária, em uma única camada.

Com o peso específico previamente determinado por meio das curvas de compactação Proctor, realizou-se para o solo compactado dinamicamente na energia intermediária o cálculo a partir da equação 3.10, do número de golpes necessários. Considerou-se nos cálculos um soquete com peso de 4,78 kg e 30 cm de altura de queda. Para essas condições adotou-se uma camada de solo com $39,27\text{cm}^3$ de volume sendo usada a energia intermediária de $12,9\text{kg cm/cm}^3$, o que deu como resultado um número de golpes igual a 4, obtendo-se corpos de prova com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

3.7 COMPRESSÃO SIMPLES

Para avaliação do comportamento mecânico do solo nas profundidades estudadas, foram submetidas ao ensaio de compressão simples amostras compactadas, dinamicamente e estaticamente, considerando-se a umidade ótima, ótima menos 2% e umidade ótima mais 2%. Esse ensaio encontra-se normalizado pela ABNT NBR5739, (1994)

Empregou-se no ensaio uma velocidade de 1 mm/min. Os ensaios foram conduzidos até a ruptura dos corpos de prova, admitindo-se como tal a queda na tensão axial ou a ocorrência de deformação excessiva, geralmente visualizada com trincas nos corpos de prova (Figura 3.16). As dimensões dos corpos de prova obedeciam a relação altura ($H = 10$ cm) igual a duas vezes o diâmetro ($D = 5$ cm).



Figura 3.16 Ensaio de Compressão simples.

O comportamento mecânico no ensaio de compressão simples é reflexo da estrutura do solo, da porosidade e distribuição de poros e da sucção e/ou capilaridade atuante. A estrutura do solo, dependendo do seu estado de agregação, pode ser altamente sensível ao método e umidade de compactação. Esse ensaio permite ainda visualizar o comportamento de ductilidade ou fragilidade do solo atribuída à sucção e a cada método e condição de compactação com a consequente estrutura.

3.8 TRAÇÃO SIMPLES INDIRETA

Procurando o melhor entendimento do comportamento do solo, após a determinação das curvas características os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração indireta, ou seja, resistência a tração medida por meio do ensaio de compressão diametral. Adotou-se no ensaio a velocidade de 1 mm/min. Neste ensaio foram usados os corpos que tinham servido para a obtenção das curvas características.

Após a ruptura realizou-se sobre os corpos de prova não muito danificados determinação do peso específico pelo método da balança hidrostática.

3.9 SÍNTESE DO ESTUDO

Foi feito um paralelo entre as microestruturas, as classificações e mineralogias e os comportamentos dos solos estudados. Os ensaios de caracterização visaram o entendimento das propriedades do solo e certa previsão de comportamento. Já os ensaios de compactação, resistência à compressão simples, resistência à tração e as curvas características permitem avaliar os efeitos das propriedades químico-mineralógicas e estruturais sobre o comportamento mecânico e hidráulico embora esse estudo tenha dado ênfase apenas ao estudo do comportamento mecânico.

A Tabela 3.4 apresenta a síntese dos ensaios realizados, assim como as condições, características e quantidades de cada um deles.

Tabela 3.4 Ensaios realizados.

Ensaio	Profundidade [m]	Pontos	Estado				Umidades			Quantidade
			Natural	Compactação			Ramo umido	Ótima	Ramo seco	
				Energias						
			Normal	Intermediária	Modificada					
Limite de liquidez e limite de plasticidade	1 até 12m	8	sim	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	96
Peso específico dos grãos	1 até 12m	1	sim	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	12
Massa específica aparente	1 até 12m	3	sim	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	36
Granulometria e classificação	1 até 12m	2	sim	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	24
Proctor	2	5	N.A	sim	sim	sim	ótima +2%,+4%	sim	ótima -2%, 4%	15
	5	5	N.A	sim	sim	sim	ótima +2%,+4%	sim	ótima -2%, 4%	15
	8,6	5	N.A	sim	sim	sim	ótima +2%,+4%	sim	ótima -2%, 4%	15
	11,6	5	N.A	sim	sim	sim	ótima +2%,+4%	sim	ótima -2%, 4%	15
Compactação estática	2	3	N.A	sim	sim	sim	ótima+3%	sim	ótima-3%	9
	5	3	N.A	sim	sim	sim	ótima+3%	sim	ótima-3%	9
	8,6	3	N.A	sim	sim	sim	ótima+3%	sim	ótima-3%	9
	11,6	3	N.A	sim	sim	sim	ótima+3%	sim	ótima-3%	9
Difração raios x	2	0	sim	-	-	-	Higroscópica			0
	5	0	sim	-	-	-	Higroscópica			0
	8,6	0	sim	-	-	-	Higroscópica			0
	11,6	0	sim	-	-	-	Higroscópica			0
Microscopia de varredura	2	4	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	19
	5	4	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	19
	8,6	4	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	19
	11,6	4	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	19
Curvas características	2	2	sim	sim	sim	sim	Variável desde a ótima/natural			5
	5	2	sim	sim	sim	sim	Variável desde a ótima/natural			5
	8,6	2	sim	sim	sim	sim	Variável desde a ótima/natural			5
	11,6	2	sim	sim	sim	sim	Variável desde a ótima/natural			5
Compressão simples	2	4	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	18
	5	4	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	18
	8,6	4	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	18
	11,6	4	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	18
Tração indireta	2	15	não	sim	sim	sim	não	sim	não	45
	5	15	não	sim	sim	sim	não	sim	não	45
	8,6	15	não	sim	sim	sim	não	sim	não	45
	11,6	15	não	sim	sim	sim	não	sim	não	45

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Procurou-se com os resultados obtidos definir quando é aplicável a teoria de Lambe (1958a) sobre a estrutura, na avaliação da influência da compactação na estrutura dos solos que compõem os perfis de intemperismo tropicais. Além disso, buscou-se associar o comportamento do solo com a microestrutura ao longo do perfil de alteração. Para esse propósito serão levados em consideração os aspectos levantados por Seed & Chan (1959), Camapum de Carvalho *et al.*, (1987) e Alonso (2004) e outros relacionados com a pesquisa mencionados anteriormente na revisão bibliográfica. As análises que seguem são baseadas nos resultados de cada ensaio levando-se em consideração as propriedades químico-mineralógicas e estruturais dos solos estudados ao longo do perfil de intemperismo.

4.1 MINERALOGIA

A alteração pela ação da água gera lixiviação, hidrólise e alteração de minerais, primeiro os álcalis (Na, K, Ca, Mg, Ti, etc.) posteriormente Al, Fe e Si de acordo a fragilidade que apresentam. Destas alterações geram-se diferentes concentrações de minerais, primários e secundários, argilominerais, óxidos e hidróxidos.

Segundo Carvalho (1995), citado por Guimarães (2002), obteve para a mineralogia do perfil de solo estudado até a profundidade de 10 m a composição mostrada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Mineralogia do perfil de solo (Carvalho, 1995, apud Guimarães, 2002).

Mineral (%)	Profundidade (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
gibbsita	39,2	41,7	38,7	43,3	36,6	27,1	9,1	3,7	0	0
caolinita	8,3	6,9	5,4	8,7	11,7	17,5	27,1	41,1	30,9	37,1
quartzo	32,5	29,4	37,6	22,1	29,4	15,7	28,9	9,4	27,6	22,5
hematita	6,8	6,9	6,7	10,1	10,8	14,1	14,4	13,7	11,9	14,1
goethita	3,5	3,4	4,7	4,4	0	0	0	0	0	0
anastásio	5,9	6,9	4,1	5,9	7,4	7,9	7,3	5,1	7,2	0
rutilo	3,8	4,9	3,1	5,5	4,1	6,5	3,8	6,6	0	0
ilita	0	0	0	0	0	6,9	5,7	7,9	7,1	11,2

Os resultados apresentados na Tabela 4.1 mostram que o processo de intemperismo tropical atuou no perfil de solo gerando importantes alterações mineralógicas. Verifica-se uma marcante presença de gibbsita até a profundidade de 6 m, profundidade a partir da qual o seu teor diminui drasticamente desaparecendo na

profundidade de 9 m. Distribuição inversa pode ser observada para caulinita conduzindo à conclusão de que a gibbsita advém da alteração da caulinita, pois a gibbsita é, no caso, o resultado da hidrólise da caulinita. O surgimento da presença de illita a partir da profundidade de 6 m leva a conclusão de que a caulinita foi formada a partir dela. Observa-se ainda que o somatório dos teores de hematita e goethita são praticamente constantes ao longo do perfil indicando tratar-se de mesma origem com níveis de hidratação distintos, onde um é a oxidação do outro. As variações mineralógicas ao longo do perfil estão detalhadas na Figura 4.1.

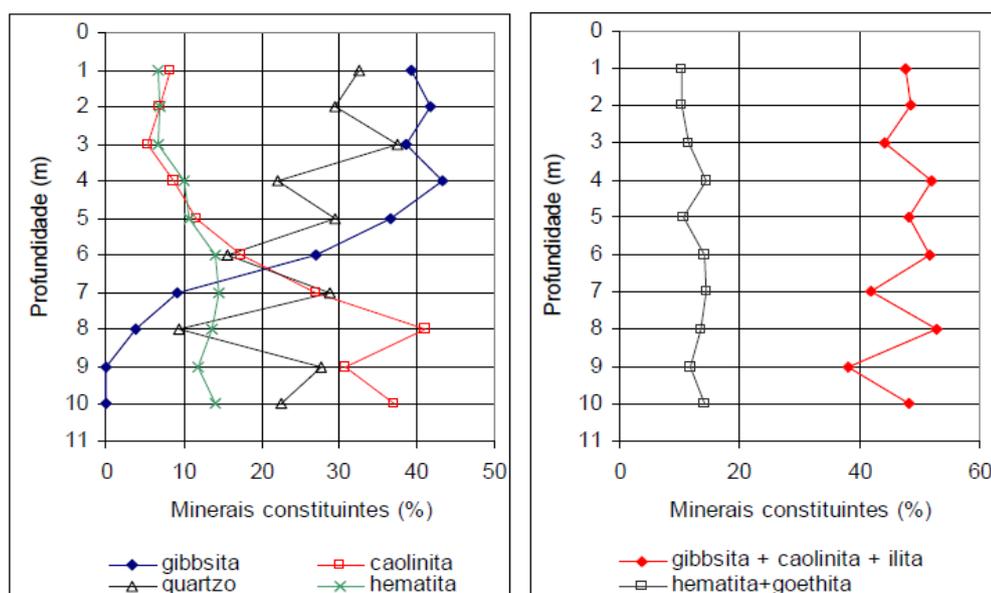


Figura 4.1 Distribuição dos principais minerais ao longo da profundidade (Guimarães, 2002).

Nesse perfil de solo, enquanto a gibbsita contribui para a diminuição da densidade relativa dos grãos no solo profundamente intemperizado, a hematita e a goethita fazem com que sobressaia o aumento desse parâmetro na camada de transição e no solo saprolítico devido à ausência da gibbsita. A Tabela 4.2 apresenta a densidade real dos principais minerais presentes no perfil de solo estudado.

Tabela 4.2 Massa específica dos minerais (modificado Kiehl, 1979).

Mineral	caolinita	illita	Montmorillonita	quartzo	Gibbsita	Goethita	Hematita	Magnetita	Rutilo	Zircão	Anastasio
Densidade real	2,6-2,68	2,6-2,68	2,2-2,7	2,65-2,66	2,3-2,4	4,37	4,9-5,3	5,18	4,18-4,25	4,68-4,7	3,9

Os minerais como Anastásio e rutilo são óxidos de titânio que também apresentam elevada densidade relativa, 3,9 e 4,18 até 4,25 respectivamente, e

contribuem para a elevação na densidade relativa dos grãos. Sua presença quase constante é baixa no perfil de solo estudado. Eles desaparecem depois da zona de transição para o solo saprolítico (8m), devido ao fato de que o agente gerador, intemperismo químico tropical, decresce ou desaparece com a profundidade. O rutilo é um óxido de titânio muito frequente nos solos tropicais intemperizados como o de Brasília.

Pode observar-se nas imagens da Figura 4.2, a alteração do grau de agregação do solo ao longo do perfil constatando que ele diminui com o aumento da profundidade. A redução da agregação com o aumento da profundidade ao longo do perfil é responsável pela diminuição da macroporosidade e microporosidade, sendo que essa queda da agregação pode estar atrelada à diminuição de gibbsita com o aumento da profundidade no perfil (Figura 4.3).

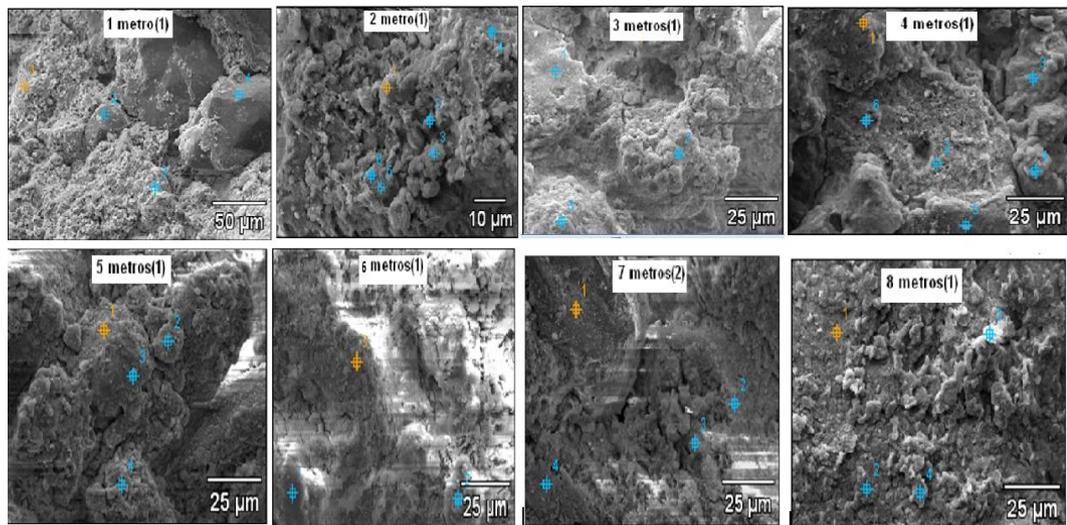


Figura 4.2 Microscopias solo natural.

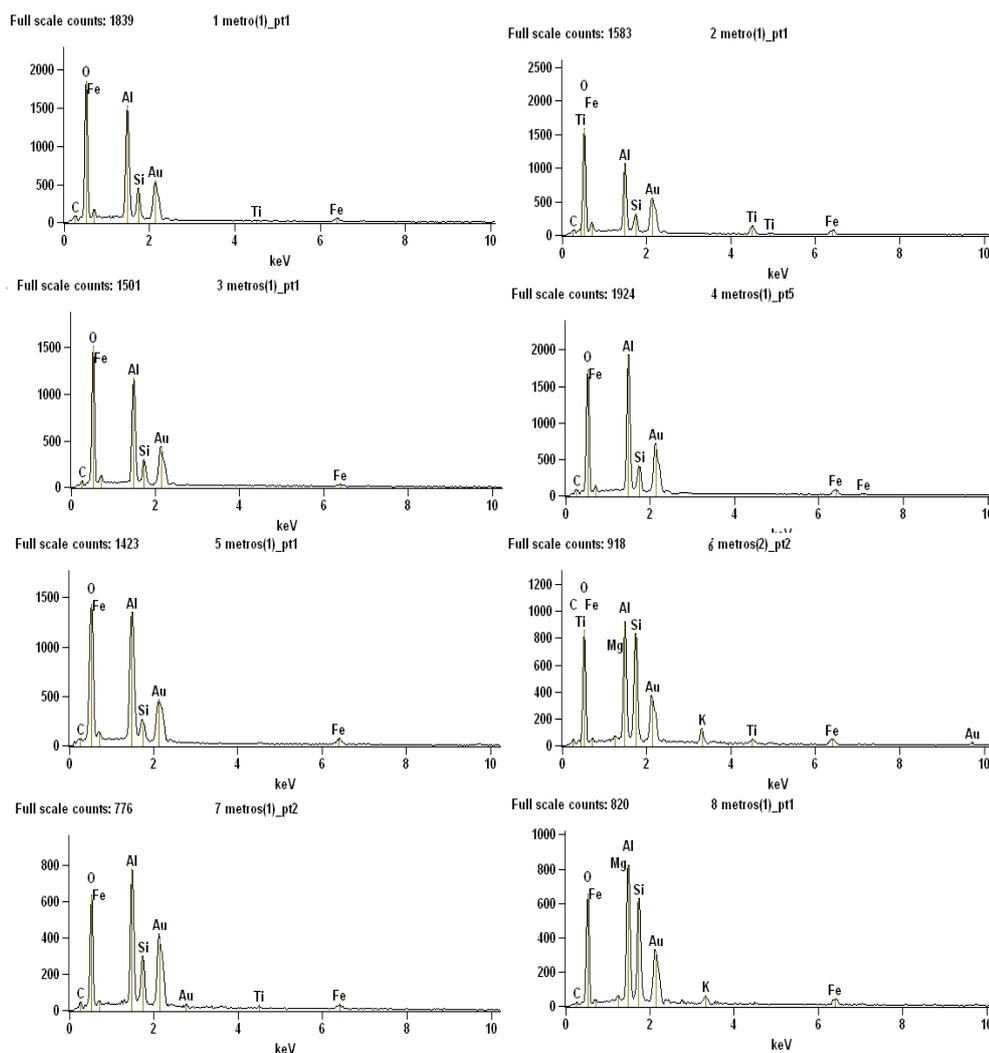


Figura 4.3 EDS natural, concentração de minerais óxidos e hidróxidos.

As imagens da Figura 4.2 foram empregadas nas análises químicas feitas por EDS durante a realização da microscopia de varredura. As análises realizadas estão mostradas na Figura 4.3.

A Figura 4.3, expõe a concentração dos elementos químicos presentes nos minerais que compõem o perfil de solo e oferece uma análise qualitativa do grau de alteração ao considerar de modo relativo os seus teores. Nessa figura o eixo vertical indica a concentração, enquanto o eixo horizontal indica os níveis de energia de detecção de cada elemento químico presente no solo nos pontos analisados. Assim quanto maior a intensidade do pico maior a concentração do elemento químico e quanto maior energia maior alteração. Com base no exposto é possível afirmar que as porções de solo contendo ferro, alumínio e silício (óxidos, hidróxidos, caulinita) têm

concentrações importantes até 8 m de profundidade sendo que o silício, coincidentemente com o surgimento do potássio, amplia sua intensidade de pico a 6 e 8 m de profundidade. Cabe destacar que nas análises mineralógicas Carvalho (1995), apud Guimarães (2002), colocou em evidência o surgimento da illita a partir da profundidade de 6 m o que corrobora com a presença do potássio nessas profundidades. Salienta-se que o ouro que se faz presente nas amostras ocorre devido ao processo de metalização.

Na Figura 4.3, são visíveis às variações dos teores de rutilo por meio do pico do titânio, que apresenta as maiores intensidades à 2, 4 e 6 m até desaparecer aos 8 m . Também se observa a variação das concentrações dos álcalis (por exemplo, Mg e K) os quais estão ausentes até 6 m de profundidade, reaparecendo paulatinamente com maior concentração nas profundidades que se seguem refletindo assim o menor nível de intemperização sofrido pelo solo à medida que se aprofunda no perfil a partir dessa profundidade. Situação inversa acontece com a relação entre os picos de alumínio e silício que é pronunciada, exceto à 6 m onde já aparece traço de potássio, até a profundidade de 7 m, diminuindo a 8 m de profundidade. Observa-se ainda nessa figura que o ferro se faz presente, mais ou menos com a mesma intensidade, exceto para a profundidade de 4 m.

Resumindo da Tabela 4.1 e Figura 4.3, é possível afirmar que os teores de caulinita, óxidos e hidróxidos como gibbsita, hematita e goethita permanecem aproximadamente constantes nos primeiros 4m que correspondem à zona mais ativa onde acontece alteração mais intensa no ambiente tropical com maior lixiviação e hidrólises. Após a profundidade de 4 m, devido à diminuição da alteração tropical a concentração de gibbsita reduz assim como a presença de caulinita cresce quando aumenta a profundidade.

A alta concentração de gibbsita nos primeiros metros, produto da alitização resultante da hidrólise que conduz à lixiviação da sílica e torna a relação alumínio/sílica mais pronunciada.

4.2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Ao longo do poço de amostragem escavado encontrou-se um solo tropical, solo laterítico, com nível de intemperismo variando de alto até médio até a profundidade de 8 metros. Em seguida dá-se início à transição do solo laterítico para o solo tropical,

residual, pouco intemperizado, e posteriormente se estabelece o solo saprolítico, que se inicia a aproximadamente 10 m de profundidade e faz-se ainda presente até a profundidade estudada nessa pesquisa, 12 m. A aparência do solo corresponde ao esperado para um perfil de solo tropical apresentando cor vermelha e alta porosidade até a profundidade de 8 m. A partir dessa profundidade surge uma cor variegada até 10 m de profundidade, e a porosidade diminui. A partir de 10 m o solo assume uma cor roxa passando à condição de solo saprolítico fino até a profundidade estudada de 12 m.

As evidências visuais ajudam a identificar e associar características, propriedades e comportamento dos solos, no entanto, no perfil de intemperismo muitas vezes esses aspectos visuais não refletem diretamente as propriedades químicas, mineralógicas e de comportamento ao longo do perfil, o que torna necessário análises complementares.

A região do Distrito Federal apresenta-se recoberta por um manto de solo detrito laterítico formado no Terciário-Quaternário e constituído principalmente de latosolos vermelho-amarelos (Cardoso, 2002). A espessura desta cobertura é bastante variada, em função da topografia, da cobertura vegetal, rocha de origem e da geomorfologia, podendo variar de centímetros a dezenas de metros. Um alto grau de intemperismo e lixiviação foram responsáveis pela formação deste solo, conduzindo-o a apresentar uma estrutura porosa, metaestável sendo intitulado pelos geotécnicos locais como “argila porosa” (Guimarães, 2002).

Devido ao processo de alteração químico-mineralógica e lixiviação, os horizontes dentro do perfil de intemperismo tropical, na zona profundamente intemperizada, são pouco diferenciados com relação às variações de cor e textura. Eles são geralmente marcados pela quase ausência das bases Ca, Mg, K, Na e Si, presença predominante de argilominerais do grupo 1:1, grupo da caulinita, e alta presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Sua estrutura é geralmente porosa e marcada pela presença de microagregados e/ou agregados ligados por pontes de argila ou oxihidróxidos de ferro e/ou alumínio. A aglomeração das partículas formando agregados confere a esses solos estrutura fortemente granular de tamanho aproximado de grãos de areia (Guimarães, 2002). O comportamento deste solo tropical é governado pela alta agregação, presença de cimentações e estrutura porosa metaestável. A origem desses solos, sedimentar ou residual, tem pouca relevância frente às alterações pelas quais passaram.

Abaixo do solo profundamente intemperizados geralmente se encontra um solo de transição caracterizado por elevada heterogeneidade de propriedades e comportamento hidromecânico.

Em seguida tem-se o solo saprolítico, geralmente residual, no qual se observa menor porosidade, estrutura marcada pela rocha de origem com presença de minerais neoformados e minerais primários. Sua cor é condicionada pela rocha mãe e pelo processo de formação. Nele são diferenciáveis grãos de minerais de diferente tamanhos, mais visíveis e menos alterados, e também uma aparente macroestrutura com menor porosidade e, dependendo da rocha mãe, maior orientação. É ainda comum nesses solos a presença de pacotes de argila. O comportamento coesivo deste solo é mais evidente se comparado à cimentação do solo tropical. Nesse caso de solos pouco intemperizados, a origem sedimentar ou residual, geralmente assume maior relevância.

Considerando-se essas características, o perfil de solo estudado constitui-se em típico perfil de intemperismo. Guimarães (2002), que faz referência a Pastore (1995), classificou o perfil de solo na área de estudo de modo táctil visual de maneira similar, conforme descrito a seguir:

- Horizonte de solo residual laterítico (0 a 8,80 m), sendo constituído por uma argila arenosa vermelha escura (0 a 5,00 m) e uma argila pedregulho-arenosa vermelho escura (5,00 a 8,80 m).
- Horizonte de transição (8,80 a 10,30 m), sendo constituído por um predomínio de solo laterítico (8,80 a 9,80 m) e poucas estruturas reliquias (9,80 a 10,30 m).
- Horizonte de solo saprolítico de metarritimito (10,30 a 15,00 m), sendo constituído por uma intercalação de quartzo (10,30 a 11,30 m) e um silte argiloso vermelho (11,30 a 15,00 m).

Esse perfil assim definido serve como ponto de referência, mas o perfil de solo será avaliado a partir dos ensaios realizados e das classificações já indicadas.

4.2.1 LIMITE DE LIQUIDEZ, LIMITE DE PLÁSTICIDADE E ÍNDICES FÍSICOS.

Os limites de Atterberg são tradicionalmente considerados como indicadores de diferentes comportamentos no solo. Eles definem os limites de estado do solo, estado líquido, estado plástico, estado semissólido e estado sólido sendo que a fronteira entre o

estado semissólido e sólido, limite de contração, não será aqui analisado. Cada um desses estados depende da composição químico-mineralógica e da estrutura do solo e está ligado a interação solo-água, sendo, portanto, muito influenciados por tais fatores.

O intemperismo, por alterar a composição químico-mineralógica e as características estruturais do solo, pode afetar os limites de Atterberg, lembrando, porém, que como os ensaios são realizados sobre amostras amolgadas, grande parte do efeito do intemperismo sobre a estrutura é removida do solo. O perfil de solo estudado apresenta as seguintes condições plásticas e líquidas, indicadas na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 Umidade natural (wn) Limites de Atterberg e índices de plasticidade (IP), índice de liquidez (Il), índice de consistência (Ic) e coeficiente de atividade de Skempton do perfil de solo estudado.

Profundidade [m]	wn%	Lp [%]	Ll [%]	Ip [%]	Ia	wh [%]	Il	Ic
1	27,6	28	37	9	0,56	1,6	-0,05	1,05
2	26,5	27	36	9	0,19	2,5	-0,07	1,07
3	24,9	27	36	9	0,24	2,8	-0,26	1,26
4	27,6	30	39	9	0,26	3,0	-0,24	1,24
5	28,6	29	39	11	0,38	2,8	-0,03	1,03
6	29,3	30	40	11	0,25	3,3	-0,02	1,02
7	25,4	35	45	10	0,24	3,2	-0,92	1,92
8	31,7	32	45	13	0,22	3,0	-0,01	1,01
9	37,0	29	45	16	0,25	4,6	0,50	0,50
10	39,2	32	46	15	0,17	2,4	0,51	0,49
11	32,0	25	36	11	0,14	2,9	0,67	0,33
12	33,1	27	38	11	0,13	2,1	0,57	0,43

Os limites líquidos e plásticos dos solos estudados apresentam valores baixos quando comparados com solos de mineralogia semelhante e altos teores de finos.

Como consequência dos baixos e próximos valores dos limites de liquidez e plasticidade do solo ao longo do perfil tem-se baixos índices de plasticidade (Tabela 4.3), com uma média de 11%, a qual está de acordo com o esperado segundo a literatura mencionada na revisão bibliográfica. De maneira geral o perfil de solo estudado apresenta índices de plasticidade baixos, classificando-se como solo tropical de baixa plasticidade.

O comportamento do índice de atividade (Ia) é similar ao do índice de plasticidade, variando pouco ao longo do perfil de intemperismo. O perfil de solo tropical até os 8 m de profundidade é classificado como inativo ($Ia < 0,75$). Após essa profundidade começa a transição para o solo saprolítico onde o solo passa a ser de alta atividade ($Ia > 1,25$), e em seguida, ao atingir o solo saprolítico, o Ia diminui fazendo

com que o solo seja classificado como inativo (Tabela 4.3). A redução do índice de atividade a medida que se penetra no solo saprolítico está provavelmente atrelada à maior presença de minerais primários pouco ativos.

Os valores do índice de liquidez obtidos são muito pequenos para todo o perfil de solo estudado (Tabela 4.3) em consequência das baixas umidades naturais no momento da coleta. Observa-se, porém, certo acréscimo da zona de transição em diante. Esse aumento está certamente ligado ao aumento da umidade natural e à própria mineralogia do solo, que para o solo de transição e início do solo saprolítico apresenta minerais mais ativos além de estrutura mais regular, situações que dificultam a perda de água.

Um comportamento inverso ao I_l é observado para a variação do índice de consistência ao longo do perfil. O I_c relaciona o limite de liquidez menos a umidade natural com o I_p , indicando o quanto o solo está longe ou perto de atingir o estado de fluidez. Os índices de consistência apresentam os valores mais altos do I_c para o perfil laterítico, classificando-o como de consistência rija $I_c > 1$. A maior rigidez do solo laterítico pode ser atribuída às condições de cimentação e estrutura. Para o solo saprolítico a consistência é mole. Em laboratório estes solos tanto secos quanto úmidos em estado natural ou compactado apresentaram alta fragilidade, porém, em campo tem apresentado valores relativamente altos de SPT.

Para avaliar a variação de I_c ao longo do perfil em função das alterações da umidade natural ao longo do ano, utilizou-se os perfis de umidade máxima e mínima apresentados por Guimarães (2002) e calculou-se o I_c min. e I_c max, Tabela 4.4. Assim pode-se ver que com as condições mais secas de todo o perfil de solo estudado, tanto o horizonte laterítico como o saprolítico tem comportamento rígido. No entanto, para as umidades maiores obtidas no período chuvoso o comportamento enquadra-se como mole, excetuando-se o final do perfil laterítico e início da zona de transição (Figura 4.4).

Tabela 4.4 I_c do perfil para as umidades máximas e mínimas apresentadas por Guimarães (2002).

Pz [m]	ω_{min} %	ω_{max} %	I_c max	I_c min
1	15,0	31,5	2,46	0,61
2	18,0	32,5	2,01	0,42
3	26,0	33,0	1,14	0,36
4	26,5	32,5	1,36	0,72
5	28,0	32,2	1,08	0,68
6	28,1	31,8	1,14	0,80
7	27,3	30,0	1,74	1,47
8	25,0	31,7	1,52	1,01
9	26,2	31,0	1,20	0,88
10	23,5	39,2	1,55	0,49
11	22,0	35,5	1,27	0,00
12	32,0	37,0	0,53	0,07

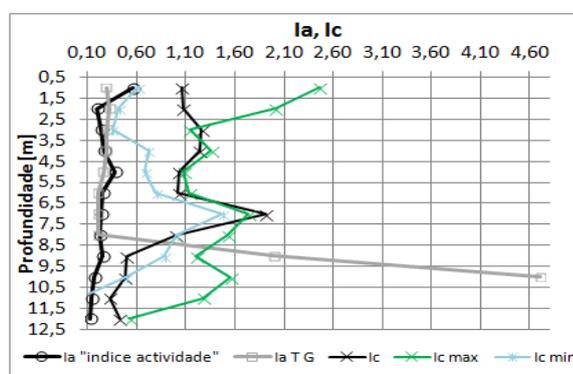


Figura 4.4 Índice de consistência, máximo e mínimo.

Portanto, com base nessa análise fundamentada nos perfis de umidade, deve-se então assinalar que o índice de consistência avaliado para estes solos, apenas é um indicativo da situação atual dos mesmos em campo. Tem-se ainda como observação, que os resultados de I_c obtidos devem ser considerados como ponto de reflexão para a avaliação de resultados dos ensaios SPT obtidos para perfis de solo tropicais, pois no manto profundamente intemperizado esse ensaio destrói a estrutura do solo subavaliando sua resistência e no solo pouco intemperizados, solos saprolíticos, o I_c não reflete o estado de confinamento de campo, estado esse definidor do SPT.

Ampliando o campo para reflexão, estes resultados de I_c não deixam de ser uma consequência direta da ação do intemperismo modificador da composição químico-mineralógica e da estrutura do solo. No material mais intemperizado, rico em caulinita e gibbsita, a capacidade de retenção de água é pequena, o que atrelado a importante drenagem propiciada pela macroporosidade conduz o solo as baixas umidades naturais no período de seca conduzindo o I_c , e por consequência a rigidez, a valores elevados.

O intemperismo tropical produz um solo agregado, cimentado e poroso nos primeiros metros com marcante ação da lixiviação (1 a 3 m). Nos metros seguintes embora os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio ainda exerçam significativa influência, influência que diminui com a profundidade, as junções entre agregados se dão de modo predominante por pontes de argila onde predominam argilominerais estáveis do grupo 1:1, grupo da caulinita, mantendo-se a estrutura porosa até a zona de transição localizada a partir da profundidade de 8 m no perfil de solo estudado. Um pouco antes dessa profundidade já se faz presente no perfil de solo o argilomineral ilita do grupo 2:1. Como consequência tem-se a consistência mole a partir da camada de transição devido, pelo menos em parte, à maior atividade e interação com água por parte da ilita, (Tabela 4.3).

Ao analisar o perfil de umidades do solo, considerando as condições máximas e mínimas que podem se apresentar, e relacionando com a umidade necessária para que o solo tenha saturação total, pode-se ver que as baixas umidades do perfil laterítico quando da amostragem são as responsáveis pela classificação do solo profundamente intemperizados como de consistência rija. Na zona de transição o comportamento do Ic passa a condição mole pela proximidade com a saturação total, Figura 4.5.

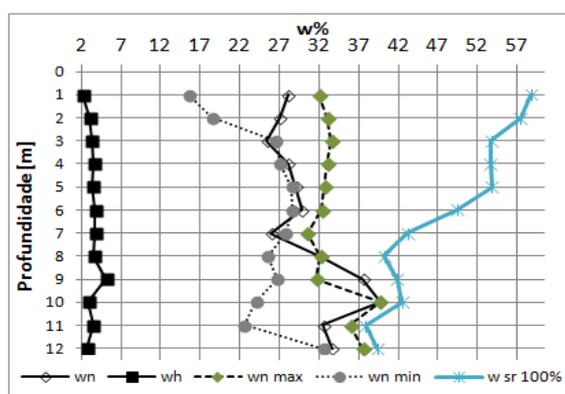


Figura 4.5 Perfil de umidade natural, máxima, mínima e de saturação.

No perfil de intemperismo tropical os limites de Atterberg refletem a mineralogia, a estrutura e a maior ou menor presença dos oxi-hidróxidos de ferro (Cardoso 2002) e alumínio. A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos nessa pesquisa onde pode-se observar a tendência dos limites de Atterberg se manterem constantes nos primeiros três metros passando em seguida a aumentar até atingir a zona de transição,

onde novamente tende a constância dos resultados. Na zona do saprólito estabelecido (10 a 12m) tem-se a queda dos limites de Atterberg.

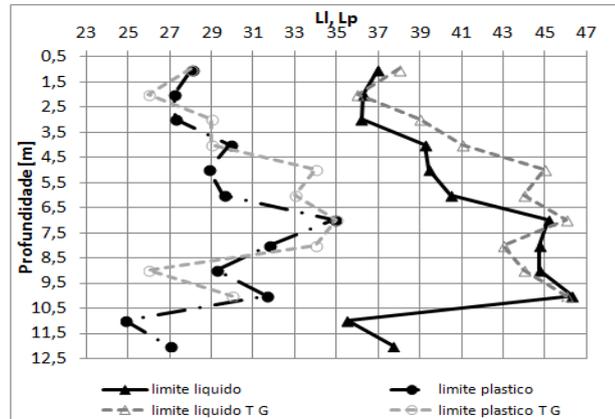


Figura 4.6 Limites de Atterberg do perfil de solo estudado.

A Figura 4.7 mostra que o índice de plasticidade, como esperado, apresenta comportamento similar ao observado para os limites de Atterberg ao longo do perfil de intemperismo.

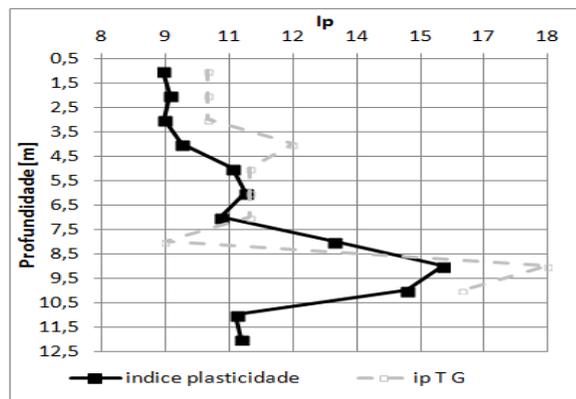


Figura 4.7 Índice de plasticidade.

Quanto ao índice de atividade calculado segundo Skempton (1953), (Figura 4.8), observa-se que em função da granulometria ao longo do perfil de intemperismo ele não guarda uma relação direta com o índice de plasticidade. Nessa mesma figura é possível observar que como o índice de consistência está diretamente ligado à umidade natural não é possível estabelecer uma relação direta como os limites de Atterberg e com o índice de plasticidade.

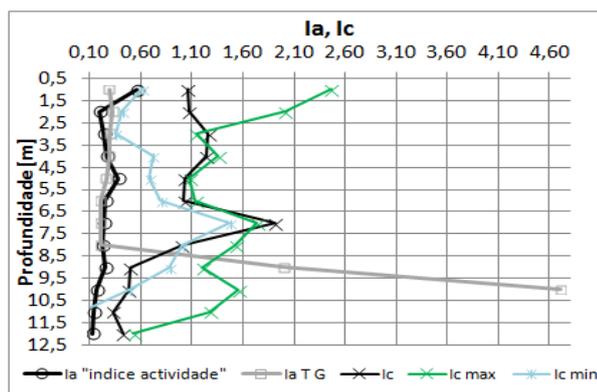


Figura 4.8 Índice de atividade e índice de consistência ao longo do perfil.

Os resultados de índice de atividade foram comparados com os obtidos na dissertação do Guimarães (2002) (Ia T G), observando-se que a variação é muito pouca até a zona de transição quando então passa a ser substancial o que pode estar ligado a forma como se considerou o teor de argila e como se preparou o solo para os ensaios de caracterização. Guimarães (2002) seguiu a metodologia convencional de preparação de amostra secando ao ar e destorroando o solo, tratamento esse não adotado nessa dissertação.

4.2.2 MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS, POROSIDADE E SATURAÇÃO.

O perfil de um solo tropical está caracterizado pelo nível de lixiviação, agregação e cimentação que determinam uma configuração porosa, identificada por meio do índice de vazios ou da porosidade, mas tem que se reconhecer que os grãos dos minerais originados apresentam densidade dos grãos (Gs) muito variáveis, que influem nas propriedades do solo que dela dependem como é o caso do peso específico aparente seco (Tabela 4.5). Como extremos de peso específico dos grãos presentes nos perfis de solos tropicais podem ser citados a gibbsita (2,3 a 2,4 gf/cm³), como limite inferior, e a hematita (4,9 a 5,3 gf/cm³), como limite superior (Kiehl, 1979 apud Cardoso, 2002).

Tabela 4.5 Índices físicos do perfil de solo estudado.

Profundidade [m]	w [%]	wn [%]	γ [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	Gs	e	n [%]	Sr [%]
1	26,4	27,6	13,3	10,6	2,74	1,59	61,4	47
2	25,3	26,5	13,4	10,7	2,73	1,55	60,8	47
3	24,2	24,9	13,9	11,2	2,75	1,46	59,4	47
4	27,2	27,6	14,2	11,2	2,75	1,46	59,3	52
5	27,6	28,6	14,2	11,2	2,76	1,47	59,5	54
6	27,1	29,3	15,0	11,8	2,77	1,35	57,5	60
7	26,9	25,5	16,1	12,8	2,83	1,21	54,7	60
8	29,2	31,7	17,5	13,4	2,86	1,14	53,2	80
9	35,3	37,0	17,8	13,2	2,91	1,20	54,6	90
10	37,6	39,2	18,1	13,2	2,94	1,23	55,2	93
11	30,1	32,0	18,6	14,0	2,94	1,10	52,4	86
12	32,8	33,1	18,2	13,7	2,95	1,14	53,4	85

A densidade relativa dos grãos (Gs) apresenta valores próximos e menores até a profundidade de 6 m refletindo a elevada presença de gibbsita no solo. Com a redução do teor de gibbsita, têm-se acréscimos com a profundidade no valor desse parâmetro.

A Figura 4.9 apresenta os resultados de Gs oriundos dessa pesquisa e os obtidos por Guimarães (2002). Observa-se que os valores obtidos nesta pesquisa são um pouco superiores aos obtidos por Guimarães (2002) o que pode ser atribuído a dois fatores: local de amostragem e técnicas experimentais diferentes, porém as diferenças são baixas, apenas da ordem de 0,1.

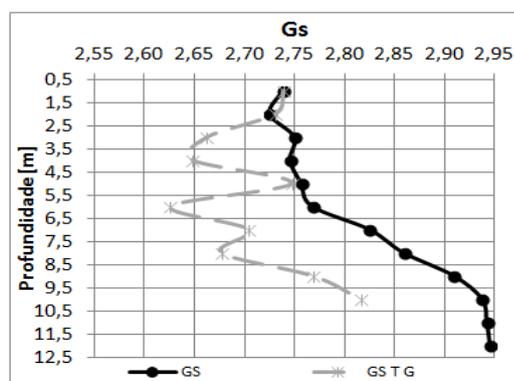


Figura 4.9 Densidade relativa dos grãos Gs.

A variação principal do GS pode ser atribuída a minerais como os oxidróxidos gibbsita, hematita e rutilo, ou a argilominerais como a caulinita que se fazem presentes em teores variáveis ao longo do perfil estudado.

O intemperismo gera nos solos tropicais uma configuração estrutural conhecida pela alta porosidade gerada pela agregação e cimentação resultantes de processos como

lixiviação, hidrólise e deposição de agentes cimentícios. Como consequência tanto os índices de vazios quanto à porosidade são altos (Tabela 4.5). Essa configuração estrutural com altos índices de vazios é geralmente metaestável. Com a redução da ação intempérica o solo ganha densidade, diminui a alteração e ganha maior estabilidade com o aumento da profundidade, apesar de muitas vezes a porosidade se manter elevada (Tabela 4.5). A Figura 4.10 apresenta os resultados de índice de vazios (e) (Figura 4.10 B) e porosidade (n) (Figura 4.10 A) obtidos para o perfil de solo estudado em comparação com aqueles obtidos por Guimarães (2002). Observa-se nessa figura uma diminuição do índice de vazios e da porosidade com a profundidade até a profundidade de 8 m. De 8 m a 10 m os dois parâmetros aumentam com a profundidade diminuindo novamente a partir de 11 m para valores praticamente constantes.

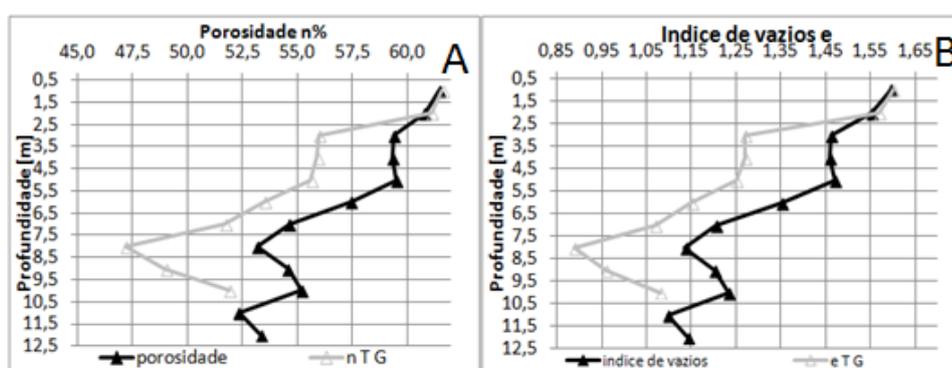


Figura 4.10 A) porosidade do perfil de solo; B) Índice de vazios.

A saturação do solo representa a quantidade de água presente nos vazios que o solo tem e é geralmente influenciada pela estação do ano, diminuindo no período de seca e aumentando no período chuvoso. As camadas mais superficiais apresentam significativa interação com a atmosfera, além de maior porosidade o que gera maior variação de S_r .

A Figura 4.11 apresenta os resultados de S_r obtidos para as amostras coletadas quando da execução do poço de amostragem (10/04/2015) e estabelece a faixa provável de variação desse parâmetro ao longo do ano considerando-se os perfis de umidade apresentados por Guimarães (2002). Destaca-se que o equilíbrio de umidade no solo depende, além das condições climáticas, da porosidade, da estrutura e da mineralogia, o conjunto sendo reflexo do equilíbrio de energia. Por exemplo, a illita presente no solo a partir de 6 m é mais ativa e retém mais água que a caulinita e gibbsita presente nos primeiros metros. Também a macroporosidade presente no manto intemperizado (0 a 8

m de profundidade) amplia a capacidade de drenagem permitindo maior e mais rápida evacuação da água. Portanto, a compreensão dos solos tropicais é indispensável pra o entendimento de suas propriedades e comportamento.

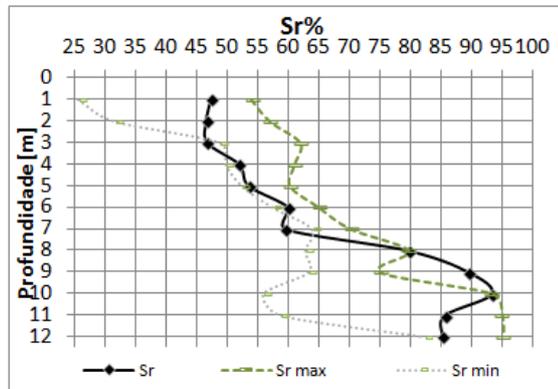


Figura 4.11 Perfis de grau de saturação (Sr).

4.2.3 MASSA ESPECÍFICA NATURAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA

Os resultados de massa específica natural (ρ) e de massa específica aparente seca (ρ_d), determinados por meio do método da balança hidrostática estão apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.12. Para efeito de comparação são também apresentados na Figura 4.12 os resultados obtidos por Guimarães (2002). As explicações concernentes às variações registradas ao longo do perfil são as mesmas já indicadas quando da análise dos perfis de porosidade e índice de vazios, destacando-se, porém, que a massa específica natural além de depender do índice de vazios e dos fatores responsáveis por sua definição, é ainda função da umidade e dos fatores que a definem. Com isso é relevante considerar as umidades extremas medidas para esse perfil de solo e calcular-se a faixa de massas específicas úmidas passíveis de serem registradas para esse perfil de solo, o que foi feito considerando-se os valores máximos e mínimos de umidade apresentados por Guimarães (2002).

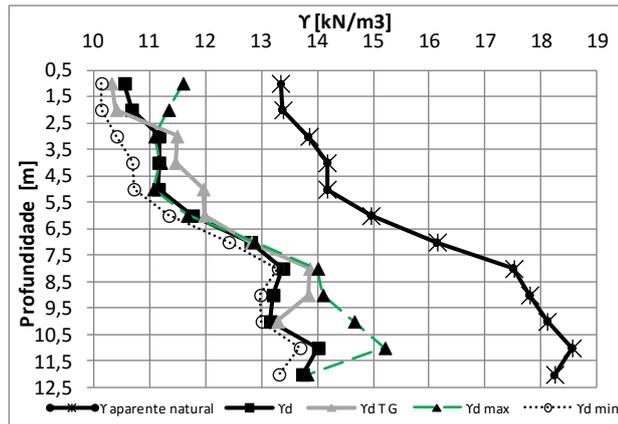


Figura 4.12 Peso específico úmido e aparente seca do perfil de solo estudado.

Como já realçado, o perfil de umidades do solo é uma característica temporal variável segundo a estação climática no período de avaliação. Para o presente estudo realizado no final do período de chuvas (10/04/2015) o perfil de umidades obtido está apresentado na Figura 4.13. Essa figura apresenta ainda a umidade do solo após 72 horas de exposição às condições atmosféricas de laboratório. É importante destacar os valores elevados de umidade registrados, o que aponta para certo potencial de retenção de água pelos agregados tudo indicando que essa retenção está ligada a estrutura dos agregados e em menor medida à composição químico-mineralógica do solo, o que marca um condicionante estrutural distinto daquele que caracteriza a macroporosidade.

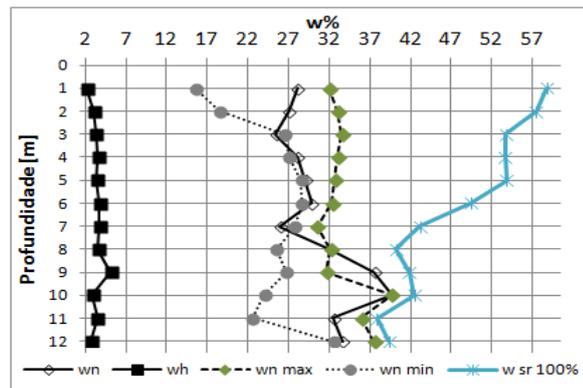


Figura 4.13 Perfis de umidades (wn - umidade natural; wh - umidade higroscópica, w Sr – umidade correspondente à saturação).

4.2.4 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

O solo tropical estudado tem sido muito analisado e classificado por diferentes autores, mas a classificação predominante desse solo é como uma argila-arenosa laterítica, de baixa plasticidade, porosa e com alta agregação; abaixo dessa camada vem

a transição e em seguida um solo saprolítico não agregado que se sobrepõe ao saprólito. Em termos de espessura de camada o perfil apresenta o solo laterítico profundamente intemperizado nos 8 m iniciais, seguido da transição entre 8 m e 10 m de profundidade. De 10 m em diante tem-se o solo saprolítico seguido do saprólito. A presença dessas diferentes camadas assim como as variações químico-mineralógicas e estruturais não só entre elas como dentro delas sugerem diferentes distribuições e tamanhos das partículas ao longo do perfil de intemperismo, sendo esse aspecto examinado a seguir para o perfil de solo estudado.

Na Tabela 4.6 e nas Figura 4.14 até a Figura 4.17 são apresentadas as curvas granulométricas para todas as profundidades avaliadas, sendo possível observar:

a) grandes variações na composição textural do solo na medida em que avança a profundidade.

b) os ensaios de sedimentação e peneiramento fino realizados com (CD) e sem (SD) o uso de defloculante permitem para uma mesma profundidade avaliar o grau de agregação do solo ao longo do perfil, o que dá ideia do nível de intemperismo sofrido pelo mesmo.

c) até a profundidade de 7 m verifica-se que a fração argila do solo em estado natural encontra-se agregada formando agregações nos tamanhos silte e areia; na profundidade de 8 m a diferença entre o teor de argila com e sem defloculante diminui e passa a marcar agregações apenas na fração silte e areia.

d) a 9 m de profundidade os resultados com e sem defloculante são similares.

e) a 10 m de profundidade o teor de argila com defloculante se torna menor que o sem defloculante o que indica a formação de agregações na fração silte gerada pela ação do defloculante. Lima *et al.*, (2002) indicam que esse comportamento se deve à agregação da ilita presente na fração argila ao interagir com o defloculante. Observa-se dos resultados apresentados que já a 8 m tem-se uma redução significativa do teor de argila com defloculante em relação ao sem defloculante e o teor de silte se mantém quase constante sinalizando que nessa profundidade já pode estar ocorrendo o fenômeno da agregação da ilita, aspecto a ser mais bem avaliado com o auxílio da microscopia.

f) a 11 m e 12 m de profundidade o teor de argila com defloculante volta a aumentar e o de silte a diminuir sinalizando para o desfazimento dos pacotes de argila

por ação do defloculante. Nessas duas profundidades praticamente não ocorrem variações no teor de areia.

O intemperismo reflete, portanto, no estado de agregação do solo, com reflexo em índices e parâmetros como nos limites de Atterberg, densidades, faixa de umidade natural de equilíbrio e coeficientes que permitem a classificação e parte do entendimento do comportamento do solo. Devido às mudanças observadas espera-se diferentes classificações ao longo do perfil de solo, no entanto, como se observa na Tabela 4.7, muitas vezes tais diferenças não conduzem a alterações na classificação, em especial nas convencionais SUCS e AHSHTO requerendo o tema maiores reflexões.

Analisando-se agora os teores relativos a cada fração granulométrica com base nos resultados obtidos sem o uso de defloculante (Tabela 4.6), constatam-se valores muito baixos para o pedregulho onde o maior conteúdo é o de 9% na profundidade de 6m, sendo que o valor médio até 8 m, profundidade onde finda o solo com alto grau de intemperização tropical, é de 4%, enquanto a média no solo saprólito é 0,04%. Destaca-se que todo o pedregulho encontrado no perfil de solo enquadra-se como fino ($2\text{ mm} < d < 6\text{ mm}$).

Tabela 4.6 Granulometria e classificações do perfil de solo.

Diametros (mm)		20,0<D<60,0	6,0<D<20,0	2,0<D<6,0	0,6<D<2,0	0,2<D<0,6	0,06<D<0,2	0,002 < D < 0,06	D < 0,002	
Pz [m]	Sedimentação	Pedregulho grosso	pedregulho medio	pedregulho fino	areia grossa	areia media	areia fina	silte	argila	passa 200
1	CD	0,0	0,0	4,5	1,8	13,9	30,1	15,9	33,8	56,7
	SD	0,0	0,0	4,5	1,3	13,4	26,4	48,0	6,3	54,8
2	CD	0,0	0,0	3,5	0,6	5,2	28,9	27,7	34,1	82,6
	SD	0,0	0,0	3,5	2,3	16,8	33,8	37,1	6,5	51,6
3	CD	0,0	0,0	1,7	1,1	9,1	28,2	21,4	38,6	75,5
	SD	0,0	0,0	1,7	2,3	15,9	38,0	35,5	6,7	53,8
4	CD	0,0	0,0	2,5	1,2	7,8	25,8	18,7	44,0	77,3
	SD	0,0	0,0	2,5	1,7	9,5	33,5	27,8	24,9	70,8
5	CD	0,0	0,0	2,4	0,4	11,8	5,4	29,0	51,0	79,7
	SD	0,0	0,0	2,4	1,0	16,6	15,4	44,2	20,4	72,1
6	CD	0,0	0,0	8,7	2,2	5,7	17,9	18,2	47,3	74,0
	SD	0,0	0,0	8,7	2,5	9,0	31,1	42,8	5,9	64,7
7	CD	0,0	0,0	2,8	2,3	6,0	22,5	24,0	42,5	78,7
	SD	0,0	0,0	2,8	2,7	9,0	19,1	59,4	7,0	72,8
8	CD	0,0	0,0	3,7	1,4	2,0	9,0	66,0	17,9	89,5
	SD	0,0	0,0	3,7	0,6	3,0	22,7	63,0	7,0	87,9
9	CD	0,0	0,0	1,7	0,2	0,8	5,7	82,3	9,3	95,5
	SD	0,0	0,0	1,7	0,2	1,0	4,9	84,9	7,3	95,2
10	CD	0,0	0,0	0,2	0,1	0,4	8,1	82,4	8,8	98,4
	SD	0,0	0,0	0,2	0,1	0,6	5,0	74,5	19,6	98,1
11	CD	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	5,2	76,5	17,7	99,1
	SD	0,0	0,0	0,0	0,1	0,7	6,9	81,1	11,2	98,9
12	CD	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	10,6	69,7	19,4	99,3
	SD	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	10,2	82,8	6,5	99,1

A porcentagem retida de areia grossa é em média de 1,97% para o solo tropical profundamente intemperizados (0 a 8 m de profundidade) e 0,12% para o solo saprolítico. A areia média tem um valor médio de 12,9% no perfil tropical profundamente intemperizado e para o solo saprolítico, a média é de 0,56%. A areia fina tem como médias 28,2% e 6,75% para os solos laterítico e saprolito respectivamente, com a particularidade que neste diâmetro de partícula começa a ser evidente a menor alteração dentro do solo saprolítico já que com a profundidade este apresenta incremento nas suas percentagens.

O conteúdo médio de silte para o solo tropical profundamente intemperizado e para o solo saprolítico é de 42% e 81% respectivamente.

Finalmente, a quantidade de argila no solo tropical profundamente intemperizado, de transição e no solo saprolítico tem como médias 11%, 7% e 12% respectivamente. Os resultados anteriores contemplam a diferença entre o solo tropical profundamente intemperizado e o solo saprolítico considerando-se a amostra sem o uso de defloculante, mas não apresentam as diferenças entre os resultados obtidos com defloculante, essa diferença pode ser observada na Tabela 4.6 e nas análises das curvas granulométricas. As diferenças sem o uso do defloculante apresentam uma maior correspondência com a visualização do solo no estado natural.

Os ensaios realizados com e sem o emprego de defloculante permitem ver a quantidade de argila presente no solo tropical profundamente intemperizados em condição agregada (Tabela 4.6 e Figura 4.14 e Figura 4.15) o mesmo não sendo observado para a transição onde só se tem uma baixa agregação nos siltes (Tabela 4.6 e Figura 4.16) e para o solo saprolítico de agregação quase nula (Tabela 4.6 e Figura 4.17). Cabe destacar que devido a semelhança nas curvas granulométricas entre as profundidades de 8 e 9 m e ao fato de na profundidade de 8 m o solo já apresentar textura diferente, sem aparência agregada e cimentada, com cor variegada predominando as cores roxa, amarela e branca optou-se por classificar como transição as profundidades de 8 e 9 m e a partir de 10 m o solo como saprolítico.

Como se observou na Tabela 4.6 e nas curvas da Figura 4.14 até Figura 4.17, a agregação é muito alta, confirmando a alteração tropical do perfil. Evidencia-se que as partículas finas de argilominerais originadas pelo alto intemperismo, estão ligadas a partículas de óxidos que não são solúveis e são de alta cimentação gerando agregações

que causam uma aparência arenosa ou siltosa no solo tropical. No solo saprolítico, os níveis de siltes sempre foram maiores que as argilas e variam pouco com e sem defloculante, (Tabela 4.6), o solo é siltoso com pouca ou nenhuma cimentação, com poucos óxidos e presença de argilominerais como ilita que ajudam no ganho de coesão, retenção de água e plasticidade.

Apresentam-se na Figura 4.14 as granulometrias dos primeiros três metros que correspondem à zona superior do perfil onde a agregação e os índices de vazios são os maiores, devido à grande alteração gerada pelo intemperismo tropical. Nessa camada o teor de agregados obtido da diferença entre as curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante é de aproximadamente 27%.

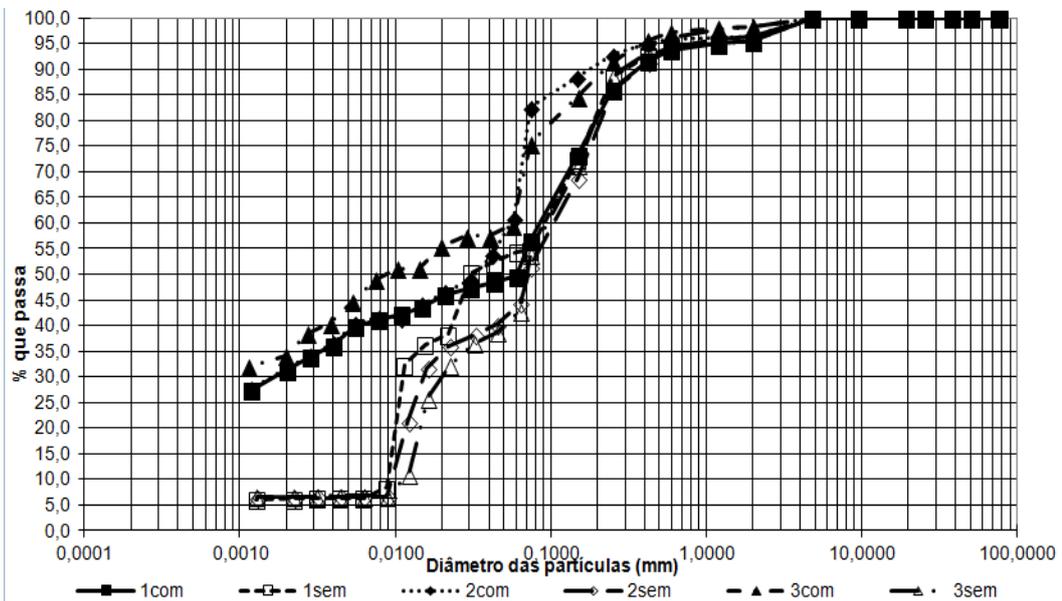


Figura 4.14 Curvas granulométricas (1 m a 3 m).

A Figura 4.15 contém as curvas granulométricas dos quatro metros seguintes do perfil de intemperismo analisado (4 m a 7 m). Verifica-se nessa camada o aumento nas quantidades de argila com e sem o uso de defloculante para as profundidades de 4 m e 5m e apenas com o uso de defloculante para as camadas de 6 m e 7 m. Conserva-se o valor médio de siltes na camada.

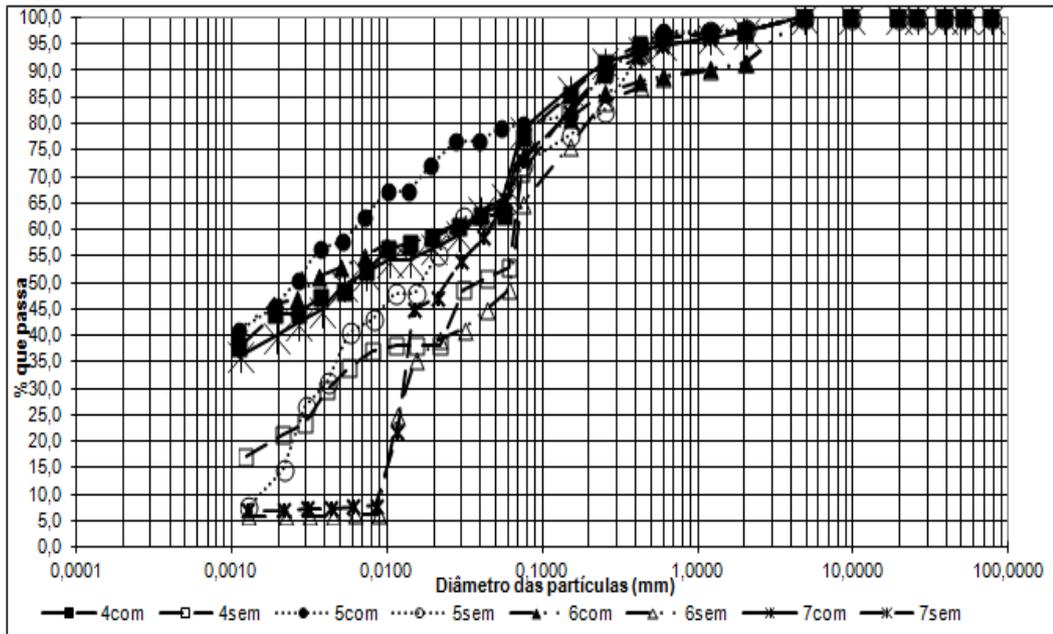


Figura 4.15 Curvas granulométricas (4 m a 7 m).

A Figura 4.16 coloca em evidência uma queda progressiva e acentuada das quantidades de argila e um aumento no teor de silte ao se atingir as profundidades de 8 m e 9 m. O teor de agregados sofre grande redução nessa camada de transição, em especial ao se atingir a profundidade de 9 m.

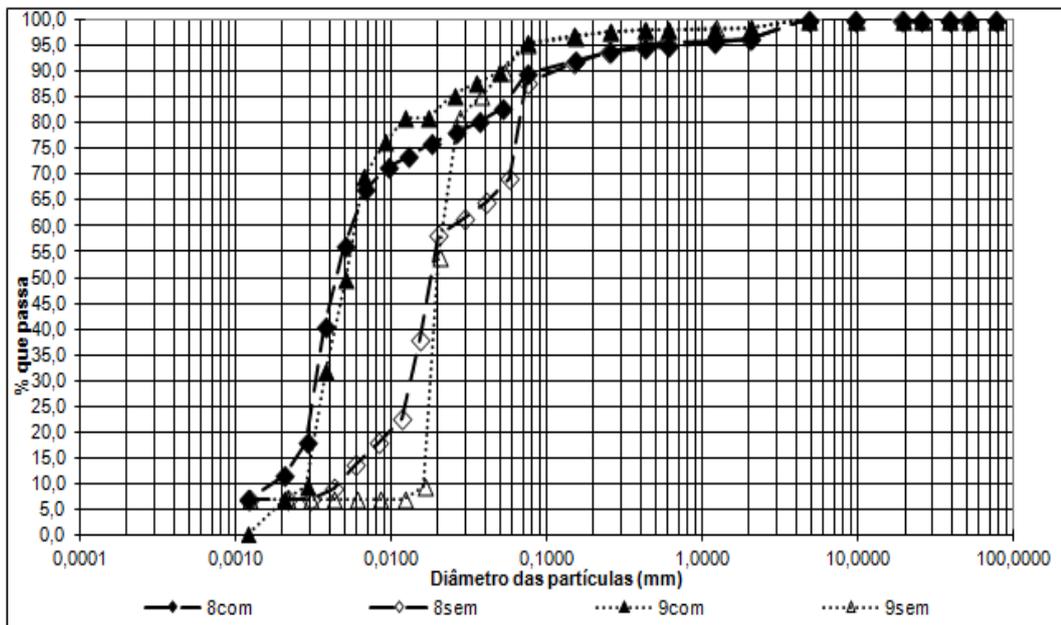


Figura 4.16 Curvas granulométricas (8 m a 9 m).

Para finalizar as análises das texturas do perfil de solo estudado, a Figura 4.17 apresenta as curvas granulométricas obtidas com e sem o uso de defloculante para os

últimos três metros estudados, profundidades de 10 m, 11 m e 12 m. Essa camada foi considerada como constituída de solo saprolítico. Estas profundidades não apresentam diferenças notáveis entre os ensaios realizados com e sem o uso de defloculante o que é reflexo de um nível de alteração por intemperismo químico tropical muito baixo onde a agregação e cimentação são quase nulas. Essa camada de solo saprolítico tem uma composição textural mais homogênea e uniforme e o solo cor roxa.

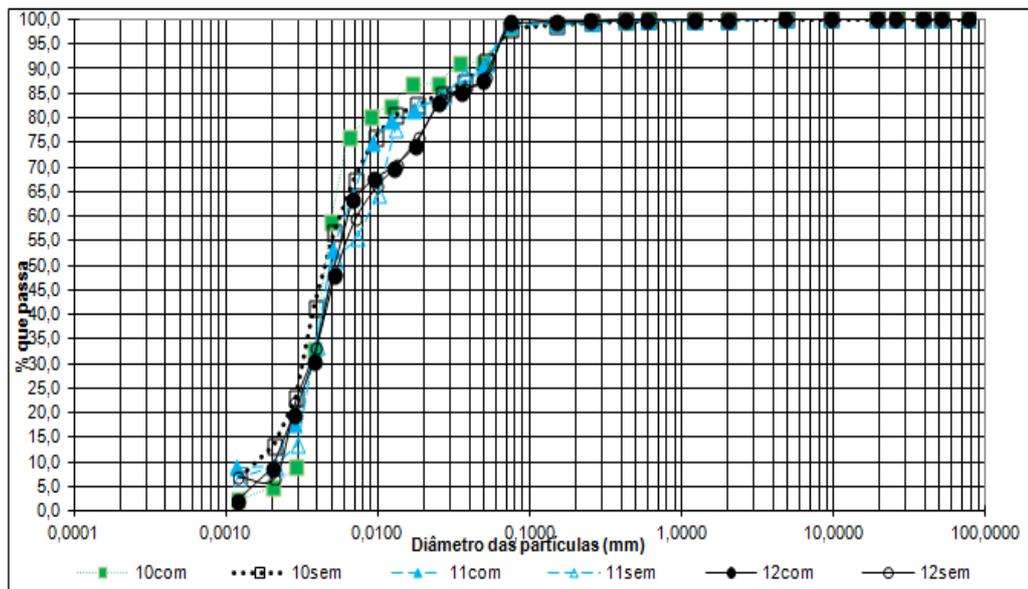


Figura 4.17. Curvas granulométricas (10 m a 12 m).

4.2.5 CLASSIFICAÇÃO

Baseando-se na granulometria e plasticidade apresentada ao longo do perfil de solo estudado e considerando o fato que a classificação e comportamento dos solos são influenciados pela quantidade de finos neles presentes, realizaram-se as classificações pelos quatro métodos mencionados na metodologia obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.7. As classificações foram realizadas vislumbrando-se o entendimento do comportamento do solo.

Tabela 4.7 Classificações do perfil do solo.

Pz [m]	Ll [%]	Ip [%]				Classificação				
			silte	argila	passa #200	SUCS	IG AASHTO	AASHTO	MCT expedida	carta Casagrande
1	37	9	15,9	33,8	56,7	CL	4	A-4	LA-LA'	ML
			48,0	6,3	54,8	ML-CL	3	A-4	LA-LA'	ML
2	36	9	27,7	34,1	82,6	ML-CL	8	A-4	LA-LA'	CL
			37,1	6,5	51,6	SM	3	A-4	LA-LA'	CL
3	36	9	21,4	38,6	75,5	ML-CL	7	A-4	LA'	CL
			35,5	6,7	53,8	SM	3	A-4	LA'	CL
4	39	9	18,7	44,0	77,3	ML-CL	8	A-4	LA'	CL
			27,8	24,9	70,8	ML-CL	7	A-4	LA'	CL
5	39	11	29,0	51,0	79,7	CL	9	A-6	LA'-LG'	CL
			44,2	20,4	72,1	ML	8	A-6	LA'-LG'	CL
6	40	11	18,2	47,3	74,0	CL	8	A-5	LA'-LG'	CL
			42,8	5,9	64,7	ML	6	A-5	LA'-LG'	CL
7	45	10	24,0	42,5	78,7	CL	10	A-5	LA'	CL
			59,4	7,0	72,8	ML	9	A-5	LA'	CL
8	45	13	66,0	17,9	89,5	ML	14	A-7-5	NA'/NG-NS'	ML
			63,0	7,0	87,9	ML	14	A-7-5	NA'/NG-NS'	ML
9	45	16	82,3	9,3	95,5	ML	18	A-7-6	NA'/NG-NS'	ML
			84,9	7,3	95,2	ML	18	A-7-6	NA'/NG-NS'	ML
10	46	15	82,4	8,8	98,4	ML	19	A-7-5	NA'/NG-NS'	ML
			74,5	19,6	98,1	ML	18	A-7-5	NA'/NG-NS'	ML
11	36	11	76,5	17,7	99,1	ML	12	A-4	NA'/NG-NS'	ML
			81,1	11,2	98,9	ML	12	A-4	NA'/NG-NS'	ML
12	38	11	69,7	19,4	99,3	ML	13	A-4	NA'/NG-NS'	ML
			82,8	6,5	99,1	ML	13	A-4	NA'/NG-NS'	ML

A classificação SUCS conduziu a resultados que mostram que o uso ou não do defloculante conduz o solo a classificações distintas. Com o uso do defloculante observa-se que ao longo da profundidade o perfil de solo no trecho profundamente intemperizado varia entre CL, CL-ML ou ML. No entanto, sem o uso do defloculante os solos que compõem essa mesma zona passa a enquadrar-se como ML, ML-CL ou SM, fazendo assim sobressair uma granulometria mais grossa para o solo natural. Cabe salientar que nessa parte do perfil onde o solo encontra-se profundamente intemperizado, a fração silte presente no solo sem o uso de defloculante e que desaparece no solo com o seu uso corresponde a partículas de argila agregada, e como tal possuem maior energia de superfície que a maioria dos siltes propriamente ditos o que proporciona a necessidade de um olhar diferenciado quando se avalia o comportamento desses solos.

Observa-se ainda dos resultados mostrados nessa tabela, que como esperado, devido à ausência de agregados, ao se adentrar na zona de transição e no solo saprolítico deixa de ocorrer diferença entre as classificações realizadas com as amostras submetidas a análise granulométrica com e sem o uso de defloculante.

A classificação realizada pela AASHTO considera distinções quanto a textura e plasticidade e permite uma qualificação estimativa do comportamento mecânico do solo para obras rodoviárias. Observa-se, no entanto, que ela conduziu no presente caso o solo saprolítico localizado nas profundidades de 11 m e 12 m à mesma classificação do solo tropical profundamente intemperizado localizado entre 1 m e 4 m de profundidade. No entanto, como se verá nas análises de comportamento esses solos se comportam de modo distinto, o que requer aprofundamento nas análises das classificações realizadas por esse método quando se está a trabalhar com solos tropicais profundamente intemperizados.

Os resultados da classificação com a carta de Casagrande (1948) guardam similaridade com os obtidos pela classificação SUCS, sendo que esta, por considerar também a textura, torna-se mais abrangente para previsão de comportamento dos solos.

Os resultados da classificação (Tabela 4.7 e Tabela 4.8) apresentaram-se condizentes com as características do perfil de solo ao classificar os sete primeiros metros como laterítico e os demais como não laterítico. Esse sistema de classificação, mesmo o expedito, avalia o comportamento do solo o que o torna mais interessante do ponto de vista prático, em especial quando se trata de solo finos. Porém, ele deixa a desejar quando se pretende avaliar a textura propriamente dita, embora, como se verá a seguir, o enquadramento textural que essa classificação realiza corresponde ao oriundo da classificação unificada em especial quando se trata do solo profundamente intemperizados não submetido a tratamento químico.

Tabela 4.8 Classificação MCT.

Pz profundidade[m]	ct (mm)	pn (mm)	c'	MCT
1	0,57	2	0,84	LA-LA'
2	0,73	1	0,96	LA-LA'
3	1,44	1,5	1,28	LA'
4	1,34	1,5	1,25	LA'
5	1,76	1,7	1,38	LA'-LG
6	1,73	1,8	1,37	LA'-LG
7	1,29	1,3	1,23	LA'
8	1,93	2	1,42	NA'/NG-NS'
9	2,16	2,2	1,48	NA'/NG-NS'
10	2,72	2,3	1,59	NA'/NG-NS'
11	1,99	2,5	1,44	NA'/NG-NS'
12	1,8	2,3	1,39	NA'/NG-NS'

Onde Ct é a contração média avaliada nos corpos, pn é a penetração da agulha e c' é o coeficiente de contração.

Os resultados dessa classificação para os primeiros quatro metros enquadram o solo como uma areia argilosa a pouco argilosa laterítica, correlacionando-se bem com a classificação unificada realizada para a amostra sem o uso de defloculante nas análises granulométricas. Nos três metros seguintes, 5 m a 7 m no perfil, o solo foi classificado como uma areia argilosa a argila arenosa, mais uma vez em acordo com a classificação unificada. A partir dos 8 m de profundidade o solo foi classificado, como esperado, como não laterítico. No entanto, o seu enquadramento textural tende a se afastar do unificado.

Das análises nos resultados apresentadas, verifica-se que os métodos SUCS e AASHTO e mesmo a carta de Casagrande estão a requerer maior reflexão e análise para que possam ser aplicados com maior grau de acerto na previsão do comportamento dos perfis de solos tropicais. O método MCT por levar em consideração o comportamento do solo possibilita maior nível de acerto nessas previsões e separar os solos de comportamento laterítico daqueles de comportamento não laterítico já constitui-se em característica relevante.

Em síntese, de maneira semelhante a Guimarães (2002), pode-se dizer que existe uma boa relação das propriedades físicas com as características mineralógicas e microestruturais, sendo que o conjunto de resultados permite dividir o perfil nos seguintes horizontes considerando-se o solo em estado natural:

- 0 a 4 m areia silto-argilosa laterítica, porosa, com predominância de gibbsita, presença de macroporos e muitos agregados; IP médio de 9; zona de intensa hidrólise e lixiviação e em menor medida, acumulação . Depois dos 4 m começa a queda do nível de intemperismo.
- 5 a 7 m uma zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar a transição seguida do residual mais jovem a partir da profundidade de 8 m. Neste trecho o teor de gibbsita e a macroporosidade vão paulatinamente diminuindo, enquanto aumentam a presença de caulinita e surge a ilita a 6 m de profundidade o que faz com que o Ip médio cresça para 11. Esse horizonte pode ser classificado como argila ou argiloso laterítico com defloculante ou um silte argiloso sem defloculante. A profundidade de 8 m corresponde ao começo da zona de transição.

- 8 a 10 m é um solo de transição. Zona de transição com aumento do IP médio para 15; zona de composição heterogênea com diversas texturas como heranças do processo de alteração pedogenética.
- 11 e 12 m um solo residual jovem, solo saprolítico, que assume granulometria e textura mais siltosa; distribuição de poros mais homogênea e menor Ip médio (11). Trata-se de um solo siltoso não laterítico cabendo destacar que o estudo do perfil de intemperismo se limitou à profundidade de 12 m.

Dentro deste perfil de solo natural os estudos mais detalhados se concentraram em 4 profundidades: 2 m, 5 m, 8,6 m e 11,6 m. As Tabela 4.9 e Tabela 4.10 apresentam um resumo das propriedades apresentadas neste capítulo para essas quatro profundidades.

Tabela 4.9 Granulometria do solo para as quatro profundidades estudadas.

MATERIAL*	granulometria com defloculante				granulometria sem defloculante			
	2m	5m	8,6m	11,6m	2m	5m	8,6m	11,6m
	% do material	% do material	% do material	% do material	% do material	% do material	% do material	% do material
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,0<Pedregulho fino<6,0	3,5	2,4	3,7	0,0	3,5	2,4	3,7	0,0
0,6<Areia	0,6	0,4	1,4	0,1	2,3	1,0	0,6	0,1
0,2<Areia média<0,6	5,2	11,8	2,0	0,4	16,8	16,6	3,0	0,7
0,06< Areia fina <0,2	28,9	5,4	9,0	5,2	33,8	15,4	22,7	6,9
0,002 < Silte < 0,06	27,7	29,0	66,0	76,5	37,1	44,2	63,0	81,1
Argila < 0,002	34,1	51,0	17,9	17,7	6,5	20,4	7,0	11,2
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 4.10 Propriedades e índices físicos dos solos estudados nas quatro profundidades.

Variáveis de caracterização													mineralogia %							
Pz [m]	wn [%]	Y [kN/m ³]	Yd [kN/m ³]	Gs	e	n [%]	sr [%]	Lp	Ll	Ip	Ia	Ic	gibsitia	caolinita	quarzo	hematita	goiita	amastasto	rutílio	ilita
2	26,5	13,39	10,58	2,73	1,53	60,4	47,4	27	36	9	0,27	1,07	41,7	6,9	29,4	6,9	3,4	6,9	4,9	0
5	28,6	14,17	11,02	2,76	1,45	59,2	54,2	29	39	11	0,21	1,03	36,6	11,7	29,4	10,8	0	7,4	4,1	0
8,6	31,7	17,51	13,30	2,86	1,11	52,6	81,7	32	45	13	0,73	1,01	3,7	41,1	9,4	13,7	0	5,1	6,6	7,9
11,6	32,0	18,55	14,05	2,94	1,05	51,3	89,4	25	36	11	0,60	0,33	0	37,1	22,5	14,1	0	0	0	11,2

Para efeito de comparação são apresentadas nas Figura 4.18 e Figura 4.19 as curvas granulométricas obtidas respectivamente com e sem o uso de defloculante para essas quatro profundidades estudadas.

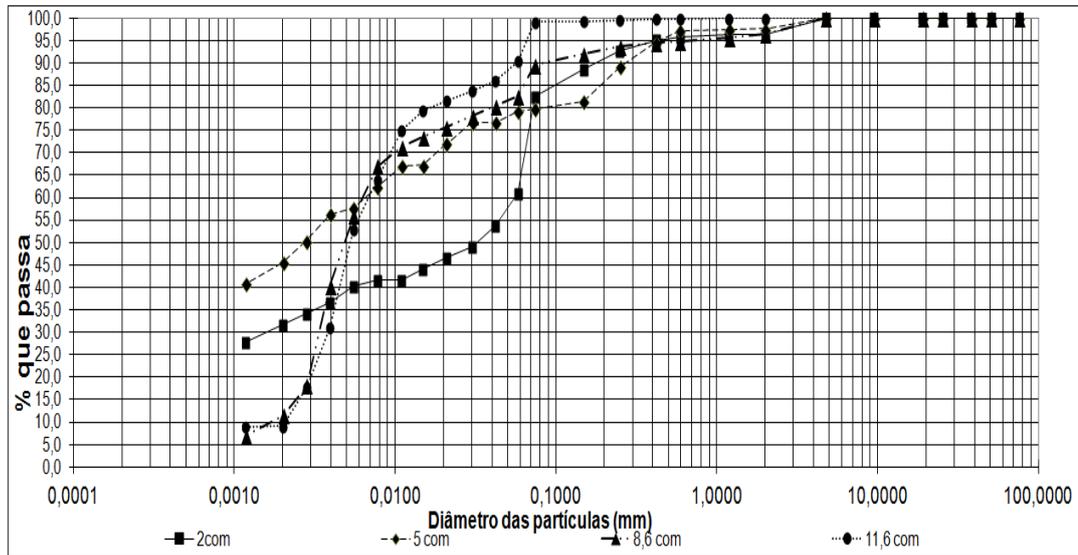


Figura 4.18 Curvas granulométricas das profundidades estudadas com uso de defloculante.

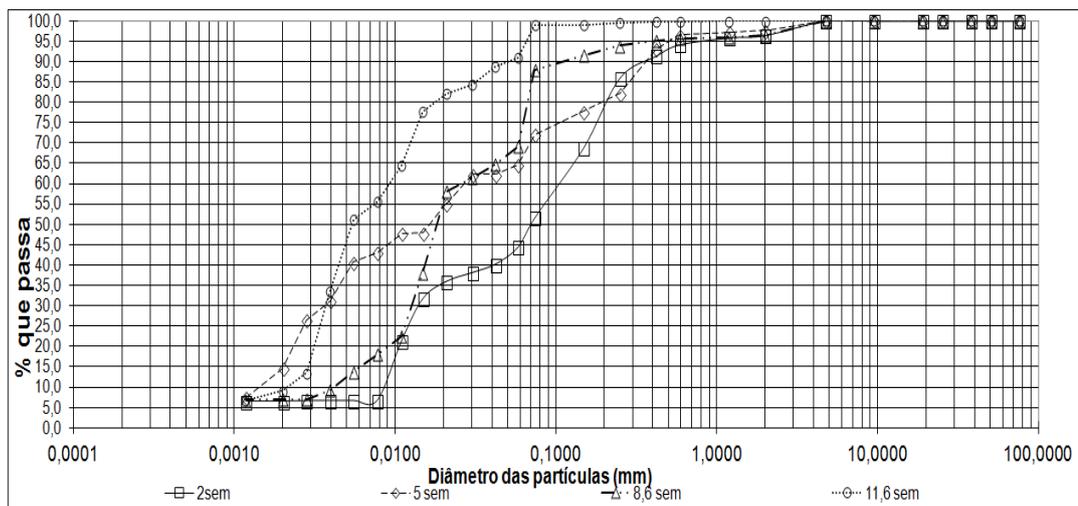


Figura 4.19 Curvas granulométricas das profundidades estudadas sem usar defloculante.

4.3 COMPACTAÇÃO

A compactação dinâmica foi realizada de acordo com o indicado na metodologia, considerando-se na compactação dinâmica as especificações apresentadas na Tabela 4.11 Na compactação estática, buscou-se reproduzir as condições de peso

específico aparente seco para umidades pré-definidas fazendo-se uso de uma prensa calibrada para deslocar-se na velocidade de 1 mm / min.

Tabela 4.11 Especificações adotadas na compactação dinâmica.

Energia	p. soquete [kg]	h [cm]	n	N
Normal	2,5	30,5	3	26
Intermediária	4,536	45,7	3	21
Modificada			3	44

Apresenta-se a seguir (Tabela 4.12) um resumo para as quatro profundidades estudadas (2, 5, 8,6 e 11,6 m) dos pesos específicos aparentes secos máximos, umidade ótima, ótima mais 2% e ótima menos 2% e os índices de vazios para as três energias, obtida na compactação dinâmica e reproduzida na estática.

Tabela 4.12 Condições referentes às compactações dinâmica e semi-estática.

Profundidade [m]	Energia	ω_{op} [%]		Índice de vazios		γ_d [kN/m ³] ω_{op}		γ_d [kN/m ³] ω_{op-2}		γ_d [kN/m ³] ω_{op+2}	
		Dinamico	Semi Estatico	Dinamico	Semi Estatico	Dinamico	Semi Estatico	Dinamico	Semi Estatico	Dinamico	Semi Estatico
		2	Normal	23,9	23,7	0,73	0,73	15,44	15,45	15,14	15,14
	Intermediária	21,1	21,1	0,66	0,66	16,13	16,12	15,10	15,15	15,52	15,57
	Modificada	19,1	19,0	0,57	0,58	16,98	16,95	16,64	16,70	16,38	16,45
5	Normal	23,5	23,3	0,78	0,77	15,18	15,23	14,82	14,77	14,86	14,86
	Intermediária	20,1	20,6	0,68	0,68	16,11	16,08	14,52	14,41	15,72	15,81
	Modificada	19,5	19,6	0,60	0,60	16,85	16,68	15,89	15,75	16,43	16,24
8,6	Normal	22,4	22,1	0,89	0,89	14,83	14,87	14,69	14,65	14,61	14,61
	Intermediária	21,0	21,1	0,75	0,76	15,98	15,96	15,81	15,80	15,71	15,70
	Modificada	19,4	19,0	0,71	0,71	16,36	16,42	16,00	15,99	16,00	15,99
11,6	Normal	24,1	24,3	0,86	0,86	15,50	15,42	15,24	15,21	15,31	15,38
	Intermediária	23,0	22,5	0,80	0,79	16,04	16,11	16,09	16,06	15,61	15,35
	Modificada	20,3	19,5	0,76	0,76	16,40	16,44	16,19	16,11	16,14	16,07

A primeira análise feita sobre os dados da Tabela 4.12 está relacionada com a granulometria, mineralogia e plasticidade do solo, sendo evidente o fato que aquelas profundidades com maior conteúdo de finos, em especial, maior conteúdo de argilas ou siltes plásticos apresentam menores pesos específicos aparentes secos máximos (γ_d). Como tendência, observa-se que esse parâmetro (γ_d), considerando-se a zona profundamente intemperizada (2 m, 5 m e 8,6 m), se torna menor com o aumento da profundidade ao se comparar a mesma energia (Figura 4.20). Destaca-se que na energia intermediária os resultados formam muito semelhantes e que ao passar para o solo saprolítico, profundidade de 11,6 m, observa-se que essa tendência de comportamento é interrompida. Verifica-se ainda nessa Figura que os solos provenientes das

profundidades de 8,6 m e 11,6 m apresentam inclinação dos ramos seco e úmido semelhantes, porém, distintos dos verificados para os solos coletados a 8,6 m e 11,6 m de profundidade no perfil de intemperismo.

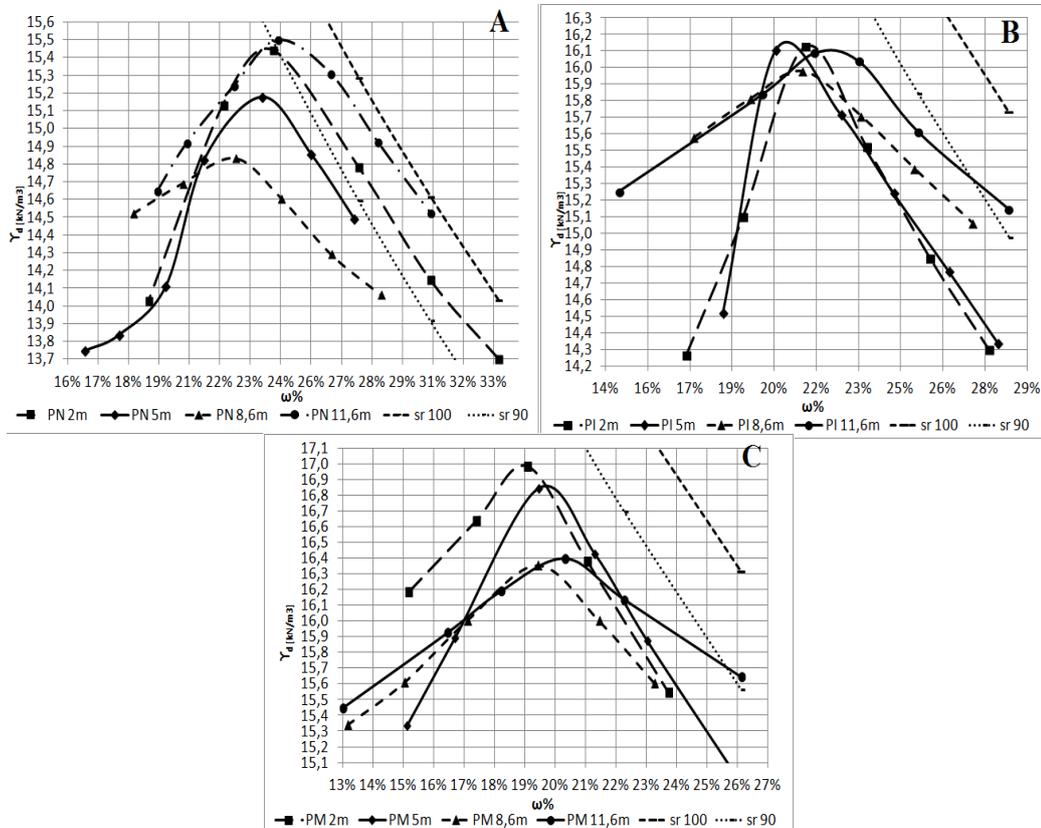


Figura 4.20 Curvas de compactação dinâmica.

Em relação à umidade ótima (Figura 4.20), observa-se que para a energia Proctor normal ela aumenta com o aumento do peso específico. Em relação à profundidade a umidade ótima diminui com seu aumento.

Nas energias intermediárias e modificada a umidade ótima varia pouco em função da profundidade, destacando-se que na energia modificada ela passa a comportar-se como esperado, menor peso específico aparente seco máximo maior a umidade ótima. É evidente que estar ou não em correspondência ao esperado é discutível, mas representa evidencia do efeito das alterações químico-mineralógicas e estruturais presentes no perfil de solo sobre o resultado da compactação. Nesse sentido, é possível estabelecer a hipótese de que o maior teor de agregado, com agregados mais estáveis nos solos mais superficiais, faz com que o teor de umidade ocupando os seus interiores seja maior e o que ocupa os macroporos se torna de modo relativo menor

fazendo com que a umidade ótima se amplie. Os resultados obtidos para a energia Proctor modificado corroboram com essa ideia, pois o maior nível de quebra de agregados imposto ao solo contribui para que se elimine esse efeito, com o solo retornando ao comportamento esperado, (Figura 4.20).

Na energia intermediária, criou-se uma situação na qual todas as profundidades apresentaram na condição ótima densidades muito próximas, mas se observadas as curvas de compactação obtidas para as energias normal e modificada se percebe que a variação do peso específico aparente seco máximo com a profundidade tende a se inverter nas duas profundidades o que explica os resultados obtidos para a energia intermediária.

Complementando as análises anteriores, a Figura 4.20 mostra que as diferenças geradas pelo intemperismo nas propriedades do solo se refletem de modo visível nas formas das curvas, observando-se que aquelas com maiores quantidades de finos plásticos como siltes (8,6 m e 11,6 m) são mais abertas, como se observa na Figura 4.20(B). Também se podem observar nos gráficos que embora os solos superiores (2 m e 5 m) sejam finos com altos conteúdos de argilas, devido ao efeito do intemperismo gerando agregações, eles, quando compactados apresentam os ramos seco e úmido com inclinação mais íngreme (Figura 4.20).

Os aspectos mencionados anteriormente sobre a maior ou menor inclinação dos ramos tanto seco e úmido das curvas de compactação, têm importância para mensurar o efeito da mudança do solo ao longo do perfil de intemperismo, impactando no comportamento hidromecânico. Assim, as curvas mais achatadas requerem grandes mudanças nos conteúdos de umidade para variações significativas do γ_d , enquanto nas curvas mais íngremes, essas mudanças se dão para menores variações no teor de umidade (Figura 4.20). Esses comportamentos devem relacionarem-se com a sensibilidade da resistência do solo às variações de umidade e por consequência às variações de sucção ou textura no que tange aos solos agregados.

Na Figura 4.20 observa-se ainda a tendência de paralelismo entre o ramo úmido e as curvas de saturação para os solos mais intemperizados (2 m e 5 m). Para o solo de transição (8,6 m) e saprolítico esse paralelismo é perdido ocorrendo maior suavização da curva. A análise desse comportamento distinto entre os solos profundamente intemperizados e aqueles menos intemperizados deve, em princípio ser feita com

fundamento na distribuição dos poros, já que para os solos tropicais profundamente intemperizados a condição agregada que se conserva ainda quando compactado permite a permanência de volume significativo de ar na macroporosidade conduzindo a geração de pressão neutra positiva a valores não muito distintos com o aumento da umidade de compactação. Já nos solos menos intemperizados, solos saprolíticos a condição homogênea da estrutura e porosidade resulta quando da compactação em maior aumento da pressão neutra positiva com o aumento do teor de umidade do solo tornando menor a energia efetiva de compactação.

A Figura 4.21 apresenta as relações entre os pesos específicos aparentes secos e os índices de vazios correspondentes às quatro profundidades estudadas ao longo do perfil de intemperismo. O principal objetivo desse gráfico é mostrar que a variação do peso específico dos sólidos ao longo de um perfil de intemperismo intervém diretamente no valor do peso específico aparente seco e na porosidade devendo ser considerado ao se explorar uma jazida.

Observa-se que as maiores variações em γ_d e nos índices de vazios (e) quando acontecem variações das umidades, ocorrem no início do perfil, ou seja, na zona superior mais intemperizada, para qualquer energia (Figura 4.21). Para o solo proveniente da profundidade 8,6 m os resultados tendem a se aproximar dos obtidos para o solo saprolítico (11,6 m) em termos de inclinação dos ramos seco e úmido. Na Figura 4.21 as variações entre as curvas obtidas para as diferentes profundidades refletem as diferenças nas densidades reais dos grãos.

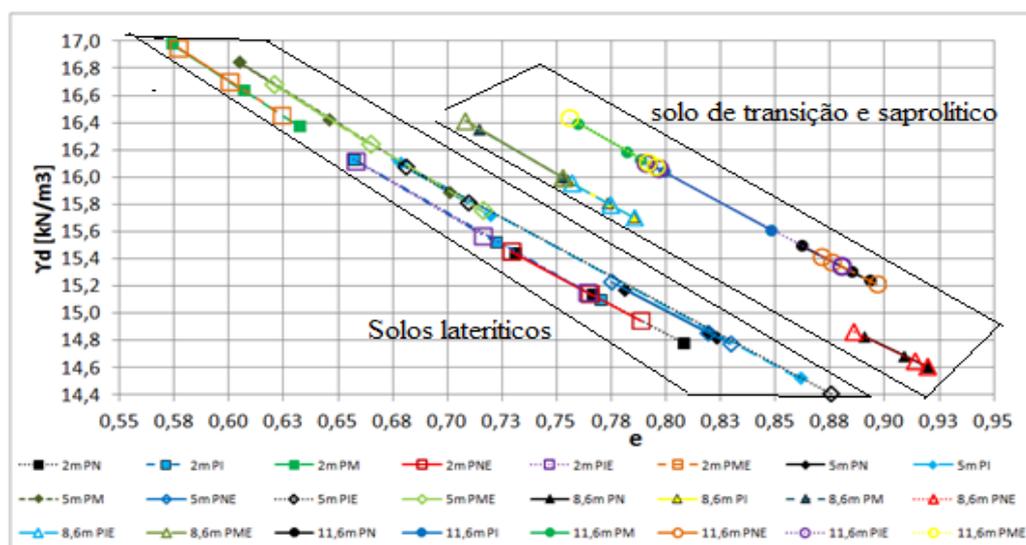


Figura 4.21 Variação do peso específico e do índice de vazios dos solos compactados.

Na Figura 4.21, PN - Proctor normal, PI - Proctor intermediário, PM - Proctor modificado, PNE - Proctor normal para o solo compactado estaticamente, PIE - Proctor intermediário para o solo compactado estaticamente e PME - Proctor modificado para o solo compactado estaticamente.

Esses resultados mostram ainda (Figura 4.21), se considerados os maiores e os menores valores de índice de vazios oriundos das curvas de compactação, que nos solos profundamente intemperizados (2 m e 5 m), tem-se, devido às maiores inclinações dos ramos seco e úmido das curvas de compactação uma variação mais ampla que no solo de transição (8,6 m) e no solo saprolítico (11,6 m).

A compactação estática também intitulada semi-estática, conforme exposto no item sobre materiais e métodos, objetivou a reprodução dos pesos específicos utilizando-se uma prensa a velocidade de compactação constante. Logo, não cabe comparar as formas das curvas de compactação, pois o que se buscou foi reproduzir as curvas obtidas por meio da compactação dinâmica. A ideia da reprodução semi-estática do estado de compactação com energia dinâmica volta-se para a avaliação da estrutura imposta pelo método de compactação sobre a estrutura e por consequência sobre o comportamento hidromecânico.

Para melhor visualização dos resultados de compactação pelos dois métodos a Figura 4.22 apresenta as famílias de curvas de compactação dinâmica e estática para cada profundidade. E as curvas de variação dos índices de vazios para cada profundidade de acordo com o método e energia de compactação estão mostrados na Figura 4.23.

Dada à variação verificada para a densidade relativa dos grãos ao longo do perfil optou-se por também analisar-se as curvas de compactação em termos da variação do índice de vazios em função da umidade de compactação (Figura 4.23). Observa-se nessa figura a maior sobreposição dos ramos úmidos de compactação quando do tratamento dos dados em termos de índice de vazios. Nessa figura o grande destaque volta-se para o fato de que para a profundidade de 8,6 m o ramo úmido obtido para a energia Proctor normal se distancia dos obtidos para a energia intermediária e modificada apontando para uma maior fragilidade dos agregados presentes nessa profundidade.

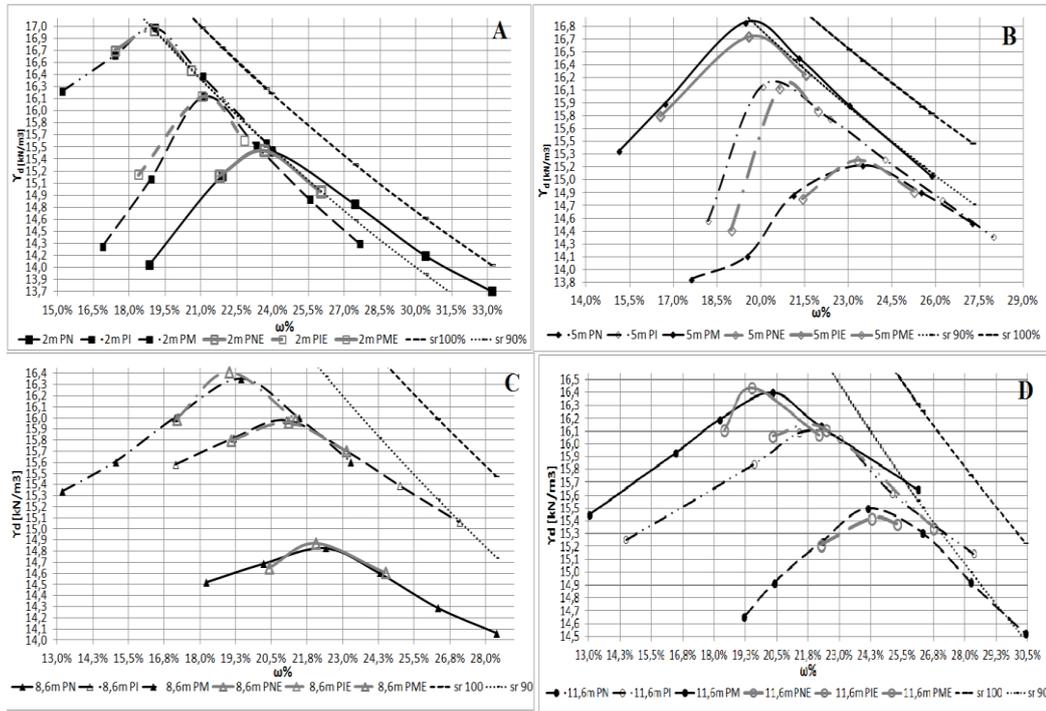


Figura 4.22 Curvas de compactação dinâmica e estática por profundidade.

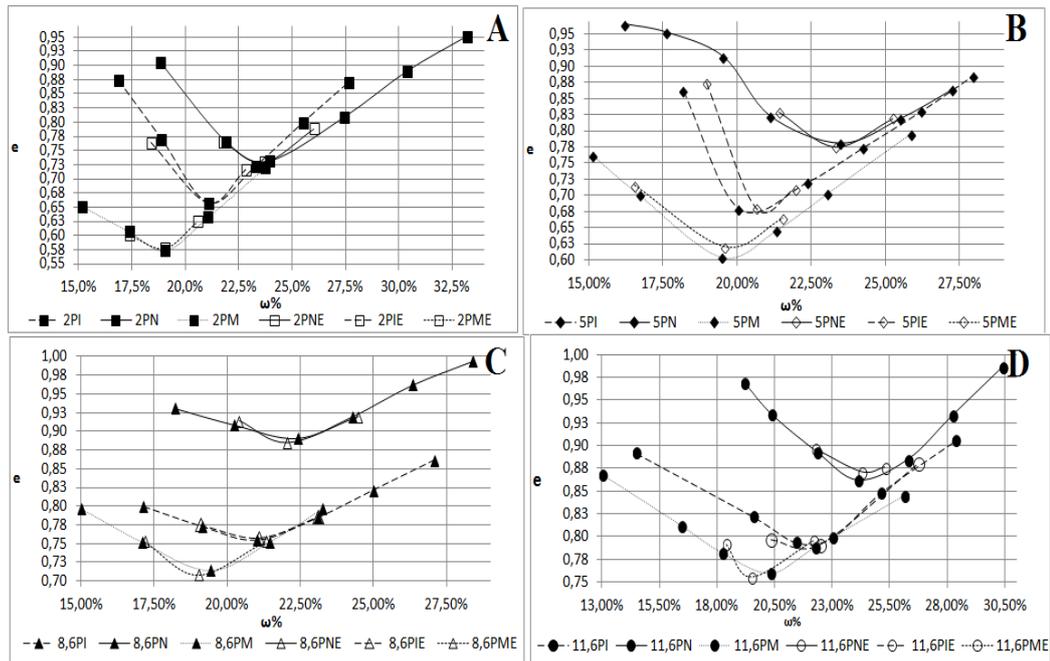


Figura 4.23 Variação dos índices de vazios com a unidade compactação.

As curvas obtidas em função do índice de vazios (Figura 4.23) permitem supor que as permeabilidades e resistências no ramo úmido não serão muito dependentes da energia de compactação, já no ramo seco, a interferência da energia na forma da curva aponta para a sua influência no comportamento hidromecânico do solo.

4.4 MICROSCOPIA

As análises microestruturais apresentadas nesse item são de grande relevância, pois guardam relação direta com a textura explicando as diferenças entre as curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante e suas variações ao longo do perfil, a influência mineralógica e estrutural nas propriedades e comportamentos dos solos analisados e as variações de peso específico aparente seco (γ_d) e de porosidade dos solos estudados na condição natural e compactada. Em especial as análises microestruturais permitem entender a distribuição de poros no solo ao longo do perfil de intemperismo. Observa-se nos estudos realizados nesse item a relação clara entre os índices de vazios e porosidade presentes no solo e as áreas de poros em relação à área totais estimadas a partir das análises das imagens.

Os resultados das avaliações ópticas tem uma fase qualitativa realizada sobre as imagens tomadas com lupas nas quais as principais variáveis da observação foram os macrocomponentes como a textura, agregação e grãos. Uma parte da análise qualitativa foi feita com o microscópio eletrônico de varredura (MEV). As observações microestruturais realizadas com o MEV foram também empregadas em análises semiquantitativas onde se observou características tanto macro como micro a partir das diferentes ampliações das imagens realizadas.

Como resultados das observações na lupa óptica obtiveram-se mais de 200 imagens do solo em estado natural sendo possível a avaliação metro a metro até a profundidade de 12 m com aumentos de 50, 100, 200 e 400 vezes. Após a análise qualitativa dessas imagens selecionaram-se 33 delas para análise semiquantitativa. Para as amostras compactadas obtiveram-se um total de 864 imagens (216 por profundidade), considerando-se três condições de umidade para as 3 energias e os dois métodos de compactação, dinâmico e estático. Partes dessas imagens foram igualmente submetidas a análises semiquantitativas.

O MEV também foi utilizado na análise do solo em estado natural e compactado dinamicamente e estaticamente. Por problemas de metalização não foi possível analisar as amostras naturais coletadas a 6 m, 9 m, 10 m e 12 m de profundidade. Cabe salientar que foram coletados pequenos blocos indeformados metro a metro ao longo de todo o perfil de intemperismo. As imagens obtidas foram analisadas qualitativamente e para os aumentos de 500 e 10.000 vezes foram efetuadas análises semiquantitativas centrado-

se respectivamente nas particularidades macro e micro. Destaca-se que tanto na microscopia ótica por meio de lupa eletrônica como no MEV, as observações consideradas em escala macro votaram-se para análises de macroporosidades e de agregações presentes no solo, enquanto as observações em escala micro foram direcionadas para a observação de partículas e da microporosidade.

4.4.1 ESTRUTURA DO SOLO EM ESTADO NATURAL

No estudo qualitativo da composição macro das imagens do solo natural por meio da lupa óptica, verificou-se nos solos uma aparência agregada visível em todos os aumentos, onde se percebe o fato que aqueles grandes agregados apresentam distribuição irregular, caótica, impossibilitando uma descrição exata, pois ela se espalha na imagem de maneira heterogênea, concentrada em zonas. A configuração e distribuição dos vazios são variadas indo de vazios isolados a cadeias de vazios interagregados. Essa aparência do solo vai mudando com o aumento da profundidade passando a ocorrer menos e menores agregados e macroporos. A variabilidade da distribuição e tamanho dos poros tende a diminuir com o aumento da profundidade. Este comportamento descrito é visto na Figura 4.24 onde nos círculos foram assinalados alguns agregados e alguns minerais de quartzo visíveis, e nos quadrados observa-se os vazios isolados, grandes e pequenos, sejam eles interconectados ou interagregados. Essa figura coloca ainda em evidência uma clara macroporosidade na amostra coletada a 1 m de profundidade. Embora ainda presente, ocorre menor macroporosidade entre os agregados na amostra coletada a 7 m de profundidade.

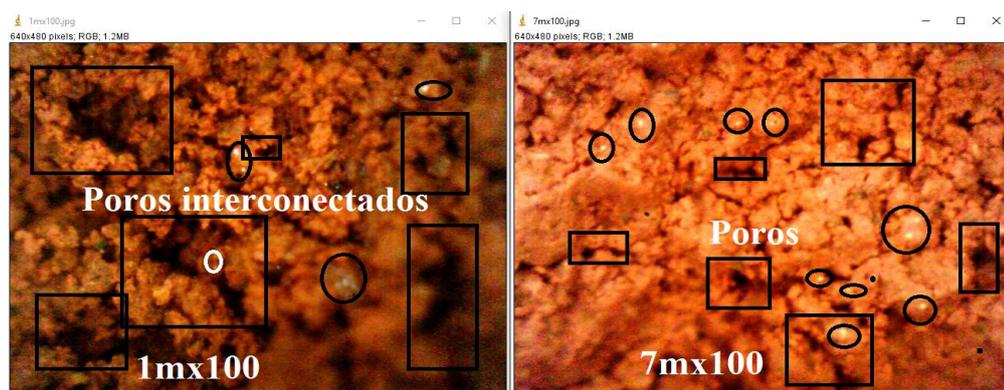


Figura 4.24 Configuração macro do solo natural.

Observa-se na Figura 4.25 e na Figura 4.26 a presença de macroporosidade ao longo do perfil, macroporosidade que tende a diminuir com o aumento da profundidade.

As imagens constantes da Figura 4.26 obtidas para a profundidade de 9 m mostra que nessa camada os macroporos antes existentes dão lugar a uma distribuição homogênea dos poros. Nas imagens é evidente para cada horizonte de solo, laterítico e saprolítico, como a redução do intemperismo, químico ou físico respectivamente, gera menor alteração apresentando tendência a uma configuração homogênea.

A Figura 4.24 até a Figura 4.27 permitiram a avaliação qualitativa da microestrutura do solo. Fazendo-se a análise dessas imagens por meio do Programa ImageJ foi possível fazer uma avaliação semiquantitativa dos poros presentes no solo ao longo do perfil (Tabela 4.13). No caso dessas imagens oriundas de observação na lupa ótica as áreas foram avaliadas em termos de pixels considerando-se a imagem total com dimensão de 640x480 pixels. Na Tabela 4.13 observam-se as áreas dos poros menores e dos poros maiores.

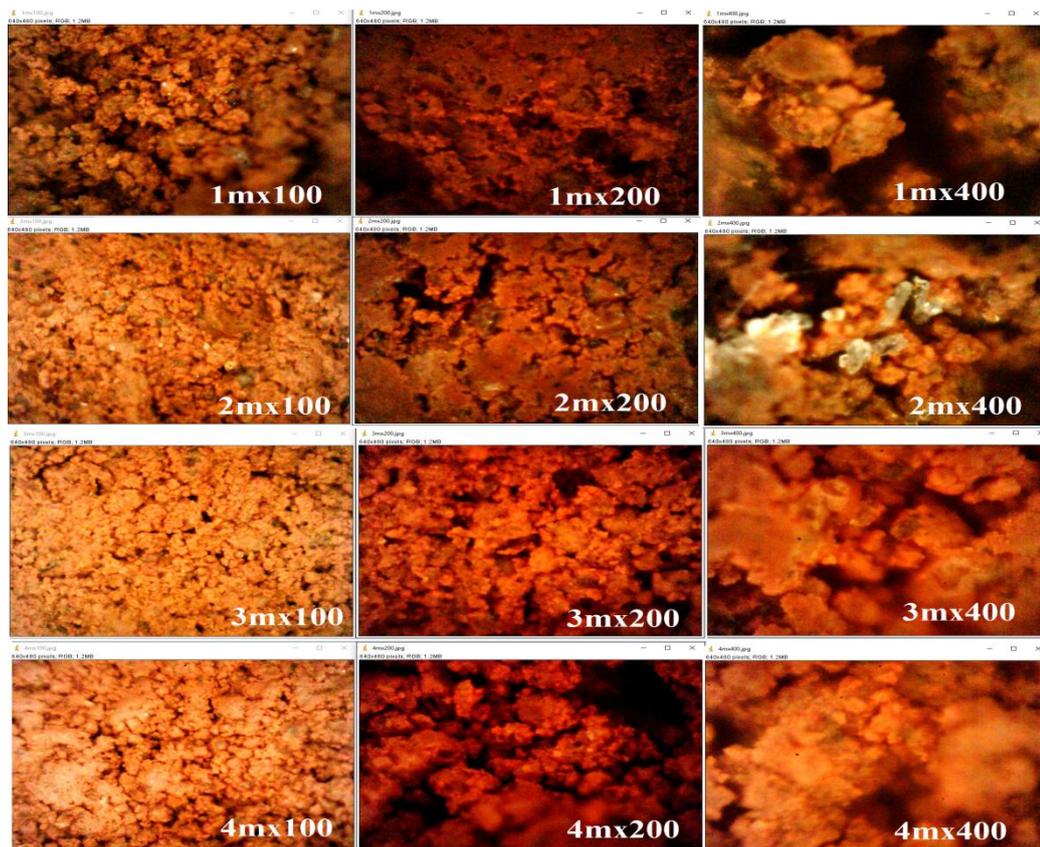


Figura 4.25 Microestrutura do solo natural coletado de 1 m a 4 m de profundidade observada por meio de lupa ótica.

A Figura 4.27 mostra nas imagens obtidas para o solo saprolítico a inexistência de agregações e macroporosidade e uma porosidade com distribuição mais uniforme dos poros.

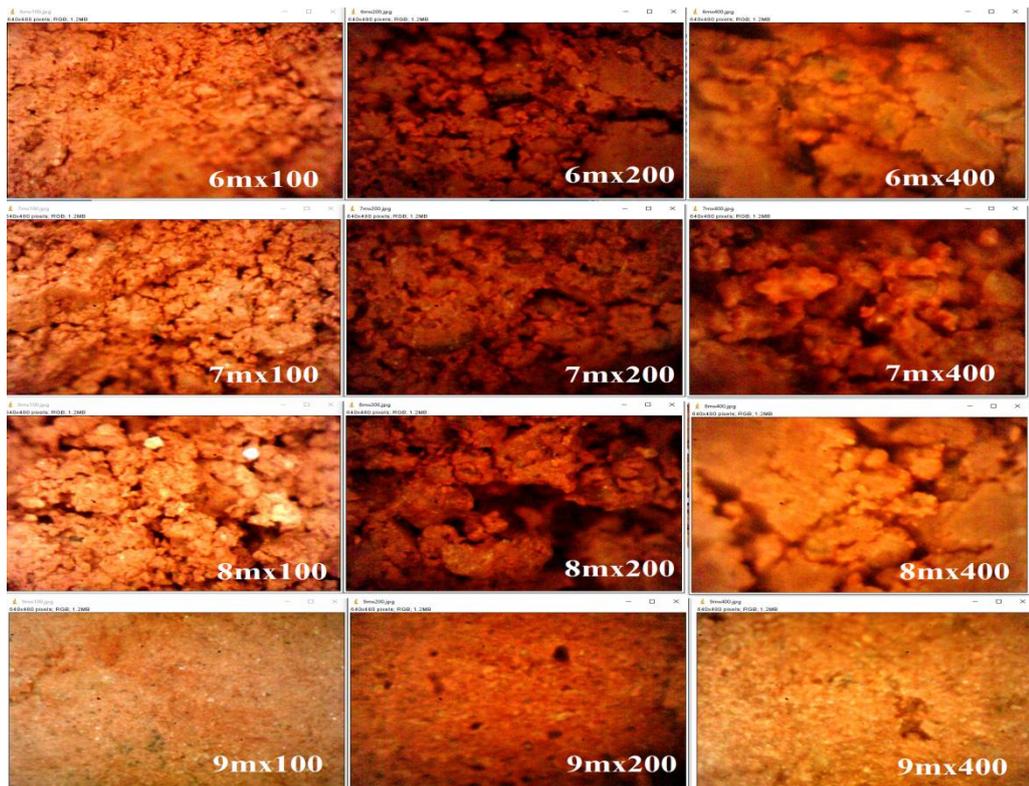


Figura 4.26 Microestrutura do solo natural coletado de 6 m a 9 m de profundidade observada por meio de lupa óptica.

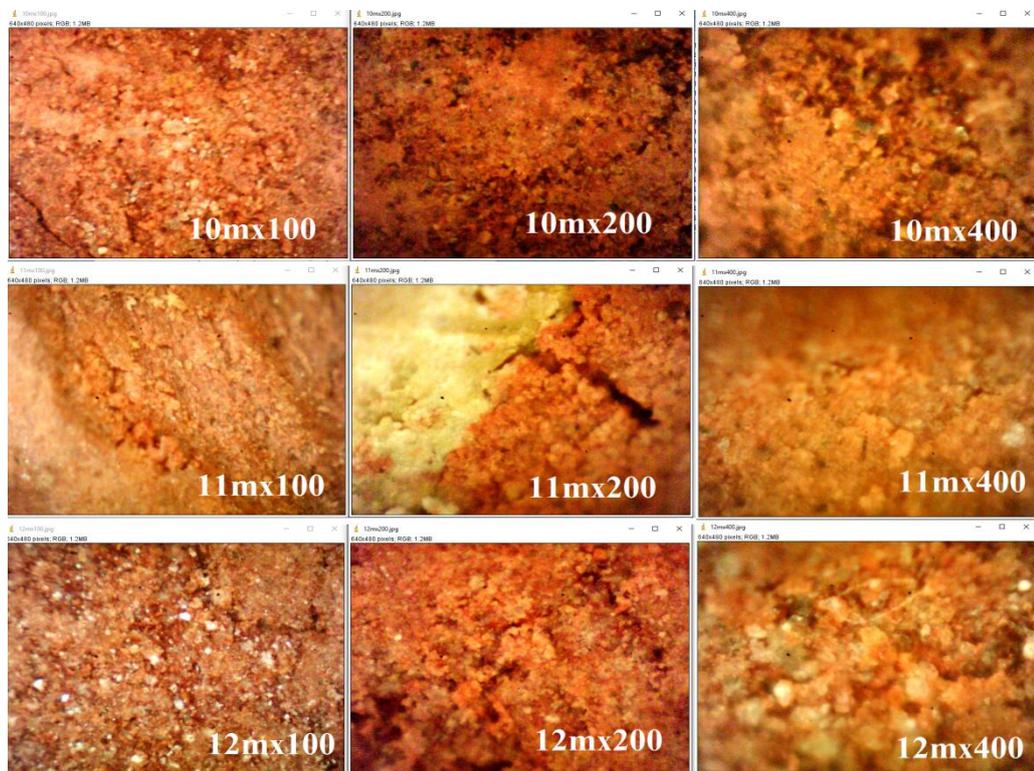


Figura 4.27 Microestrutura do solo natural coletado de 10 m a 12 m de profundidade observada por meio de lupa óptica.

Por último, na Tabela 4.13, tem-se a relação entre a área de poros e a área total das imagens, sendo possível estimar a variação dos vazios por meio dessas análises semiquantitativas e confirmar a avaliação qualitativa das imagens indicando menor porosidade para o solo saprolítico. Nesta tabela as medições estão relacionadas em pixels devido a falta de escala na imagem da lupa, dando a "porosidade" da imagem referente à área e relacionando a área total da imagem com a área selecionada no programa. Assim, a precisão da medição depende da qualidade da imagem e da capacidade do programa, devendo-se salientar ainda que a visualização da imagem não é 3D e, portanto, não dá valores exatos em relação à porosidade e índice de vazios.

Tabela 4.13 Avaliação semiquantitativa dos vazios presentes no solo ao longo do perfil de intemperismo em estado natural. Observação por meio de lupa óptica.

Profundidade aumento e estado	Área de poros Ap	Menor área poro	Maior área poro	Área total imagen At	Relação de porosidade Ap/At [%]	"e" macro estimado	"e" macro estimado Guimarães	e real	e T G
1x100 nat	142725,1	36	132	307200	46,5	0,87	0,619	1,54	1,60
1x200 nat	153354,2	27	85	307200	49,9	1,00			
1x400 nat	163184,6	24	85	307200	53,1	1,13			
2x100 nat	137226,2	70	141	307200	44,7	0,81	0,723	1,50	1,57
2x200 nat	127887,4	36	90	307200	41,6	0,71			
2x400 nat	152002,6	34	96	307200	49,5	0,98			
3x100 nat	95907,8	84	168	307200	31,2	0,45	0,548	1,41	1,27
3x200 nat	103802,9	30	85	307200	33,8	0,51			
3x400 nat	105154,6	58	113	307200	34,2	0,52			
4x100 nat	85954,6	69	150	307200	28,0	0,39	0,51	1,41	1,27
4x200 nat	180049,9	26	85	307200	58,6	1,42			
4x400 nat	94832,6	48	121	307200	30,9	0,45			
6x100 nat	63559,7	71	125	307200	20,7	0,26	0,41	1,31	1,25
6x200 nat	97443,8	22	85	307200	31,7	0,46			
6x400 nat	89043,5	55	110	307200	29,0	0,41			
7x100 nat	59228,2	49	106	307200	19,3	0,24	0,298	1,16	1,15
7x200 nat	78950,4	25	85	307200	25,7	0,35			
7x400 nat	88258,6	28	85	307200	28,7	0,40			
8x100 nat	71024,6	65	131	307200	23,1	0,30	0,305	1,09	1,07
8x200 nat	128501,8	28	85	307200	41,8	0,72			
8x400 nat	103680,0	65	126	307200	33,8	0,51			
9x100 nat	51363,8	84	153	307200	16,7	0,20	1,16	1,16	0,89
9x200 nat	53890,2	32	85	307200	17,5	0,21			
9x400 nat	56033,3	83	143	307200	18,2	0,22			
10x100 nat	56094,7	73	205	307200	18,3	0,22	0,221	1,19	0,96
10x200 nat	53422,1	37	131	307200	17,4	0,21			
10x400 nat	55818,2	57	122	307200	18,2	0,22			
11x100 nat	44329,0	69	139	307200	14,4	0,17	0,28	1,06	1,08
11x200 nat	50749,4	54	123	307200	16,5	0,20			
11x400 nat	57292,8	38	150	307200	18,7	0,23			
12x100 nat	42455,0	63	221	307200	13,8	0,16	1,10	1,10	1,10
12x200 nat	45895,7	60	131	307200	14,9	0,18			
12x400 nat	48629,8	71	116	307200	15,8	0,19			

Na Tabela 4.13 a variação dos poros é maior na zona de intemperismo tropical mais intenso onde o teor de poros sofre uma queda de 46% para 19% no menor aumento, e de 59% para 29% no maior, ao se considerar comparativamente as

profundidades de 1 e 7 metros, respectivamente. Na transição (9 e 10 m) e no solo saprolítico (11 e 12 m) essa variação é praticamente inexistente refletindo a maior uniformidade e regularidade na porosidade desses solos menos intemperizados. Essas análises de imagem podem ser relevantes na avaliação estimativa da macroporosidade presente no solo profundamente intemperizado. Assim, considerando-se que os poros lidos correspondem apenas aos macroporos é possível estimar o índice de vazios correspondente a macroporosidade (Tabela 4.13).

Ao se relacionar os índices de vazios correspondentes à macroporosidade estimados com base nas curvas granulométricas com e sem defloculante, nos vazios presentes nos agregados e nos índice de vazios globais presentes nos solos em estado natural, com aqueles estimados a partir das análises aqui realizadas considerando-se os resultados apresentados na Tabela 4.13, Tabela 4.14 e Figura 4.28, verifica-se que essa análise semiquantitativa da porosidade constitui-se em boa ferramenta em termos estimativos. Destaca-se, porém, que os valores de porosidade estimados a partir das análises de imagens não podem ser considerados como verdade absoluta, pois são oriundos apenas de medidas de uma superfície fazendo-se analogia de área com volume.

Essas análises podem eventualmente se tornarem um pouco mais precisas ao se utilizar imagens obtidas com o MEV. No entanto, há que se considerar que a vantagem oriunda da melhor qualidade das imagens obtidas com o MEV, pode ser perdida com o fato de que nessa técnica as amostras passam obrigatoriamente, para o microscópio utilizado, por uma secagem prévia para metalização, procedimento que não é necessário nas análises com a lupa ótica. É verdade que procedimentos de secagem por liofilização minimizam o problema, mas não o elimina por completo.

Pode-se observar na Figura 4.28 a tendência dos valores estimados dos índices de vazios globais concordarem com os valores reais determinados (A). Considerando-se os índices de vazios correspondentes à microporosidade avaliada pelo MEV (B) se observa ao se comparar com os valores oriundos de Guimarães (2002) maior similaridade apenas para as maiores profundidades, ou seja, quando desaparecem ou tendem a desaparecer os agregados.

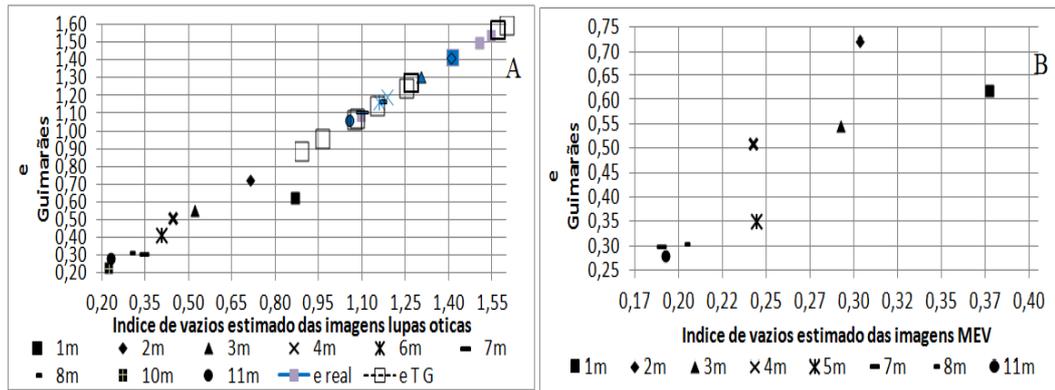


Figura 4.28 Comparação de "índices de vazios" globais (a) estimados desde análises de imagens.

Então, na expectativa de uma melhor observação do nível de porosidade e agregação que apresenta o solo em estado natural no perfil de intemperismo tropical analisado incluindo-se a transição e o solo saprolítico, apresentam-se na Tabela 4.14 os valores das áreas de poros e as percentagens que elas representam, em diferentes níveis de aumento das imagens obtidas com o MEV. Para melhor entendimento das análises realizadas na Tabela 4.14, apresenta-se na Figura 4.29 as imagens obtidas no MEV para as ampliações analisadas considerando-se respectivamente as profundidades de 1 e 11 m.

A Tabela 4.14 é reiterativa em descrever os altos índices de vazios e agregação na zona superior do perfil de intemperismo e que tendem a diminuir com o aumento da profundidade no perfil de solo analisado. Estimando o índice de vazios correspondente aos macroporos verificam-se valores menores que os estimados por meio da lupa, apontando para possíveis e significativas contrações sofridas pelo solo durante a fase de preparação das amostras para realização do MEV.



Figura 4.29 Microestrutura observado no MEV do solo no estado natural.

Considerando-se a ideia de que nas pequenas ampliações (100 a 500 vezes) pode-se observar predominantemente a macroporosidade e que nas ampliações maiores (10.000 e 20.000 vezes) pode-se observar a microporosidade, verifica-se que as relações de poros conforme as análises macro e micro determinadas segundo os aumentos indicados, apresentam valores distintos. Assim, nos zooms macro compreendidos entre 100 e 500 vezes observa-se valores mais elevados que nas maiores ampliações para a relação entre a área de poros e a área total. Essa constatação é observada ao longo de todo o perfil, mas à medida que se tem menor alteração e agregação, os valores de relação de áreas vão se uniformizando devido a redução do teor de agregados e consequente macroporosidade entre eles.

Com ampliações entre 1.000 e 5.000 vezes observa-se a tendência a resultados de áreas de poros similares. Estas porosidades visíveis nestas ampliações poderiam ser consideradas como áreas de mesoporos, ou seja, áreas de poros menores que os poros macro, mas ainda maiores que os poros micro. Essas relações de áreas consideradas como dos mesoporos foram ao longo do perfil de intemperismo geralmente menores que as de macroporos e microporos com exceção da profundidade 11 m onde a microporosidade é menor como se observa na Tabela 4.14.

Por último os níveis de ampliação de 10.000 e 20.000 foram considerados como avaliadores da microporosidade sendo obtidas relações de área geralmente maiores que as dos mesoporos e macroporos, com exceção das profundidades de 1 e 2m com alta agregação que gera grande macroporosidade, e da profundidade de 11 m onde a alteração é menor fazendo na realidade com que se detecte uma porosidade contínua sem presença de agregações e sem a consequente separação dos poros internos e externos aos agregados como se observa na Tabela 4.14.

As análises realizadas permitem verificar que quanto maior a profundidade no perfil de intemperismo estudado, menor o intemperismo sofrido e por consequência menor a alteração estrutural e químico-mineralógica fazendo com que a macroporosidade que se faz presente nas camadas mais superficiais tenda a desaparecer com o aumento da profundidade. Observa-se que ela passa de uma média de valor máximo de 27% no primeiro metro para 13% no último metro observado (11 m), correspondente ao solo saprolítico. A variação é muito grande, em especial, no horizonte profundamente intemperizado, quando cai para um valor mínimo médio de

11% na profundidade de 7 m, aumentando na zona de transição para 14% e estabilizando-se no solo saprolítico em 13% (Tabela 4.15).

O comportamento da relação de áreas para os mesoporos é muito regular, tanto entre as ampliações como através do perfil de solo para ambos os horizontes e para a transição. Nos primeiros dois metros pela alta porosidade, agregação e alteração, os mesoporos apresentam variações mais significativas, passando de 21% para 15%. Depois os valores tanto no solo profundamente intemperizado como no solo saprolítico variam entre 13% e 10%, ou seja, mantém-se praticamente constante (Tabela 4.15).

A microporosidade apresenta um comportamento diferente da macroporosidade, ou seja, ela tende a apresentar pequenas reduções com o aumento da profundidade no solo profundamente intemperizado apresentando redução mais significativa ao adentrar no solo saprolítico. Em termos percentuais a relação de áreas referente à microporosidade da zona profundamente intemperizada variou de 23% na camada mais superficial até em média 15,7% na zona mais profunda. No entanto, ao adentrar no solo saprolítico ela diminuiu para 10% (Tabela 4.15).

Conclui-se que a macroporosidade e a microporosidade têm a mesma tendência de variação ao longo do perfil de solo analisado, ou seja, elas diminuem com o aumento da profundidade. A macroporosidade tem maior queda que a microporosidade, pois enquanto aquela é fruto de transformações estruturais geradas por processos pedogenéticos e de lixiviação mais intensos nos solos mais superficiais do perfil de alteração, esta última está muito associada à sua origem, no caso residual. Esse comportamento de variação da porosidade se observa melhor na Tabela 4.15 e Figura 4.30.

Tabela 4.14 Avaliação quantitativa do perfil natural de solo por meio de imagens obtidas no MEV.

Profundidade aumento e estado	Área de poros Ap [μm^2]	Área de poros [mm^2]	Área total imagem At [mm^2]	Relação de porosidade e Ap/At [%]	"e" estimado	"e" estimado Guimarães
1mx100 nat	302.657,30	0,302657	1,13567	26,7	0,36	0,619
1mx200 nat	82.550,99	0,082551	0,31341	26,3	0,36	
1mx500 nat	13.115,97	0,013116	0,04836	27,1	0,37	
1mx1000 nat	2.198,20	0,002198	0,01094	20,1	0,25	
1mx3000 nat	275,19	0,000275	0,00136	20,2	0,25	
1mx5000 nat	110,18	0,000110	0,00049	22,4	0,29	
1mx10000 nat	26,45	0,000026	0,00011	23,3	0,30	
1mx20000 nat	5,43	0,000005	0,00003	17,3	0,21	
2mx100 nat	259.240,41	0,259240	1,27894	20,3	0,25	0,723
2mx200 nat	58.345,69	0,058346	0,29527	19,8	0,25	
2mx500 nat	7.991,55	0,007992	0,04940	16,2	0,19	
2mx1000 nat	1.319,55	0,001320	0,01053	12,5	0,14	
2mx3000 nat	188,39	0,000188	0,00137	13,8	0,16	
2mx5000 nat	97,76	0,000098	0,00049	19,9	0,25	
2mx10000 nat	30,59	0,000031	0,00013	23,0	0,30	
2mx20000 nat	7,21	0,000007	0,00003	23,5	0,31	
3mx100 nat	284.848,39	0,284848	1,27735	22,3	0,29	0,548
3mx200 nat	50.111,80	0,050112	0,32646	15,3	0,18	
3mx500 nat	6.123,95	0,006124	0,04915	12,5	0,14	
3mx1000 nat	1.462,80	0,001463	0,01181	12,4	0,14	
3mx3000 nat	188,68	0,000189	0,00133	14,2	0,17	
3mx5000 nat	68,07	0,000068	0,00046	14,7	0,17	
3mx10000 nat	19,95	0,000020	0,00012	16,2	0,19	
3mx20000 nat	4,86	0,000005	0,00003	16,8	0,20	
4mx100 nat	204.390,56	0,204391	1,22831	16,6	0,20	0,51
4mx200 nat	48.745,84	0,048746	0,32650	14,9	0,18	
4mx500 nat	7.505,89	0,007506	0,04836	15,5	0,18	
4mx1000 nat	1.189,38	0,001189	0,01181	10,1	0,11	
4mx3000 nat	155,21	0,000155	0,00137	11,4	0,13	
4mx5000 nat	83,86	0,000084	0,00051	16,5	0,20	
4mx10000 nat	21,08	0,000021	0,00012	17,2	0,21	
4mx20000 nat	5,66	0,000006	0,00003	19,2	0,24	
5mx100 nat	154.111,05	0,154111	1,13567	13,6	0,16	0,35
5mx200 nat	40.233,23	0,040233	0,30115	13,4	0,15	
5mx600 nat	4.132,22	0,004132	0,03196	12,9	0,15	
5mx1000 nat	1.621,63	0,001622	0,01181	13,7	0,16	
5mx3000 nat	168,07	0,000168	0,00117	14,4	0,17	
5mx5000 nat	60,26	0,000060	0,00049	12,3	0,14	
5mx10000 nat	19,75	0,000020	0,00011	17,4	0,21	
5mx20000 nat	5,48	0,000005	0,00003	19,3	0,24	
7mx100 nat	128.564,84	0,128565	1,09324	11,8	0,13	0,298
7mx200 nat	31.649,51	0,031650	0,28957	10,9	0,12	
7mx500 nat	5.559,09	0,005559	0,04915	11,3	0,13	
7mx1000 nat	1.432,78	0,001433	0,01229	11,7	0,13	
7mx3000 nat	185,85	0,000186	0,00133	14,0	0,16	
7mx5000 nat	69,32	0,000069	0,00050	13,9	0,16	
7mx10000 nat	17,23	0,000017	0,00011	15,2	0,18	
7mx20000 nat	4,44	0,000004	0,00003	15,6	0,19	
8mx100 nat	158.159,00	0,158159	1,17701	13,4	0,16	0,305
8mx200 nat	49.159,28	0,049159	0,31987	15,4	0,18	
8mx500 nat	5.961,28	0,005961	0,04837	12,3	0,14	
8mx1000 nat	1.031,25	0,001031	0,01279	8,1	0,09	
8mx3000 nat	120,68	0,000121	0,00126	9,6	0,11	
8mx5000 nat	69,95	0,000070	0,00051	13,8	0,16	
8mx10000 nat	19,69	0,000020	0,00013	15,4	0,18	
8mx20000 nat	5,09	0,000005	0,00003	16,6	0,20	
11mx100 nat	152.977,13	0,152977	1,27734	12,0	0,14	

Tabela 4.15 Avaliação semiquantitativa do perfil de solo natural observado no MEV.

Profundidade [m]	Relação de porosidade %							
	1	2	3	4	5	7	8	11
Macroporos ampliação 100, 200 e 500	26,7	18,7	16,7	15,7	13,3	11,3	13,7	13,0
Mesoporos ampliação 1000, 3000 e	20,9	15,4	13,8	12,7	13,4	13,2	10,5	13,4
Microporos ampliação 10000 e 20000	20,3	23,2	16,5	18,2	18,3	15,4	16,0	10,3

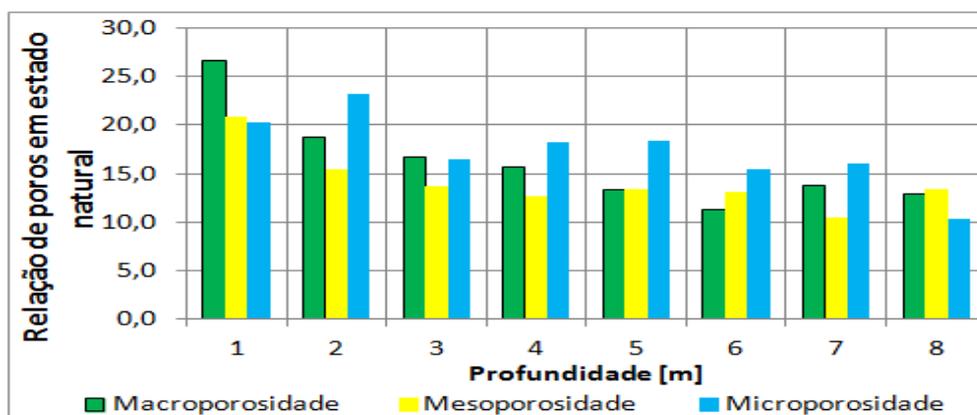


Figura 4.30 Variação da relação dos macro, meso e microporos do solo natural.

Nos solos mais profundos e menos alterados, as porosidades avaliadas por meio da relação de áreas obtidas das imagens no MEV apresenta menor variação já que esses solos são predominantemente não agregados e apresentam uma melhor distribuição de poros, mais regular e homogênea, sendo provável que a igualdade observada nas relações de área obtidas para a profundidade de 11 m estejam mostrando os mesmos poros em diferentes ampliações, dependendo-se disso, que eles seriam relativamente uniformes e isso pode ser observado na Figura 4.29. Já nas zonas de alto intemperismo, as agregações presentes no solo conduzem efetivamente a existência de macroporos entre elas e microporos em seus interiores o que proporciona uma descontinuidade na distribuição de poros gerando a distribuição de poros bimodal com presença em menor escala de poros intermediários.

Destaca-se que embora os dados da Tabela 4.14 obtidos a partir das imagens de MEV apresentam-se coerentes em termos de variação com os apresentados na Tabela 4.13 que refletem as imagens da Figura 4.25, observa-se variação em alguns dados. Isso se deve provavelmente ao fato de que para a obtenção das imagens por meio da lupa

ótica o solo não foi submetido a processo de secagem sendo registradas quase que imediatamente após as coletas, enquanto para a obtenção das imagens usando o MEV as amostras foram submetidas a processo de desidratação necessário à metalização e observação no microscópio. Essa desidratação seria responsável pela contração e redução da porosidade do solo, em especial em nível da macroporosidade.

Dentro dos objetivos desta pesquisa estava encontrar a configuração estrutural do solo em estado natural e verificar como ela varia com a profundidade. Para complementar as análises até aqui realizadas se observará as Figura 4.31, Figura 4.32 e Figura 4.33 atentando-se para os aspectos relativos à agregação e à macro e microporosidade ao longo da profundidade. Complementarmente se analisará aspectos como as características dos vazios e suas conexões, os agregados e suas dimensões e as partículas de minerais isolados, ou seja, não agregados. Essas análises serão feitas de forma qualitativa e semiquantitativa.

Na Figura 4.31 apresentam-se imagens obtidas no MEV para os primeiros 3 m do perfil de intemperismo estudado considerando-se ampliações variando entre 200 e 20.000 vezes. Não se observa variações significativas entre as profundidades e os agregados observados nas maiores ampliação apresentam características de superfície semelhantes. Nas imagens, como mostrado para a profundidade de 2 m, aparecem poucas partículas isoladas. É possível nessas imagens visualizar os poros inter e intra-agregados.

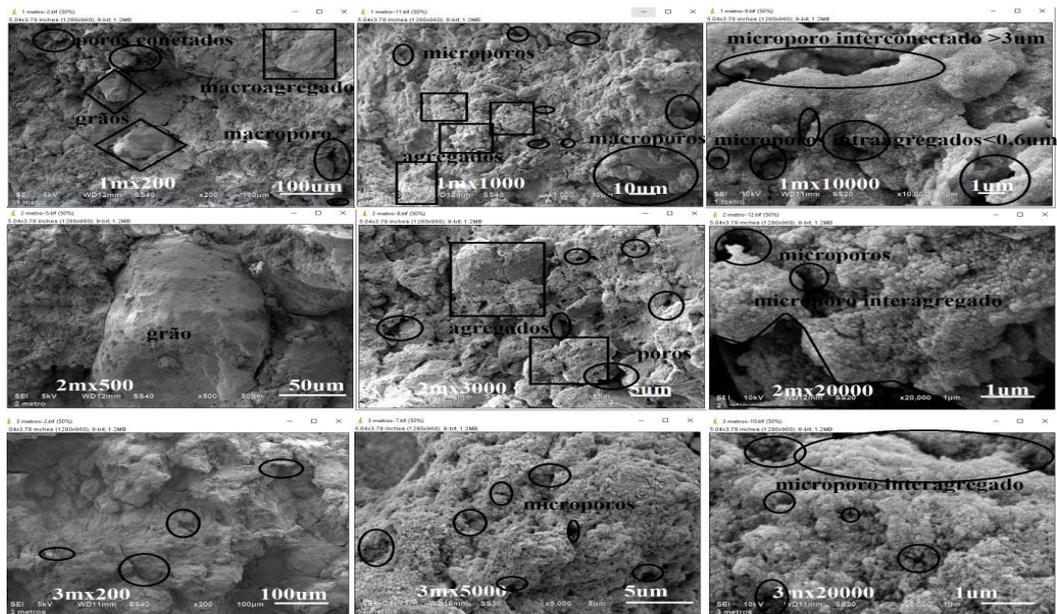


Figura 4.31 Imagens obtidas no MEV para 1 m a 3 m no perfil de solo natural.

Na Figura 4.32, observa-se a queda do nível de intemperismo refletida em estruturas ainda agregadas, mas em proporções menores, com distribuição menos setorizada dos poros. Igualmente é visível a regularidade da distribuição dos poros, dos agregados e das partículas em níveis macro e micro.

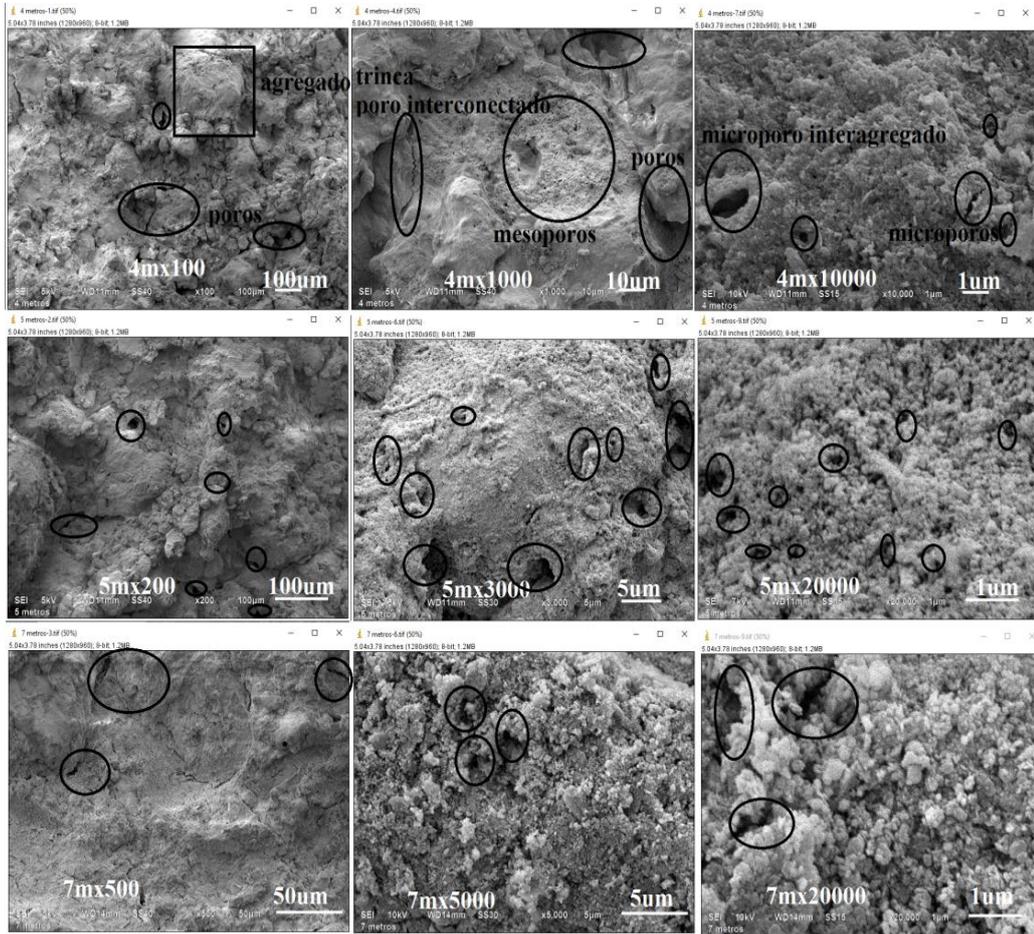


Figura 4.32 Imagens obtidas no MEV para 4 m a 7 m no perfil de solo natural.

Na Figura 4.33, apresenta-se o início da transição em 8m de profundidade e o solo saprolítico a 11 m. Na profundidade de 8 m apesar da presença de agregados já começa a aparecer partículas minerais independentes dos agregados diferenciando-se assim das camadas superiores apresentadas nas Figura 4.31 e Figura 4.32. Para a profundidade de 11 m aparecem partículas isoladas e pacotes de partículas e uma distribuição de poros mais uniformes. Nessa profundidade não é verificada a presença dos agregados que caracterizam os solos tropicais profundamente intemperizados.

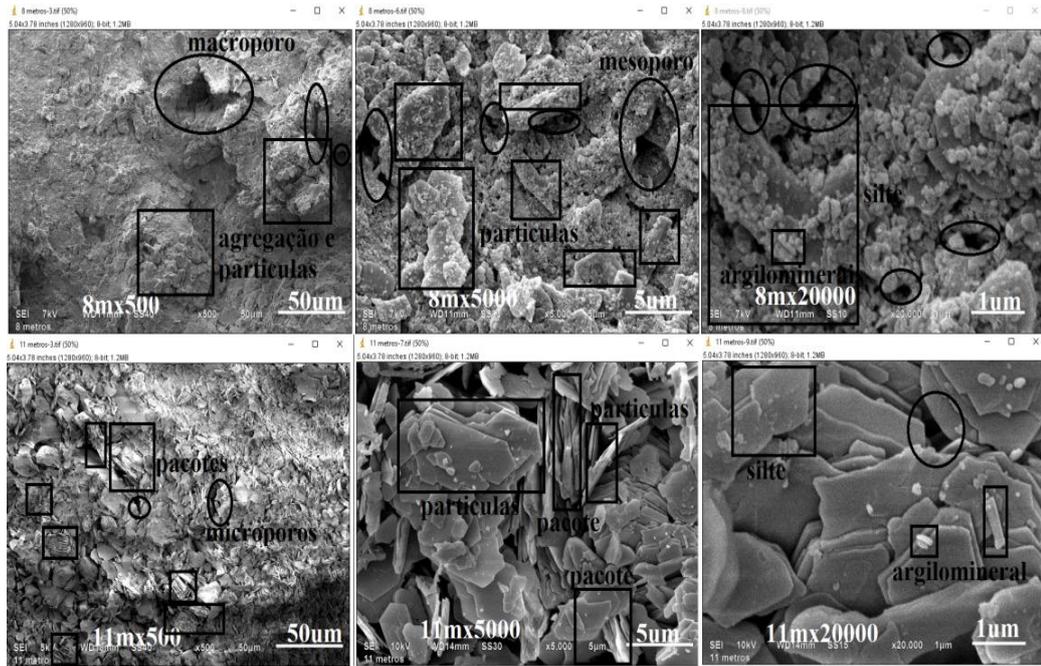


Figura 4.33 Imagens obtidas no MEV para 8 e 11 m no perfil de solo natural estudado.

Objetivando avaliar a distribuição de poros dos solos nas profundidades estudadas fez-se a análise de imagens com as amostras submetidas a diferentes aumentos. Observou-se com base em avaliações das áreas de poros em relação a área total (Figura 4.34), que no solo laterítico ao se ampliar a imagem os macroporos perdem em representatividade conduzindo a uma redução na porcentagem de vazios em relação a área total observada (Tabela 4.16).

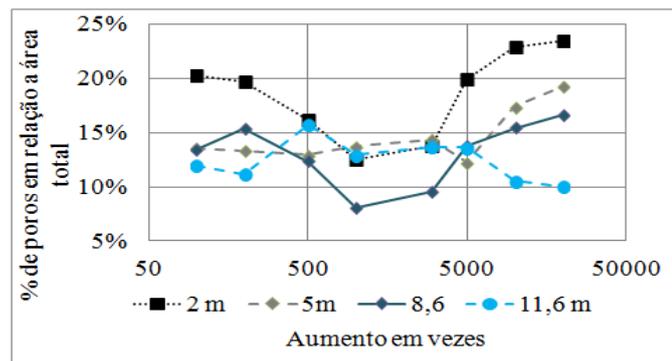


Figura 4.34 Distribuição da porosidade em função da ampliação da imagem.

Tabela 4.16 Avaliação quantitativa condições especiais no solo natural.

pz profundidade e aumento	Relação de área de poros [%]	relação Alternativa [%]	característica alternativa das áreas observadas
1mx1000 nat	20,1	7,1	Agregados e grãos
1mx3000 nat	20,2	1,6	grãos e trincas
2mx100 nat	20,3	6,9	Agregados e grãos
2mx200 nat	19,8	8,0	Agregados e grãos
2mx1000 nat	12,5	4,5	grão
2mx10000 nat	23,0	26,3	dentro de um agregado
3mx500 nat	12,5	8,7	grão
3mx20000 nat	16,8	18,8	dentro de um agregado
5mx1000 nat	13,7	8,9	Agregados e grãos
7mx20000 nat	15,6	14,5	dentro de um agregado
11mx500 nat	15,8	11,3	agregados e pacotes

A partir de um determinado nível de aumento os macroporos deixam de serem representativos e começa a ampliar a área de vazios dos microporos em relação á área total (Figura 4.34). Essa representação dos macroporos e microporos do solo laterítico concorda com sua distribuição bimodal. Já no solo saprolítico o que se observa é apenas certa dispersão nos resultados apontando para uma maior uniformidade na distribuição de poros, dentro, evidentemente de certa faixa geradora da dispersão observada. Cabe destacar o comportamento registrado para a profundidade de 5m que aparentemente contraria ao esperado, no entanto, se observada à composição mineralógica ao longo d perfil (Tabela 4.16) e os perfis de umidade e de sucção apresentados por Guimarães (2002) depreende-se que nessa profundidade ocorrem ao longo do ano apenas pequenas variações o que poderia estar contribuindo para um menor destaque da macroporosidade.

Em continuidade às análises foram avaliados outros aspectos como a influência da secagem, e da presença de grãos isolados na distribuição de poros (Tabela 4.16). Nessa tabela apresentam-se os resultados obtidos a partir de imagens do MEV avaliadas em diferentes perspectivas de observação. Por exemplo, a relação de áreas de poros para um aumento de 1000 vezes na amostra coletada a 1 m de profundidade cai de 20% para 7% quando se avalia comparativamente uma área de agregados com uma área de grãos isolados (Figura 4.35 (A)). Ao se observar a Figura 4.35 (B) com presença de trincas, os cálculos levam a uma área relativa de poros de 20% enquanto se avaliada a área com grãos independentes da Figura 4.35(A) obtém-se uma relação de área igual a 2%. Observações semelhantes foram feitas para outras imagens. Por exemplo, avaliando-se a porosidade na área onde predomina a presença de um grão (Figura 4.35 (C)) chega-se a

relações de áreas que variam de 12,53% para 4,5% e ao se avaliar uma área de agregado essa relação de área passa para uma faixa de variação mais estreita indo de 22,95% para 22,34% (Figura 4.35 (D)).

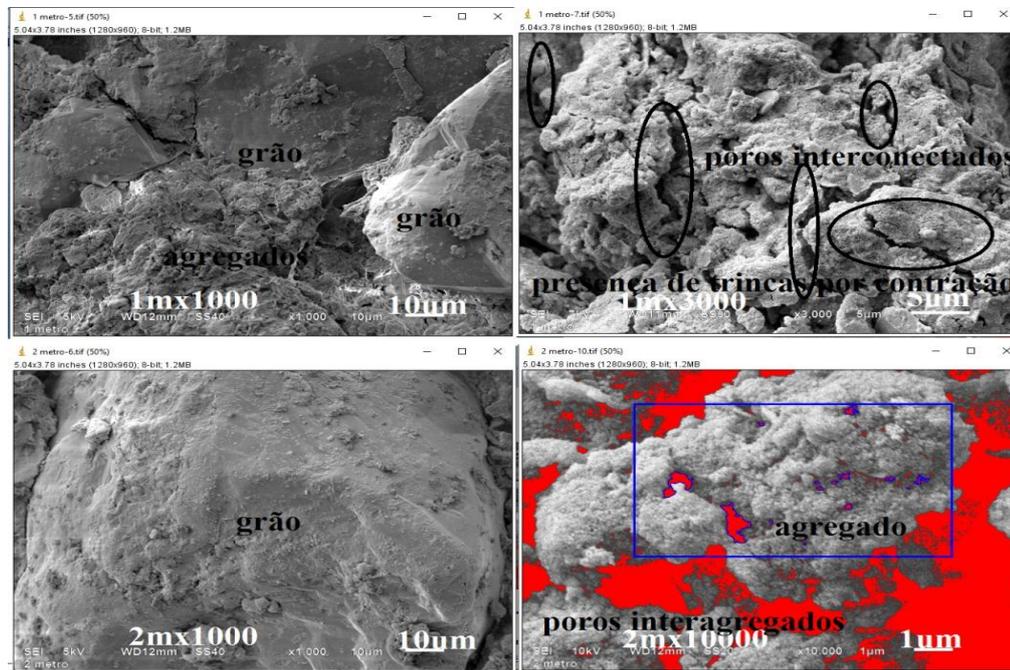


Figura 4.35 Análises condições especiais MEV.

Uma última análise produzida do estudo das imagens do MEV realizadas para o solo natural consistiu na avaliação de agregados e de partículas, minerais ou argilominerais, de forma qualitativa (Figura 4.36). Qualitativamente se observa nas imagens com grande ampliação (20.000 vezes) realizadas no manto profundamente intemperizado (1 m a 8 m) a formação de agregados maiores nas profundidades observadas de 1 m e 4 m. Nas profundidades de 7 m e 8 m esses agregados se tornam menores e surge de modo mais frequente a presença de minerais independentes. Nessas imagens é de difícil identificação os minerais (quartzo) e argilominerais (caulinitas, ilitas), mesmo sabendo pelas análises mineralógicas, que eles estão presentes no solo.

No solo saprolítico são diferenciáveis, mesmo que de modo estimativo, formas hexagonais características da caulinita (Figura 4.36 E), sendo clara a forma lamelar das partículas.

Tabela 4.17 Tamanho dos argilominerais. (Modificado Grim, 1962).

Argilomineral	CTC (meq 100g-1)	Tamanho (μm)
caolinita	3-15	0,1 a 5
montmorillonita	80-150	0,01 a 1
ilita	10-40	0,1 a 2
vermiculita	100-150	
clorita	10-40	

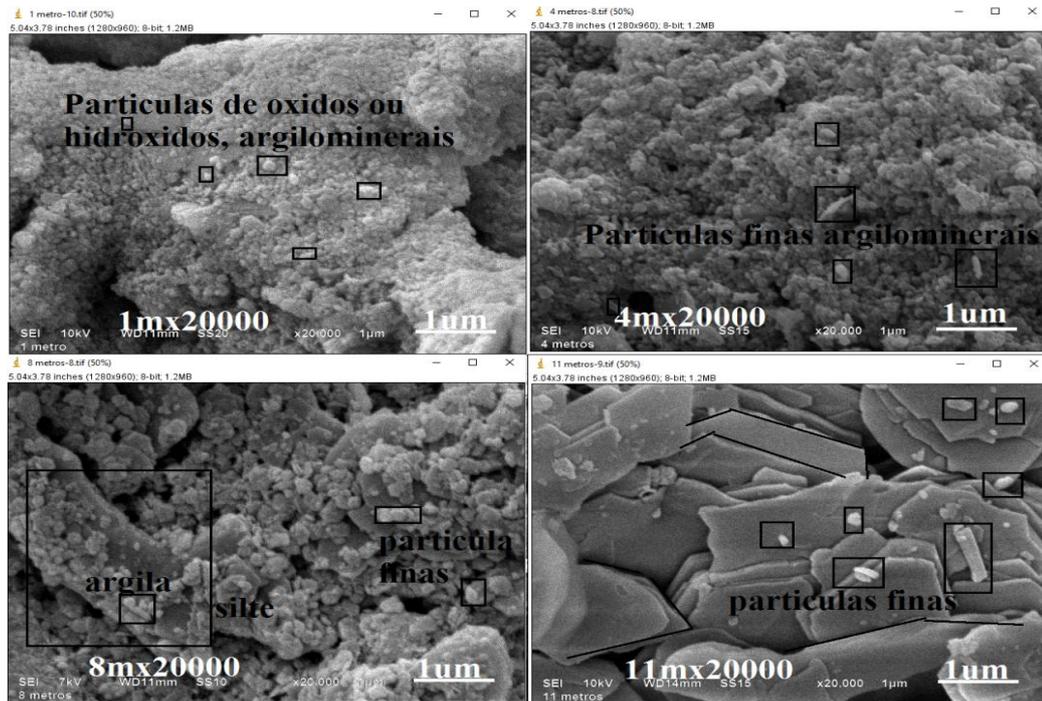


Figura 4.36 Partículas e minerais, agregados e pacotes de partículas.

4.4.2 ESTRUTURA DO SOLO COMPACTADO

De forma análoga ao solo natural, têm-se os resultados das análises das imagens do perfil de solo para as profundidades estudadas no que tange às compactações estática e dinâmica, considerando-se as três energias de compactação: normal, intermediária e modificada. As profundidades estudadas foram como já indicadas 2 m, 5 m, 8,6 m e 11,6 m. As análises estruturais qualitativas e semiquantitativas foram realizadas para os solos compactados em três condições de umidade: umidade ótima, umidade ótima menos 2% e umidade ótima mais 2%. Utilizou-se nas observações tanto a lupa ótica como o MEV.

Na Figura 4.37, apresenta-se imagens obtidas com a lupa ótica das amostras compactadas dinamicamente na energia Proctor normal para o solo coletado a 2 m e 5 m

de profundidade. As imagens foram obtidas com uma ampliação de 200 vezes. Ambas as sequências de imagens apresentam o mesmo comportamento, observando-se que no ramo seco os poros são interagregados, de conexão alongada e maior tamanho, distribuídos irregularmente como se vê na Figura 4.37 (A e D). Na umidade ótima os poros se apresentam em menor quantidade e menor tamanho sendo, no entanto, melhor distribuídos (Figura 4.37 (B e E)). Já no ramo úmido, os poros novamente começam a ter conexão, sendo maiores que os obtidos para a umidade ótima, porém, menores que os observados no ramo seco (Figura 4.37 (C e F)).

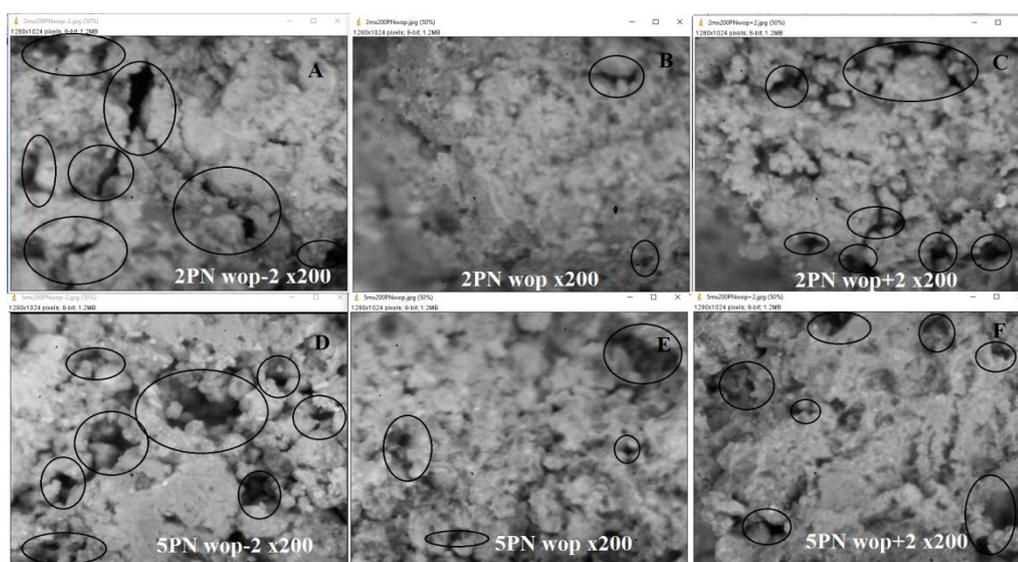


Figura 4.37 Observações na lupa ótica de amostras compactadas coletadas a 2 m e 5 m de profundidade na energia Proctor normal (PN).

Na Figura 4.37 (A, B e C), observa-se para o nível de menor energia de compactação Proctor Normal (PN), mesmo no método dinâmico que gera maior interferência na estrutura do solo, que embora tenham ocorrido quebras, pois os agregados são aparentemente menores que no solo natural, o estado agregado foi aparentemente preservado como se observa na Figura 4.37 (D, E, F).

Para os solos mais profundos, transição (8,6 m de profundidade) e solo do horizonte saprolítico (11,6 m de profundidade), compactados na energia Proctor Normal, a Figura 4.38 apresenta as imagens obtidas para um aumento de 200 vezes das amostras compactadas na umidade ótima menos 2%, umidade ótima e umidade ótima mais 2%. Observa-se comportamento similar ao descrito anteriormente no que diz respeito a influência da umidade na porosidade, no entanto, já não é possível falar de agregação no solo saprolítico, embora elas continuem presentes no solo coletado a 8,6

metros de profundidade. A macroporosidade aparece na amostra coletada a 8,6 m de profundidade em particular nos ramos seco e úmido, mas inexistem no solo saprolítico.

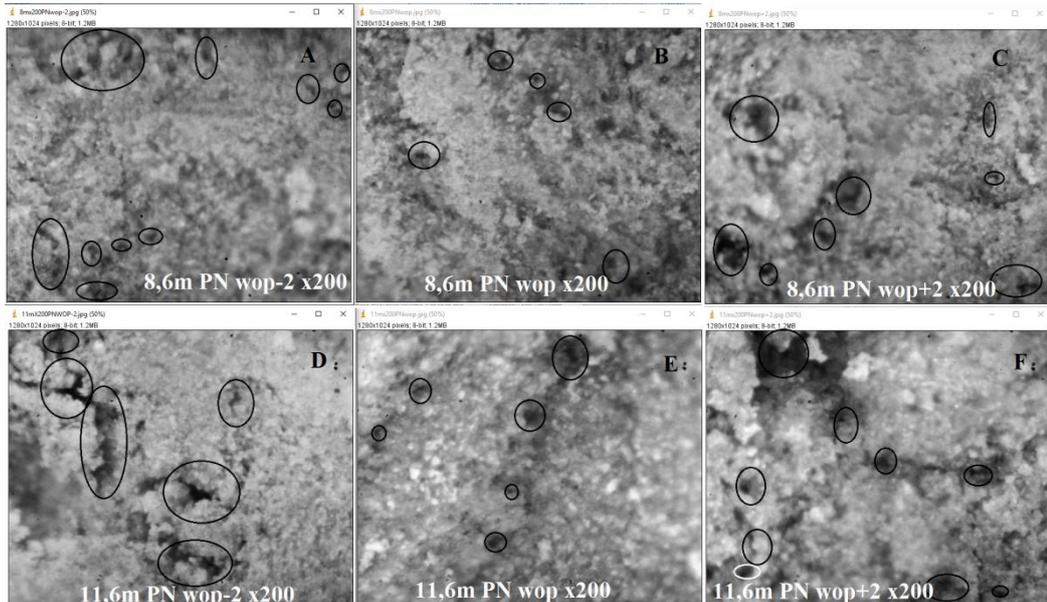


Figura 4.38 Observações na lupa ótica de amostras compactadas na energia Proctor normal (PN) 8,6 m e 11,6 m PN.

Os comportamentos descritos nas Figura 4.37 e Figura 4.38 também se aplicam e são apresentados em qualquer que seja a condição e energia de compactação utilizada. A porosidade do solo compactado para qualquer desses estados é menor que a porosidade do solo natural, e quanto maior a energia menor a porosidade. Como esperado, os poros são maiores e mais conectados com distribuição irregular nos ramos seco e úmido, e menores e melhor distribuídos na condição ótima.

Nos arranjos estruturais observados para o ramo seco da curva de compactação os poros se apresentam comumente conectados ou formando fendas, fendas que podem ser oriundas do próprio processo de compactação.

As diferenças entre as compactações dinâmica e estática podem, de forma qualitativa, serem observadas na Figura 4.39. Na estrutura oriunda da compactação estática tem-se maior preservação das agregações. Como resultado os poros e índices de vazios diminuem na compactação estática, mas as agregações presentes no estado natural são em grande parte preservadas e apresentam uma distribuição homogênea. Já na compactação dinâmica, ocorre maior arranjo das partículas no solo pouco intemperizados e maior quebra de agregados nos solos profundamente intemperizados, (Figura 4.39).

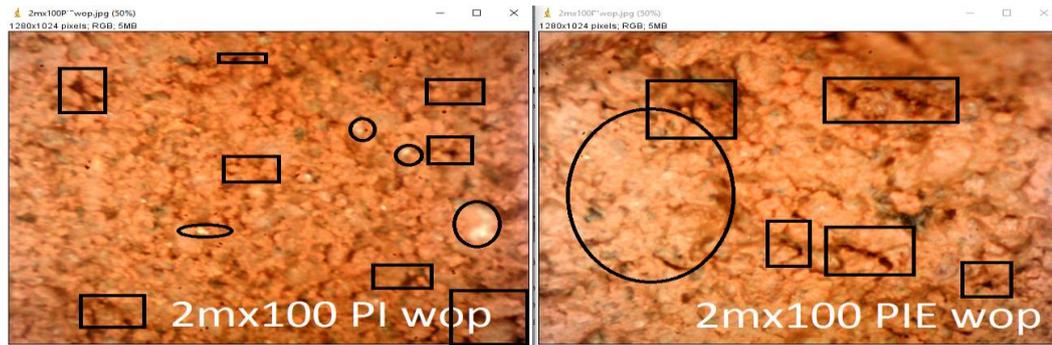


Figura 4.39 Macroestrutura do solo compactado dinâmica vs. estática lupa ótica.

Para o solo saprolítico observam-se em imagens obtidas no MEV pacotes de argila preservados não sobressaindo a orientação de partículas nas compactações estática e dinâmica na condição ótima do Proctor intermediário Figura 4.40.

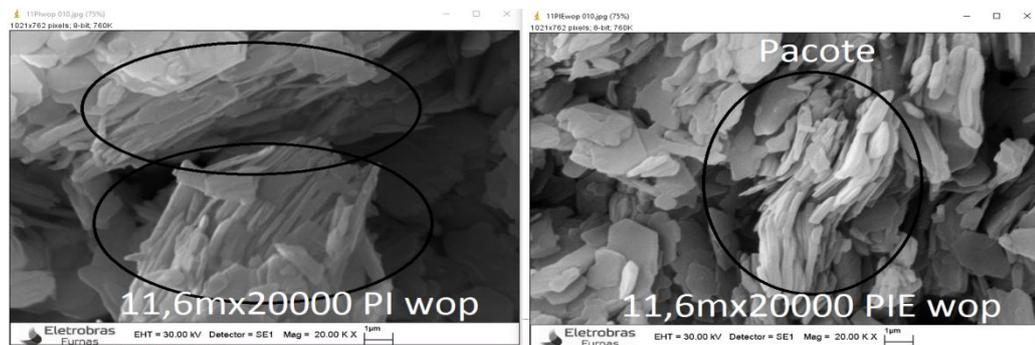


Figura 4.40 Microestruturas observadas no MEV do solo compactado dinâmica e estaticamente.

A Figura 4.41 e a Figura 4.42 apresentam respectivamente o exemplo de avaliação qualitativa realizada para um aumento de 500 vezes no solo laterítico e 3000 vezes no solo saprolítico. Observa-se nessas imagens um aparente maior fechamento dos poros na compactação dinâmica que na compactação estática para os três níveis de energia estudados. Nessas imagens são visíveis algumas trincas em amostras compactadas por ambos os métodos, trincas que podem ser atribuídas à retração por desidratação na fase de preparação das amostras para o MEV. A compactação faz maior efeito na meso e na macroporosidade dos solos profundamente intemperizados e no solo de transição e no solo saprolítico, dada à inexistência de agregados, altera-se a microestrutura como um todo.

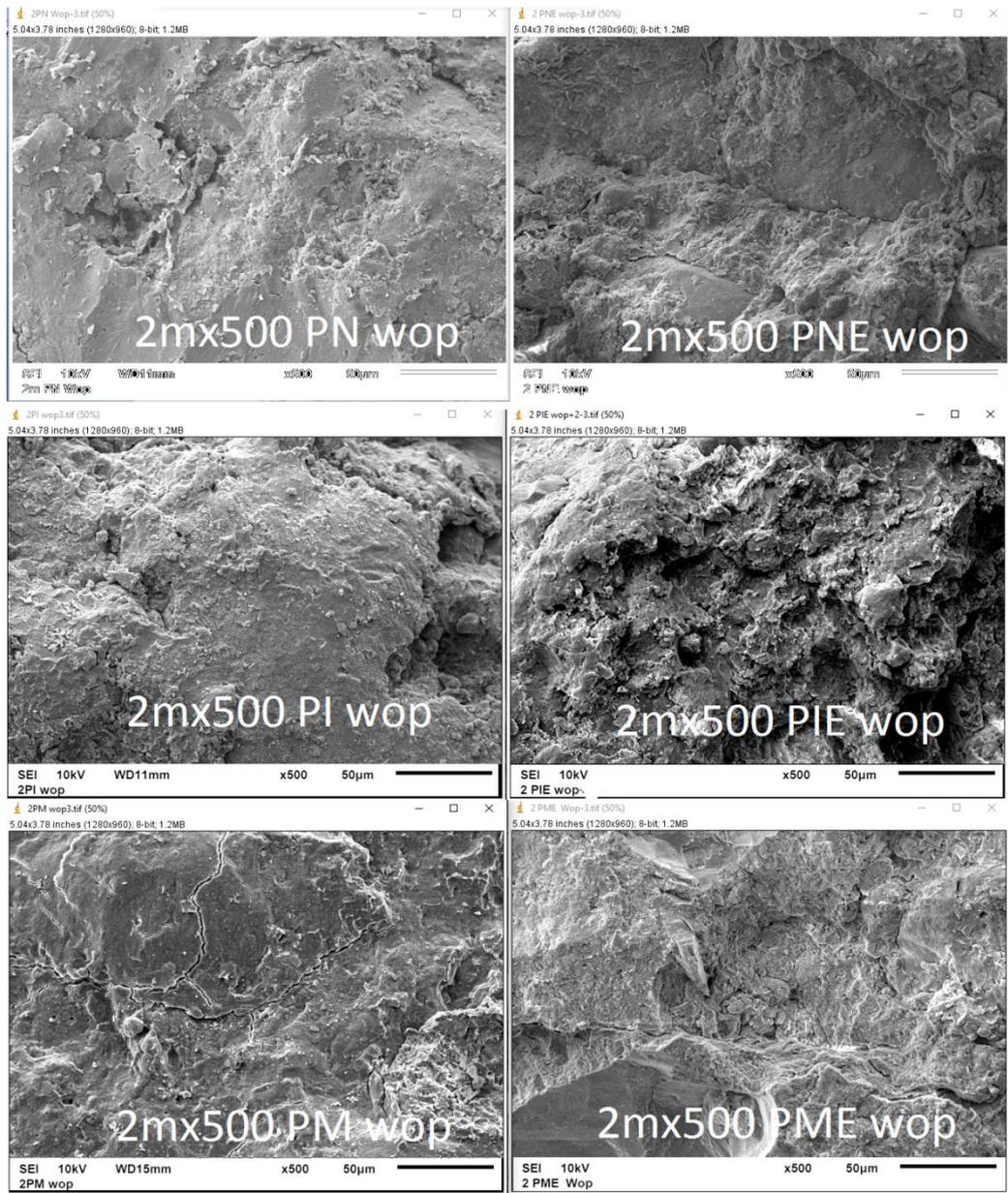


Figura 4.41 Variação estrutural nas compactações dinâmica e estática do solo coletado a 2m de profundidade.

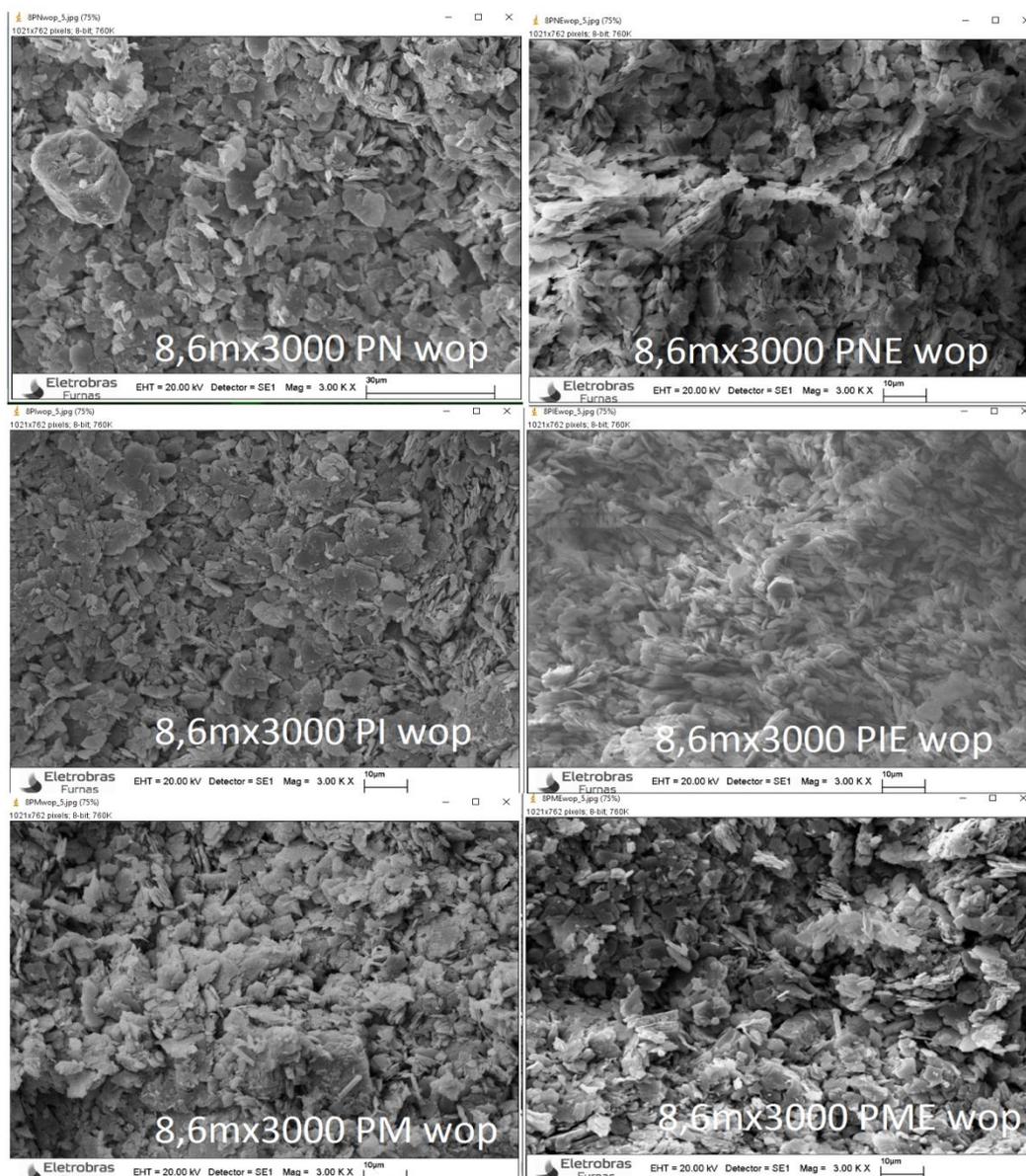


Figura 4.42 Variação estrutural nas compactações dinâmica e estática do solo coletado a 8,6m de profundidade.

A Figura 4.43 apresenta imagens obtidas com ampliação de 10.000 vezes para o solo coletado a 8,6 m de profundidade e compactado estática e dinamicamente na condição ótima das três energias estudadas: Proctor normal, Proctor intermediário e Proctor modificado. As características estruturais ficaram mais nítidas nas energias Proctor normal e Proctor intermediário, provavelmente devido a um mau posicionamento da amostra compactada na energia Proctor modificado. A comparação entre as imagens faz sobressair uma maior orientação das partículas com o aumento da energia de compactação assim como na compactação dinâmica essa orientação foi

aparentemente maior que na estática. Observa-se nas imagens de um modo geral certa presença de pacotes de argila preservados para os dois tipos de energia utilizados, sendo que no Proctor modificado aparenta certa destruição desses pacotes de argila.

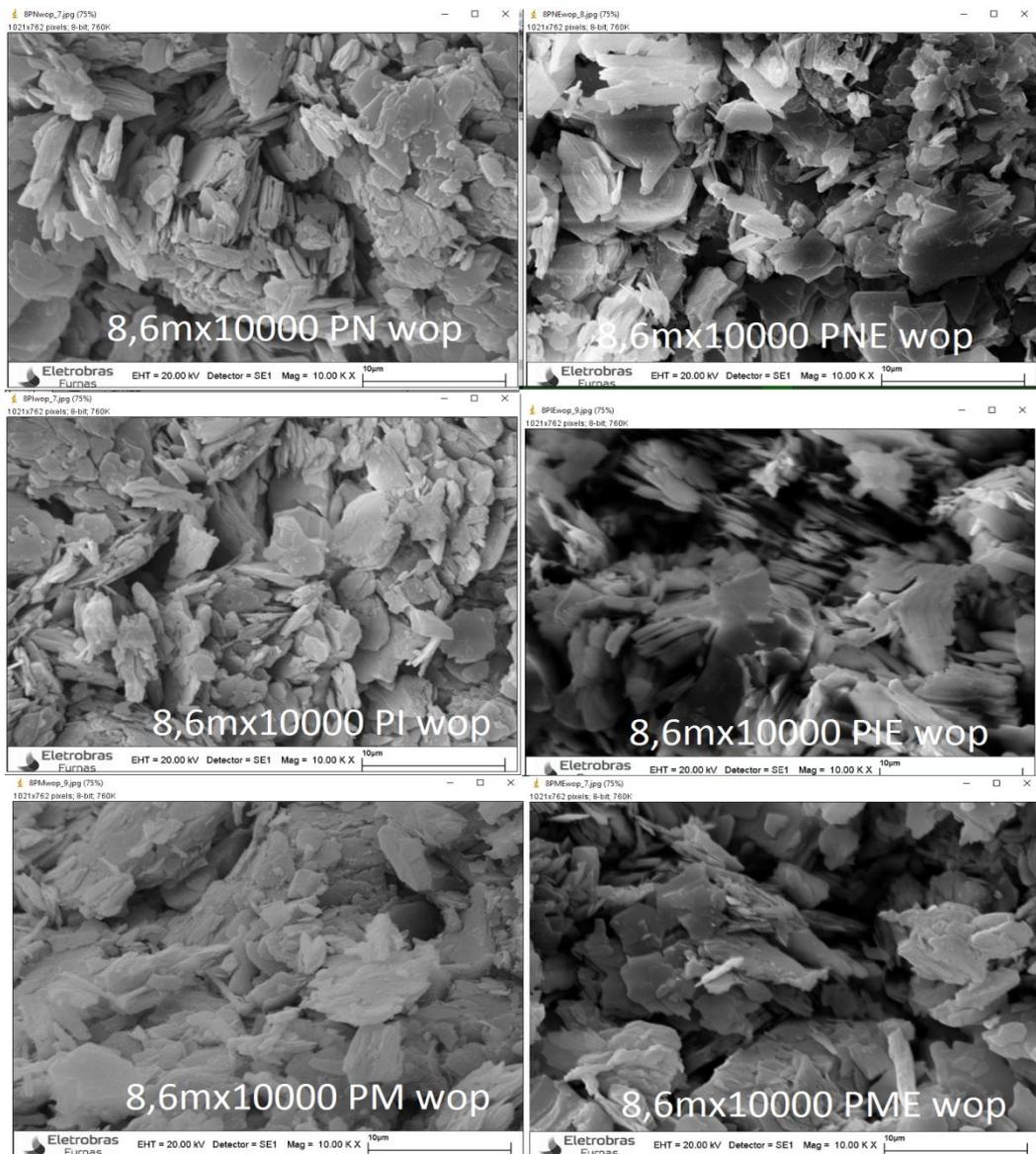


Figura 4.43 Variação da microestrutura na compactação dinâmica e estática de amostra coletada a 8,6 m de profundidade e compactada.

Para avaliar semi quantitativamente as porosidades dos solos compactados foram feitas análises das imagens do MEV, onde é mais claro o comportamento nas condições secas, úmidas e ótimas, além de ser mais fácil diferenciar o comportamento do solo diante das compactações dinâmica e estática para as três energias. Com base na Figura 4.41 e na Figura 4.43 complementadas com outras imagens obtidas no MEV foram definidos os dados constantes das Tabela 4.18 e Tabela 4.19. De um modo geral é

possível observar que não ocorrem variações muito significativas nos valores calculados de relação de área ao se alterar as umidades, energia e tipos de energia de compactação utilizados, inclusive, contrariando em alguns casos, o esperado. No entanto, de um modo geral verifica-se que o solo apresenta no ramo seco maior porosidade, seguido do ramo úmido. A menor porosidade é, como esperado, registrada para a condição ótima. Porém, há que se destacar, que o mais relevante é fazer um paralelo com as análises realizadas para o solo em estado natural, de onde sobressai um importante fechamento de poros com a compactação, em especial dos macroporos presentes nos solos profundamente intemperizados. É também notória a maior alteração estrutural gerada pela compactação dinâmica para a qual sobressai a predominância de menores valores de porosidade.

Tabela 4.18 Avaliação semiquantitativa da porosidade do horizonte laterítico compactado dinâmica e estaticamente.

Profundidade e aumento	Profundidade e condição de compactação	Compactação dinâmica			Compactação estática			
		Área de poros Ap [µm ²]	Área total At [µm ²]	Relação Ap/At [%]	Profundidade e condição de compactação	Área de poros Ap [µm ²]	Área total At [µm ²]	Relação Ap/At [%]
2mx500	2PN Wop	5493,75	46875,00	11,7	2 PNE wop	5683,69	48371,86	11,8
2mx500	2PN wop -2	6686,79	51595,57	13,0	2 PNE Wop-2	6644,93	49148,85	13,5
2mx500	2PN wop +2	6085,18	48371,86	12,6	2 PNE Wop+2	6650,67	51595,57	12,9
2mx500	2PI wop	5006,80	48374,91	10,4	2 PIE Wop	5093,95	45441,10	11,2
2mx500	2PI Wop - 2	5512,54	50760,08	10,9	2 PIE wop-2	5504,08	47613,14	11,6
2mx500	2PI wop +2	5553,44	48374,91	11,5	2 PIE wop+2	7800,08	49152,00	15,9
2mx500	2PM wop	3931,91	49148,85	8,0	2 PME Wop	4442,20	49139,42	9,0
2mx500	2PM wop -2	4245,30	49944,72	8,5	2 PME wop-2	4674,36	49152,00	9,5
2mx500	2PM wop +2	4039,05	48371,86	8,4	2 PME wop+2	4649,78	49152,00	9,5
2mx10000	2PN Wop	10,60	113,61	9,3	2 PNE wop	13,26	127,89	10,4
2mx10000	2PN wop -2	13,26	133,28	10,0	2 PNE Wop-2	12,72	113,57	11,2
2mx10000	2PN wop +2	10,24	122,83	8,3	2 PNE Wop+2	12,58	113,61	11,1
2mx10000	2PI wop	10,95	145,18	7,5	2 PIE Wop	15,87	133,28	11,9
2mx10000	2PI Wop - 2	11,10	122,88	9,0	2 PIE wop-2	13,59	133,33	10,2
2mx10000	2PI wop +2	11,28	133,28	8,5	2 PIE wop+2	12,99	127,95	10,2
2mx10000	2PM wop	15,07	122,68	12,3	2 PME Wop	14,10	109,36	12,9
2mx10000	2PM wop -2	15,23	127,95	11,9	2 PME wop-2	15,75	118,06	13,3
2mx10000	2PM wop +2	15,73	127,89	12,3	2 PME wop+2	17,19	133,28	12,9
5mx500	5PN wop	5127,42	48371,86	10,6	5 PNE wop	4991,88	46872,14	10,7
5mx500	5PN wop -2	5679,08	49947,97	11,4	5 PNE wop-2	6040,39	49148,85	12,3
5mx500	5PN Wop + 2	5509,26	49947,97	11,0	5 PNE wop+2	6393,88	52451,85	12,2
5mx500	5PI wop	4659,61	49152,00	9,5	5 PIE wop	4878,67	48160,57	10,1
5mx500	5PI wop -2	4760,03	49275,66	9,7	5 PIE Wop-2	5030,38	49269,16	10,2
5mx500	5PI wop +2	4764,73	49944,72	9,5	5 PIE wop +2	5299,92	48712,53	10,9
5mx500	5PM wop	2084,36	49275,66	4,2	5 PME wop	4464,38	49275,66	9,1
5mx500	5PM wop -2	4557,40	49269,16	9,3	5 PME wop-2	4810,23	49846,97	9,7
5mx500	5PM Wop + 2	2334,75	50426,57	4,6	5 PME wop+2	3050,91	50428,27	6,1
5mx10000	5PN wop	15,58	111,98	13,9	5 PNE wop	12,13	121,76	10,0
5mx10000	5PN wop -2	17,75	125,34	14,2	5 PNE wop-2	17,17	118,36	14,5
5mx10000	5PN Wop + 2	16,97	121,76	13,9	5 PNE wop+2	17,84	129,05	13,8
5mx10000	5PI wop	11,66	118,38	9,9	5 PIE wop	15,77	125,24	12,6
5mx10000	5PI wop -2	12,51	125,32	10,0	5 PIE Wop-2	21,05	121,69	17,3
5mx10000	5PI wop +2	12,56	125,34	10,0	5 PIE wop +2	21,33	132,82	16,1
5mx10000	5PM wop	14,43	118,36	12,2	5 PME wop	12,60	125,10	10,1
5mx10000	5PM wop -2	10,16	115,09	8,8	5 PME wop-2	14,51	125,34	11,6
5mx10000	5PM wop +2	10,18	121,76	8,4	5 PME wop+2	10,95	121,69	9,0

A Tabela 4.19 apresenta os resultados obtidos para o solo de transição (8,6 m) e para o solo saprolítico (11,6 m). Verifica-se de um modo geral que para esses solos a relação de área de poros é quase sempre maior na compactação estática apontando assim para uma maior quebra de pacotes de argila ou orientação de partículas quando do uso da energia dinâmica de compactação, o que dificultaria a detecção dos poros e por consequência a relação de área de poros.

Tabela 4.19 Avaliação semiquantitativa da porosidade dos horizontes de transição e saprolito compactado dinâmica e estaticamente.

Profundidade e aumento	Profundidade e condição de compactação	Compactação dinâmica			Compactação estática			
		Área de poros Ap [µm ²]	Área total At [µm ²]	Relação Ap/At [%]	Profundidade e e condição de compactação	Área de poros Ap [µm ²]	Área total At [µm ²]	Relação Ap/At [%]
8,6mx600	8PNwop	22353,6	259321,9	8,6	8PNEwop	27069,1	269881,2	10,0
8,6mx600	8PNwop-2	27275,3	262767,9	10,4	8PNEwop-2	28431,5	262767,9	10,8
8,6mx600	8PNwop+2	24964,0	262779,4	9,5	8PNEwop+2	27204,0	259333,2	10,5
8,6mx600	8PIwop	17893,2	259321,9	6,9	8PIEwop	21931,8	258935,0	8,5
8,6mx600	8PIwop-2	22612,9	259321,9	8,7	8PIEwop-2	24365,8	255943,3	9,5
8,6mx600	8PIwop+2	19828,7	262980,7	7,5	8PIEwop+2	23062,0	262964,9	8,8
8,6mx600	8PMwop	19882,0	252630,3	7,9	8PMEwop	21368,1	259321,9	8,2
8,6mx600	8PMwop-2	22045,3	249381,2	8,8	8PMEwop-2	23642,0	259232,2	9,1
8,6mx600	8PMwop+2	23326,4	266283,0	8,8	8PMEwop+2	27562,0	252630,3	10,9
8,6mx10000	8PNwop	113,5	923,9	12,3	8PNEwop	128,7	912,4	14,1
8,6mx10000	8PNwop-2	107,4	928,6	11,6	8PNEwop-2	113,4	936,0	12,1
8,6mx10000	8PNwop+2	107,3	900,1	11,9	8PNEwop+2	121,4	951,0	12,8
8,6mx10000	8PIwop	76,4	928,7	8,2	8PIEwop	122,8	951,0	12,9
8,6mx10000	8PIwop-2	84,5	950,9	8,9	8PIEwop-2	137,8	955,6	14,4
8,6mx10000	8PIwop+2	81,1	958,7	8,5	8PIEwop+2	130,4	951,0	13,7
8,6mx10000	8PMwop	85,7	943,5	9,1	8PMEwop	131,4	943,4	13,9
8,6mx10000	8PMwop-2	94,0	943,4	10,0	8PMEwop-2	97,3	936,0	10,4
8,6mx10000	8PMwop+2	88,1	951,0	9,3	8PMEwop+2	93,7	936,0	10,0
11,6mx600	11PNwop	20552,8	254997,2	8,1	11PNEwop	Sem	sem	
11,6mx600	11PNwop-2	22520,2	262779,4	8,6	11PNEwop-2	Sem	sem	
11,6mx600	11PNwop+2	24316,3	269881,2	9,0	11PNEwop+2	25362,8	259333,2	9,8
11,6mx600	11PIwop	30316,0	259333,2	11,7	11PIEwop	33161,3	262767,9	12,6
11,6mx600	11PIwop-2	19761,0	262779,4	7,5	11PIEwop-2	19858,3	262675,7	7,6
11,6mx600	11PIwop+2	19524,5	262779,4	7,4	11PIEwop+2	23334,8	262779,4	8,9
11,6mx600	11PMwop	15844,5	266294,8	6,0	11PMEwop	17761,1	266283,0	6,7
11,6mx600	11PMwop-2	17115,2	259321,9	6,6	11PMEwop-2	17558,5	255954,3	6,9
11,6mx600	11PMwop+2	20285,7	262767,9	7,7	11PMEwop+2	Sem	sem	
11,6mx10000	11PNwop	95,5	958,7	10,0	11PNEwop	Sem	sem	
11,6mx10000	11PNwop-2	67,8	937,9	7,2	11PNEwop-2	Sem	sem	
11,6mx10000	11PNwop+2	95,4	936,0	10,2	11PNEwop+2	96,9	938,0	10,3
11,6mx10000	11PIwop	82,2	943,4	8,7	11PIEwop	88,5	929,4	9,5
11,6mx10000	11PIwop-2	86,3	946,6	9,1	11PIEwop-2	91,3	955,4	9,6
11,6mx10000	11PIwop+2	84,2	938,0	9,0	11PIEwop+2	91,4	955,6	9,6
11,6mx10000	11PMwop	72,0	946,7	7,6	11PMEwop	84,5	966,4	8,7
11,6mx10000	11PMwop-2	72,5	946,7	7,7	11PMEwop-2	84,6	946,7	8,9
11,6mx10000	11PMwop+2	75,5	929,4	8,1	11PMEwop+2	Sem	sem	

A Figura 4.44 mostra que tanto para o solo profundamente intemperizado (2 m e 5 m de profundidade) como para o solo de transição (8,6 m de profundidade) e para o solo saprolítico (profundidade de 11,6 m) as áreas relativas obtidas para a compactação estática são maiores que as obtidas para a compactação dinâmica, confirmando a ideia de quebra de agregados ou pacotes de argila conforme o caso quando da compactação dinâmica. No caso do solo saprolítico ocorre ainda à possibilidade de maior orientação de partículas quando da compactação dinâmica. Destaca-se que em termos de porosidade elas são aproximadamente as mesmas porosidades para os dois métodos de compactação, pois o solo foi compactado estaticamente buscando reproduzir o peso específico aparente seco do solo compactado dinamicamente. Dessas observações sobressaem duas conclusões práticas de grande relevância:

1) para os solos lateríticos usados na construção rodoviária deve-se evitar rolos vibratórios de patas curtas, pois o mesmo por sua energia dinâmica é susceptível de quebrar agregados, o que se por um lado tende a aumentar o peso específico aparente seco do solo compactado, por outro, tenderá a piorar o seu comportamento mecânico por tornar a textura do solo mais fina;

2) para os solos lateríticos usados na construção de núcleos de barragens de terra deve-se usar rolos vibratórios de patas curtas de modo complementar, pois o mesmo por sua energia dinâmica é susceptível de quebrar agregados, o que tende a aumentar o peso específico aparente seco do solo compactado e por consequência proporcionar uma redução na permeabilidade; destaca-se porém, que no caso de barragens em maciço único, sem núcleo, deve ser avaliada a influência da quebra estrutural gerada pelo rolo vibratório tanto no comportamento mecânico, que tenderá a piorar, como na permeabilidade que tenderá a diminuir.

Na Figura 4.44: PN - Proctor normal; PI - Proctor intermediário, PM - Proctor modificado; PNE - Proctor normal, compactação estática; PIE - Proctor intermediário, compactação estática; PME - Proctor modificado, compactação estática; Wop - condição de umidade ótima.

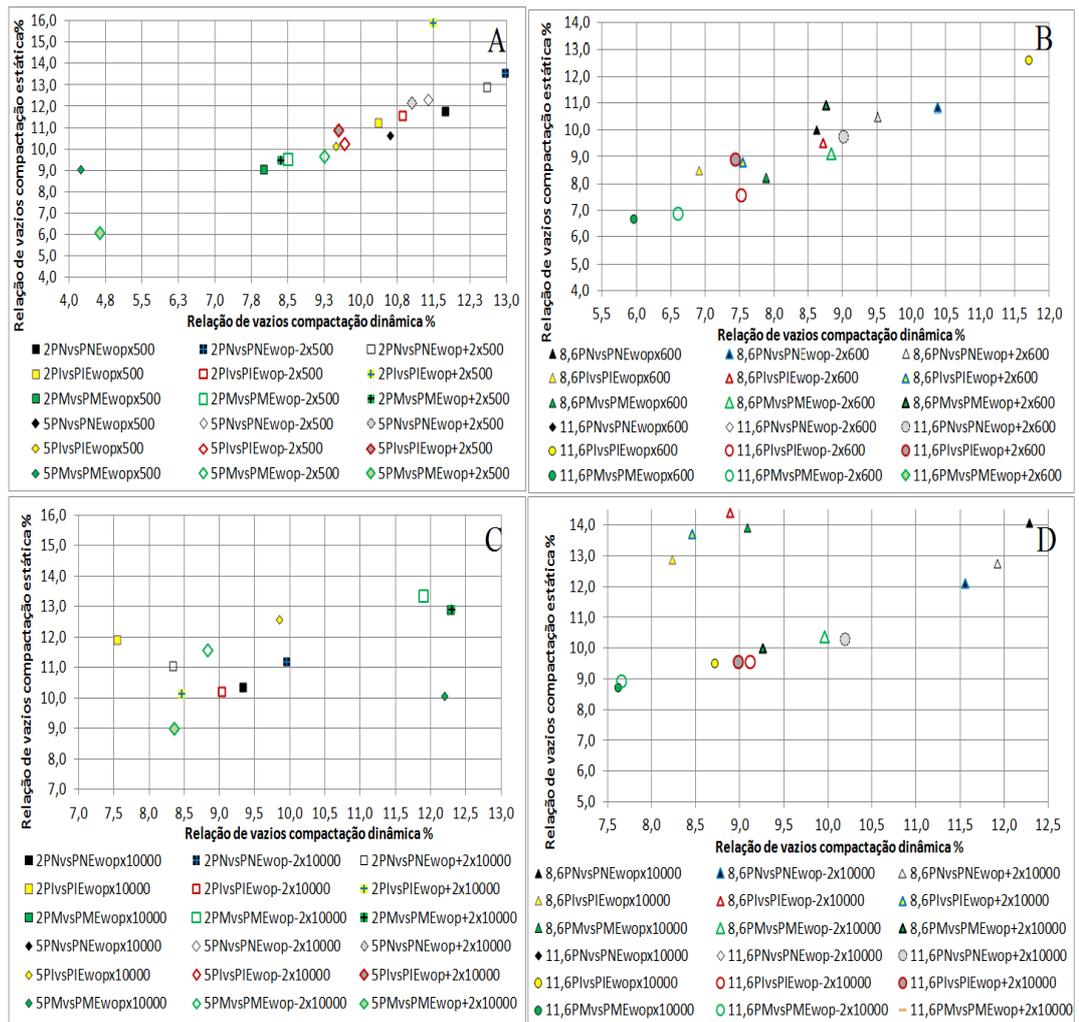


Figura 4.44 Comparação relações de porosidade compactação estática e dinâmica.

4.4.3 DISTRIBUIÇÃO DE POROS NO SOLO AVALIADA A PARTIR DAS IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Neste subitem apresenta-se a análise da distribuição dos poros contidos nos solos provenientes das profundidades estudadas tanto em estado natural, como compactado na condição ótima para ambos os métodos, dinâmico e estático. As análises foram realizadas a partir das imagens MEV utilizando-se o programa Imagej. Atribuiu-se a escala correspondente ao aumento e com as respectivas porosidades para os estados naturais e compactados avaliados semi-quantitativamente nas Tabela 4.14 e Tabela 4.15, encontraram-se as quantidades de poros para cada imagem. Os intervalos de poros estabelecidos são: microporos intra-agregados de $0,001 \mu\text{m}^2$ até $0,6 \mu\text{m}^2$, considerando-se uma subdivisão em $0,36 \mu\text{m}^2$; microporos interagregados com poros de $0,6 \mu\text{m}^2$ até $9 \mu\text{m}^2$ considerando-se uma subdivisão em $3 \mu\text{m}^2$; mesoporos interagregados com poros

de 9 μm^2 até 50 μm^2 ; macroporos para os poros maiores que 50 μm^2 . Para cada profundidade estudada elaborou-se uma tabela de frequências similar à Tabela 4.20, mas para melhor observação os resultados dessas frequências estão apresentados nas Figura 4.47, Figura 4.48, Figura 4.49 e Figura 4.50. Nessas figuras deve-se considerar: PN - Proctor normal; PI - Proctor intermediário; PM - Proctor modificado; PNE – Proctor normal, compactação estática; PIE - Proctor intermediário, compactação estática; PME - Proctor modificado, compactação estática; Nat – solo em estado natural; wop - umidade ótima.

Na Tabela 4.20 tem-se os seguintes significados para os símbolos: fi que refere à frequência, Fi é a frequência acumulada, ni é a frequência relativa e o símbolo Ni representa a frequência relativa acumulada, as siglas wop indicam umidade ótima.

Tabela 4.20 Tabelas de frequências de distribuição dos macro e microporos para a profundidade de 2 m.

2mx100		Distribuição de frequências dos poros				2PNWopx100		Distribuição de frequências dos poros			
intervalo		fi	Fi	ni	Ni	intervalo		fi	Fi	ni	Ni
0,001	0,36	0	0	0,00%	0,00%	0,001	0,36	0	0	0,00%	0,00%
0,36	0,6	0	0	0,00%	0,00%	0,36	0,6	0	0	0,00%	0,00%
0,6	3	73	73	10,24%	10,24%	0,6	3	94	94	12,97%	12,97%
3	9	79	152	11,08%	21,32%	3	9	143	237	19,72%	32,69%
9	50	252	404	35,34%	56,66%	9	50	303	540	41,79%	74,48%
50	90633,85	309	713	43,34%	100,00%	50	20683,05	185	725	25,52%	100,00%
2Natx10000		Distribuição de frequências dos poros				2PNWopx10000		Distribuição de frequências dos poros			
intervalo		fi	Fi	ni	Ni	intervalo		fi	Fi	ni	Ni
0,001	0,36	510	510	81,60%	81,60%	0,001	0,36	1337	1337	78,51%	78,51%
0,36	0,6	61	571	9,76%	91,36%	0,36	0,6	155	1492	9,10%	87,61%
0,6	3	50	621	8,00%	99,36%	0,6	3	211	1703	12,39%	100,00%
3	9	2	623	0,32%	99,68%	3	9	0	1703	0,00%	100,00%
9	50	2	625	0,32%	100,00%	9	50	0	1703	0,00%	100,00%
50	2500	0	625	0,00%	100,00%	50	2500	0	1703	0,00%	100,00%

A análise de distribuição de poros permite averiguar a mudança dos macro, meso e microporos e de suas distribuições ao passar do estado natural para as diferentes condições de compactação sendo possível observar reduções, eventuais ampliações e redistribuições nos macro, meso e microporos. Essas análises para melhor clareza foram feitas para diferentes ampliações, pois, por exemplo, para ampliações pequenas se visualiza bem os macroporos, mas os microporos tendem a tornarem-se imperceptíveis e para maiores ampliações das imagens os macroporos tendem a desaparecer dando-se destaque aos microporos (Figura 4.45).

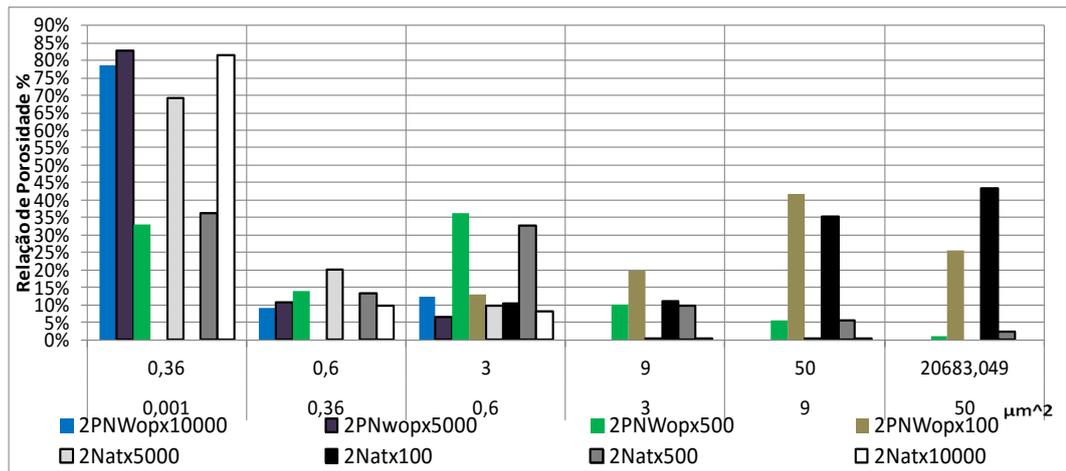


Figura 4.45 Frequência e distribuição de poros para a profundidade de 2 m.

A redução da macroporosidade existente no solo no estado natural em consequência da compactação é visível e notória em todos os casos, tanto nas tabelas de análise das microscopias das amostras compactadas (por exemplo, Tabela 4.20), quanto nas tabelas e gráficos de frequências, como exemplo, na Figura 4.45. Destaca-se, no entanto, que na microestrutura pode acontecer redução, redistribuição ou aumento dos microporos, seja pelo fechamento de vazios, rearranjo estrutural ou quebra de agregados intervindo nos poros maiores. Porém, como já demonstrado em outros estudos realizados para solos profundamente intemperizados, é pouco provável que os microporos existentes no interior dos agregados sejam afetados, (Farias *et al.*, 2011; Farias, 2012). Essas variações da microestrutura ocorrem em graus distintos de acordo com a energia e método de compactação, sendo mais complexas em solos plásticos.

Tomando como exemplo a distribuição de poros para a profundidade de 2 m da Figura 4.45, na ampliação de 100 vezes, é fácil ver a mudança ocorrida entre o estado natural (preto) com 43% de macroporos e o solo compactado na umidade ótima da energia Proctor normal, com 25% de macroporos (Verde claro). Esse tipo de redução foi também constatado para a profundidade de 5 m e deve se repetir ao longo do perfil para toda a zona profundamente intemperizada. Nesta figura pode-se observar a variação de macroporos nas ampliações de 100 vezes e 500 vezes, assim como as de microporos, nas ampliações de 5.000 vezes e 10.000 vezes, ao se analisar o solo nos estados natural e compactado.

A análise da maior ampliação (10.000 vezes) na Figura 4.45 revela uma diferença de 4% entre o teor de microporos ao se analisar o solo em estado natural

(branco, 82%) e compactado na umidade ótima da energia Proctor normal (azul, 78%), no entanto, apesar dessa diferença poder ser oriunda da redistribuição e fechamento meso e de macroporos existentes entre os agregados e partículas, há que se considerar a possibilidade de diferença estrutural entre os dois solos na origem.

Quanto aos macroporos, observa-se o esperado, a sua diminuição em tamanho e frequência quando se passa do estado natural para o compactado e quando se eleva a energia de compactação. Isso se dá porque a compactação e o aumento da energia de compactação promovem o fechamento de poros ou a construção de poros menores podendo macro e mesoporos passar à condição de microporos. Os graus de orientação das partículas assim como o nível de quebra dos agregados e reestruturações influem ou mudam a quantidade de microporos existentes interagregados sendo menos provável que isso ocorra intra-agregados. Como exemplo, uma estrutura agregada natural com grandes macroporos como a do solo coletado a 2 m de profundidade, ao ser analisada com ampliação de 100 vezes concentra 43% de seus vazios em macroporos, mas observando a mesma amostra para uma ampliação de 500 vezes restam apenas 8% dos poros na condição macro e dos 92% referentes às condições de micro e mesoporos, 36% se concentram intra-agregados. A análise do mesmo solo compactado leva a observação semelhante permanecendo 1% como macroporos e 99% entre meso e microporos. Portanto, as ampliações terminam levando à marginalização dos poros maiores.

É evidente a agregação nos solos tropicais profundamente intemperizados do perfil de intemperismo estudado como mostraram as análises granulométricas e as imagens microscópicas até aqui analisadas. Esses agregados, como já discutido, apresentam microporos em sua constituição. No entanto, nas análises de distribuição de poros com base em imagens obtidas por meio de microscopia, a quantificação dos diferentes tamanhos de poros é relativizada pela ampliação dada à imagem. Por exemplo, o solo natural coletado a 2 m de profundidade quando observado com aumento de 500 vezes apresenta mais de 90% de microporos, mas apenas 36% se encontram intra-agregados, no entanto, quando do uso uma ampliação de 10.000 se observa que 99% são microporos dos quais 82% se encontram intra-agregados.

Estas frequências de distribuição de poros são em caráter estimativos similares a uma porosimetria, onde é possível construir curvas de contorno representativa da distribuição de poros como mostram os resultados da Figura 4.46. Nessa figura se

observa zonas de menor variação nas faixas de tamanho de poros correspondentes a micro, meso e macroporos indicando a provável distribuição de poros.

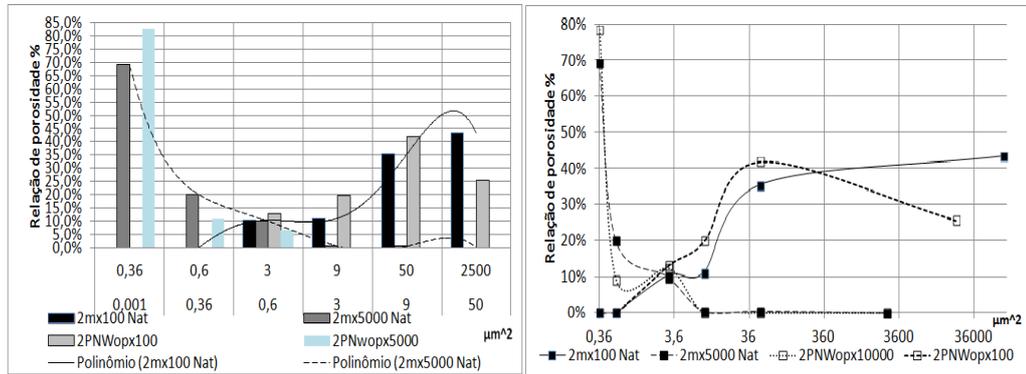


Figura 4.46 Semelhança das curvas de frequência com curvas de distribuição de poros.

Como se observa nos gráficos anteriores e nas tabelas, a distribuição e variação da macroporosidade são mais sensíveis quando se altera o estado inicial do solo, por exemplo, por meio da compactação, no entanto, a microporosidade varia muito pouco ou se externa aos agregados sofrem redistribuição.

A seguir são apresentadas as distribuições de poros para os solos na condição natural e quando compactados dinamicamente e estaticamente nas condições ótimas referentes as três energias estudadas considerando-se ampliações de 100 vezes e 10.000 vezes, ampliações estas adequadas para o estudo da macroporosidade e da microporosidade respectivamente.

Na Figura 4.47, observa-se a redução da macroporosidade com a compactação e com o aumento da energia de compactação em relação ao solo em estado natural altamente poroso (verde). Tendência semelhante, mas em menor escala, é observada para os mesoporos compreendidos entre 9 e 50 μm^2 que sofrem a mesma tendência de redução com a compactação, no entanto, na condição natural essa porosidade se revela menor que a obtida para a condição de compactação Proctor normal. Isso provavelmente resulta do fato de que, com a compactação na energia normal, gera-se a transformação de macroporos em mesoporos fazendo com que o seu teor supere o registrado na amostra em estado natural. Observa-se ainda nessa figura que as energias de compactação utilizadas nesse caso foram insuficientes para gerarem microporos, razão pela qual todas as amostras analisadas apresentaram resultados muito próximos, cujas diferenças podem ser entendidas como situadas na faixa de dispersão no solo.

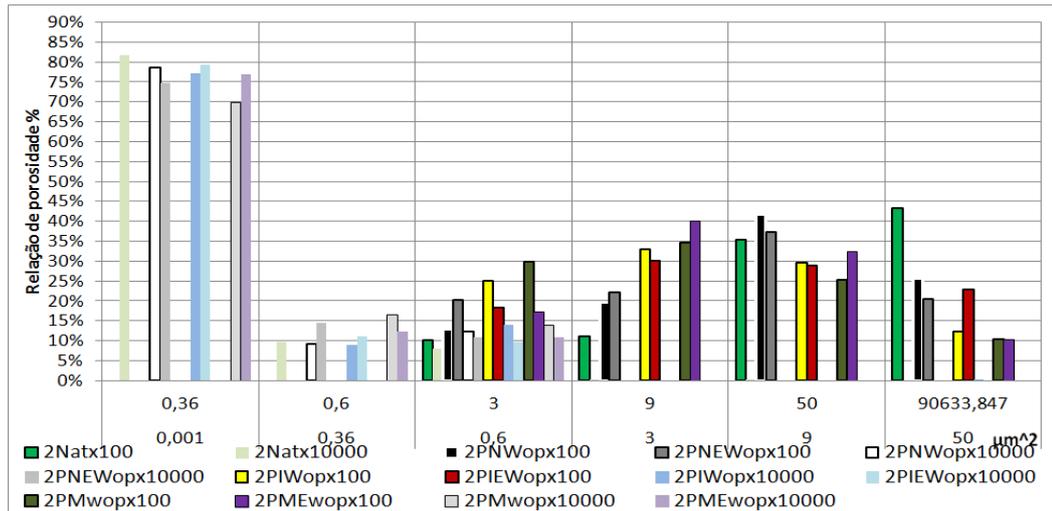


Figura 4.47 Frequência de distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 2 m.

O comportamento dos solos lateríticos estudados é muito similar e apresenta as mesmas tendências de resultados, porém, comparando-se a Figura 4.47 obtida para a amostra oriunda de 2 m de profundidade com a Figura 4.48 obtida para amostra coletada a 5 m de profundidade se observa que apesar da similaridade entre os resultados na faixa dos microporos, ocorre certa redistribuição entre os meso e macroporos.

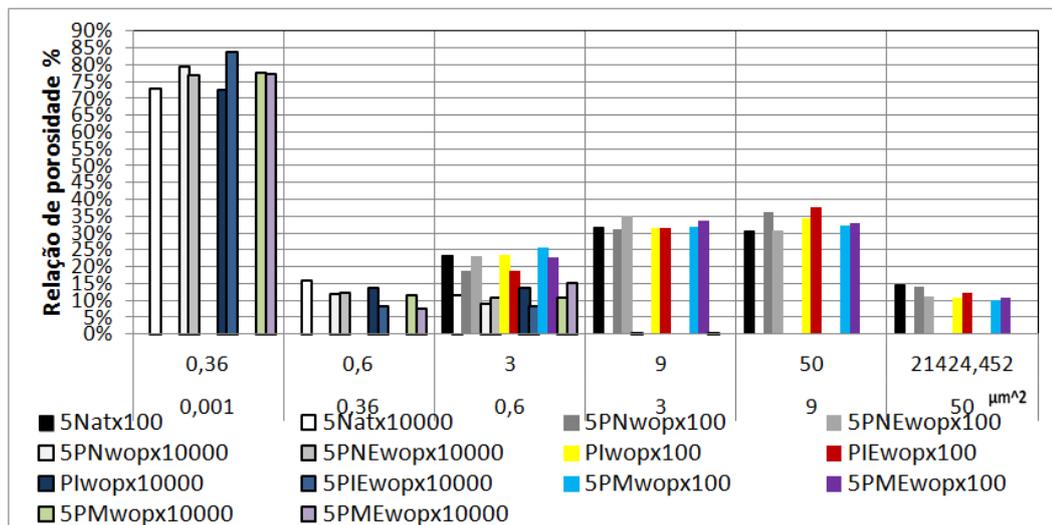


Figura 4.48 Frequência de distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 5 m.

Para os solos de transição (8,6 m), Figura 4.49, e saprolítico (11,6 m), Figura 4.50, os comportamentos foram distintos daqueles observados para os solos

profundamente intemperizados (2 m e 5 m). Observando os gráficos comparativamente é possível estabelecer algumas hipóteses sobre a distribuição de poros do solo de transição e solo saprolítico. Observa-se que o teor de microporos encontrado nesses solos considerando os poros entre $0,001 \mu\text{m}^2$ e $0,36 \mu\text{m}^2$ é muito semelhante àqueles obtidos para os solos profundamente intemperizados. Essa constatação poderia levar à ideia de que os agregados nos solos profundamente intemperizados seriam apenas isolamento de porções do solo saprolítico que foram intemperizadas. No entanto, se observadas as imagens apresentadas por Cardoso (1995) sobre microestrutura é possível concluir que esse não é o caso, restando a hipótese de que a energia eletroquímica mantida no meio permitiu nos dois solos interações entre partículas que levaram a níveis semelhantes de microporosidade. Destaca-se ainda a tendência de aumento desses poros com a compactação no solo de transição e no solo saprolítico.

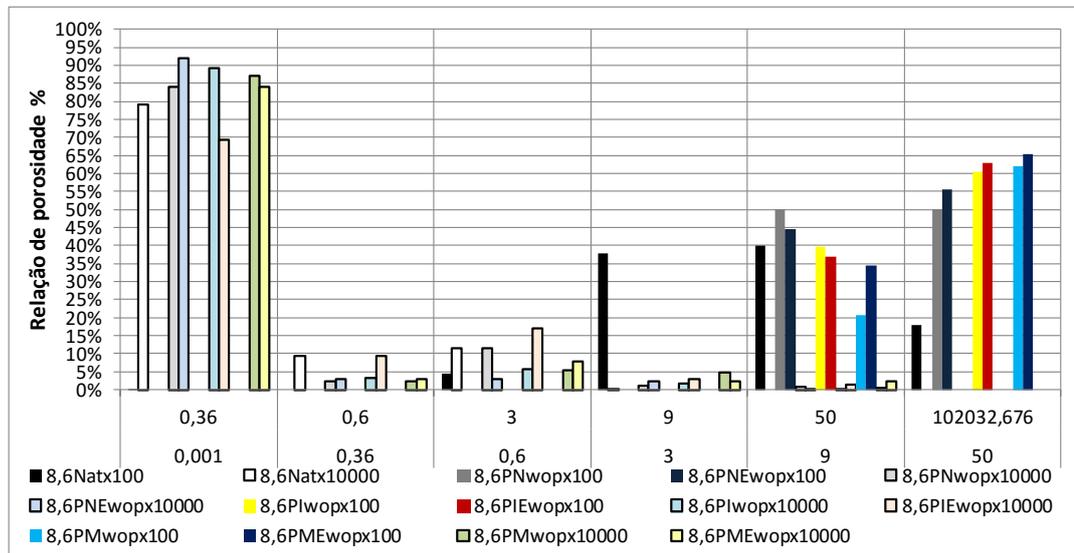


Figura 4.49 Frequência da distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 8,6 m.

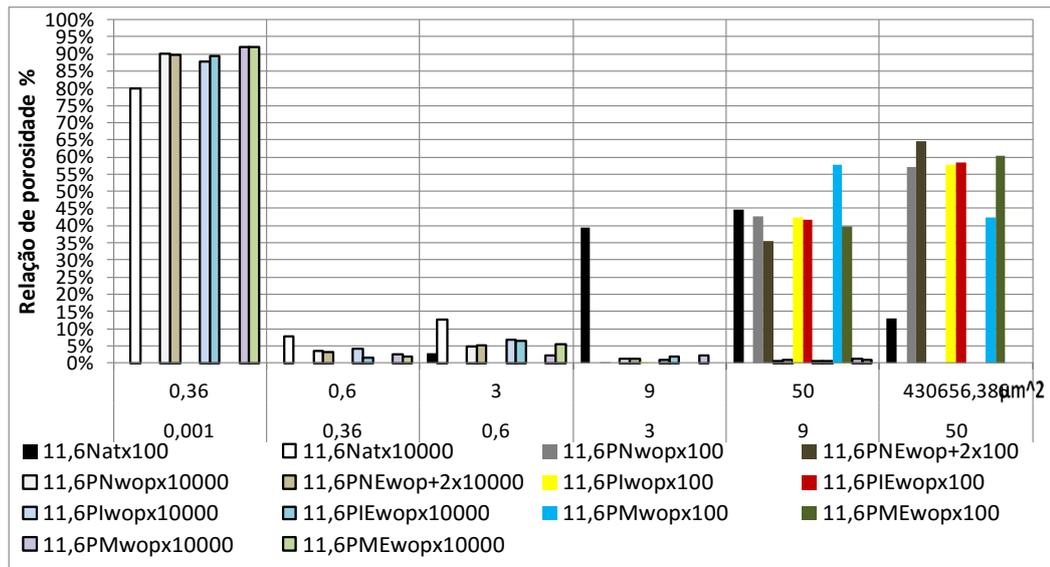


Figura 4.50 Frequência da distribuição de poros do solo natural e compactado, profundidade 11,6 m.

Faz-se necessário destacar, que apesar das dimensões e quantidades semelhantes dos microporos compreendidos entre $0,001 \mu\text{m}^2$ e $0,36 \mu\text{m}^2$ nos solos profundamente intemperizados e nos solos de transição e saprolítico, não se trata da mesma definição conceitual de arranjo estrutural, devendo-se entender que se trata de poros intra-agregados nos solos profundamente intemperizados e nos outros dois solos de microporos entre partículas.

Analisando-se agora os poros entre $0,36 \mu\text{m}^2$ e $9 \mu\text{m}^2$, observa-se que no solo de transição e no solo saprolítico eles existem em muito menor quantidade que nos solos profundamente intemperizados, sendo que nos primeiros eles tendem a existir em maior quantidade no solo natural e nestes últimos no solo compactado. Provavelmente como consequência da tendência à diminuição desses poros e do aumento do teor dos poros entre $0,001 \mu\text{m}^2$ e $0,36 \mu\text{m}^2$ esteja ocorrendo a diminuição no teor dos macroporos com dimensão superior a $9 \mu\text{m}^2$ quando se compacta o solo e quando se amplia a energia de compactação. Essa observação é relevante e requer melhor averiguação, por exemplo, por meio de ensaios de permeabilidade e triaxiais, pois certamente essa mudança na distribuição de poros implicará em alterações no comportamento hidromecânico.

Cabe ainda destacar, que enquanto no solo de transição os poros entre $9 \mu\text{m}^2$ e $50 \mu\text{m}^2$ tendem a diminuir com o aumento da energia de compactação aqueles acima desse limite superior tendem a aumentar com a energia de compactação (Figura 4.49).

Já no solo saprolítico estudado (Figura 4.50), não se verifica tendência marcante da influência da compactação nos poros de tamanho superior a $9 \mu\text{m}^2$.

Na profundidade maior (Figura 4.50), o comportamento descrito do solo saprolítico continua presente para a microporosidade e mesoporosidade, mas a diferença de concentração de macroporos é mínima, e para os outros intervalos também tem-se maior regularidade na distribuição.

Finalizando essas discussões sobre a estrutura dos solos estudados, a análise das imagens anteriores sobre as frequências de distribuição de poros, considerando os intervalos estabelecidos de microporos intra-agregados, interagregados e interpartículas, mesoporos e macroporos, observa-se redução da macroporosidade no solo proveniente de 2 m de profundidade, o que está em acordo com os resultados e análises da compactação e microscopia. Também se observa para esse solo uma redistribuição muito clara dos macroporos nos mesoporos e microporos, criando mais mesoporos com menores energias e mais microporos intra-agregados para as maiores energias. Essa redistribuição de poros torna-se mais regular tanto para os microporos quanto para os mesoporos naqueles solos com maior conteúdo de argilominerais e finos dentro do horizonte laterítico (5 m) e do solo saprolítico (11,6 m). Provavelmente a razão desse comportamento é que as partículas ou agregados de menor tamanho permitem com a compactação melhor distribuição dos seus vazios tendendo a uma estrutura mais homogênea.

A variação da distribuição dos microporos não apresenta muita dependência do método de compactação ou energia. Porém, na maior energia tem-se pequena tendência de acrescentar microporos interagregados, devido à alta redução da macroporosidade. Já que o efeito da compactação pouco afeta a microestrutura, deve-se resaltar que aquela alta alteração que acontece na macroestrutura representa fechamento de macro e mesoporos que podem se unir com pequenas ligações, gerando microporos. As pequenas diferenças na distribuição de poros relacionadas ao método de compactação ocorrem mais em nível de macroporosidade, afetando a distribuição, regularidade e frequências.

Com maiores energias de compactação, ocorre a tendência de se criar microporos interpartículas para o solo saprolítico e intra-agregados para os lateríticos, de maneira semelhante entre os métodos de compactação usados. No entanto, é possível

observar que a maior redução de macroporos acontece na compactação dinâmica confirmando as observações realizadas em itens anteriores (item 4.3), onde pela maior destruição da estrutura e maior tendência a organizar os agregados e pacotes de argila de maneira aleatória, gera-se mais contatos entre as partículas com menores espaços entre elas, ampliando-se os microporos e suas conexões interpartículas.

4.5 CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas características guardam importante relação com a porosidade e capacidade de retenção de água pelo solo, e por consequência com o comportamento hidromecânico. As curvas características dependem da composição químico-mineralógica, da textura, da porosidade e distribuição de poros no solo. Ela se associa, portanto, às propriedades físicas do solo e à natureza químico-mineralógica das partículas. Embora a literatura trate de modo indistinto as duas causas de retenção de água pelo solo, se deve diferenciá-las considerando a atuação do mecanismo capilar quando a causa é física (dimensão dos poros) e a atuação da energia de adsorção das partículas (nível de atividade da partícula) quando a causa está ligada a natureza das partículas. Geralmente as duas causas atuam conjuntamente em um solo, no entanto, com predominância de uma ou de outra.

Salienta-se que o método empregado na definição das curvas características apresenta limitações na definição das pequenas (abaixo da umidade higroscópica) e grandes (próximo à saturação, sucções inferiores a 5 – 10 kPa) sucções, no entanto, a faixa de sucções analisada cobre a faixa de umidades que de um modo geral mais interessa aos estudos geotécnicos devido ao fato de que em campo poucas vezes os solos estão totalmente saturadas ou muito ressecados quando o nível freático encontra-se abaixo da cota considerada.

Nos perfis de intemperismo tropicais geralmente as curvas características apresentam formas que variam entre a monomodal nos solos saprolíticos e bimodal nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos. O comportamento bimodal diminui no estado natural com a redução na macroporosidade o que ocorre quando da redução do teor de agregados. Logo, ao longo de um perfil de intemperismo a bimodalidade desaparece ao atingir os solos saprolíticos, pois estes são geralmente desprovidos de agregados. A bimodalidade presente nas curvas características dos solos profundamente intemperizados no estado natural diminui e tende a desaparecer com a

compactação e com o aumento da energia de compactação. Como a microporosidade presente nos solos tropicais profundamente intemperizados geralmente não é afetada pelo processo de compactação ocorre a convergência das curvas características obtidas para o solo natural e compactado para os maiores valores de sucção, ou seja, para as sucções correspondentes aos microporos.

Dentro dessa percepção, o solo estudado apresenta no horizonte laterítico, horizonte profundamente intemperizado, agregações e cimentações, tanto em estado natural como compactado. Dentro dos agregados estão os microporos. Comumente a estrutura do solo e a composição mineralógica interferem diretamente na forma da curva característica. Assim para os solos profundamente intemperizados estudados, dada a concentração dos poros nos tamanhos micro e macro, obtém-se curvas características bimodais sendo que o fechamento dos macroporos pela compactação faz com que estas curvas características passem à condição monomodal. Nesses solos profundamente intemperizados, são de grande importância para o comportamento as condições da macroestrutura e da microestrutura nas quais eles se encontram.

Para o solo saprólito, geralmente já não ocorre a distribuição dos poros entre os domínios macro e micro. Nesses solos a distribuição de poros geralmente varia entre uniforme e bem graduada, podendo ainda ser aberta com possibilidade, então, nesse caso, de apresentar excepcionalmente curva característica do tipo bimodal. Quando os solos saprolíticos são ricos em argilominerais expansivos, o que não é o caso dos solos objeto dessa pesquisa, as variações de sucção se fazem geralmente acompanhar de variações da distância interplanar basal desses argilominerais fazem com que a curva característica assuma um formato continuamente curvo (Campos *et al.*, 2008).

A condição da água na macroestrutura e na microestrutura vem ligada ao nível de saturação, assim o comportamento do solo depende das condições de saturação. Para os solos profundamente intemperizados no estado natural comumente a microestrutura encontra-se saturada e a macroestrutura variando do estado saturado ao não saturado. Nesses solos, portanto, tanto os termos “solo não saturado” como “solo parcialmente saturado” são corretos. Dentro das curvas características têm-se pontos importantes que merecem serem destacados, como os trechos de atuação da sucção em nível de macroporos e de microporos, as sucções de entrada de ar nos macroporos e nos microporos e a umidade residual (Camapum de Carvalho & Leroueil, 2004).

A Figura 4.51, apresenta as famílias de curvas características obtidas para cada profundidade estudada considerando-se o solo no estado natural e compactado estaticamente nas três energias e dinamicamente na energia intermediária.

As curvas características obtidas para as profundidades de 2 m (Figura 4.51a) e 5 m (Figura 4.51b) mostram o fechamento da macroporosidade com a compactação. O valor da sucção correspondente à entrada de ar nos macroporos depende do índice de vazios, sendo observado nos resultados obtidos para esses solos que essa sucção aumenta com a energia de compactação (Figura 4.51a e Figura 4.51b) e tende a crescer até a umidade ótima voltando a cair no ramo úmido (Figura 4.52a e Figura 4.52b). Observa-se ainda nessas figuras que com a compactação se tem com o fechamento dos macroporos uma ampliação proporcional da quantidade de microporos fazendo com que a pressão de entrada de ar desses poros se dê para graus de saturação mais elevados. As curvas características obtidas para os solos profundamente intemperizados, 2 m e 5 m, contrariamente ao verificado por Farias *et al.*, (2011) e Farias, (2012), apontam para certa redução no tamanho dos microporos com a compactação tendo em vista a elevação das curvas para as sucções mais elevadas, o que requer estudos complementares por meio de porosimetria. No entanto, embora aparentemente a sucção de entrada de ar nos microporos aparente depender da energia de compactação, um olhar mais atento mostra que o que ocorre é apenas o seu deslocamento.

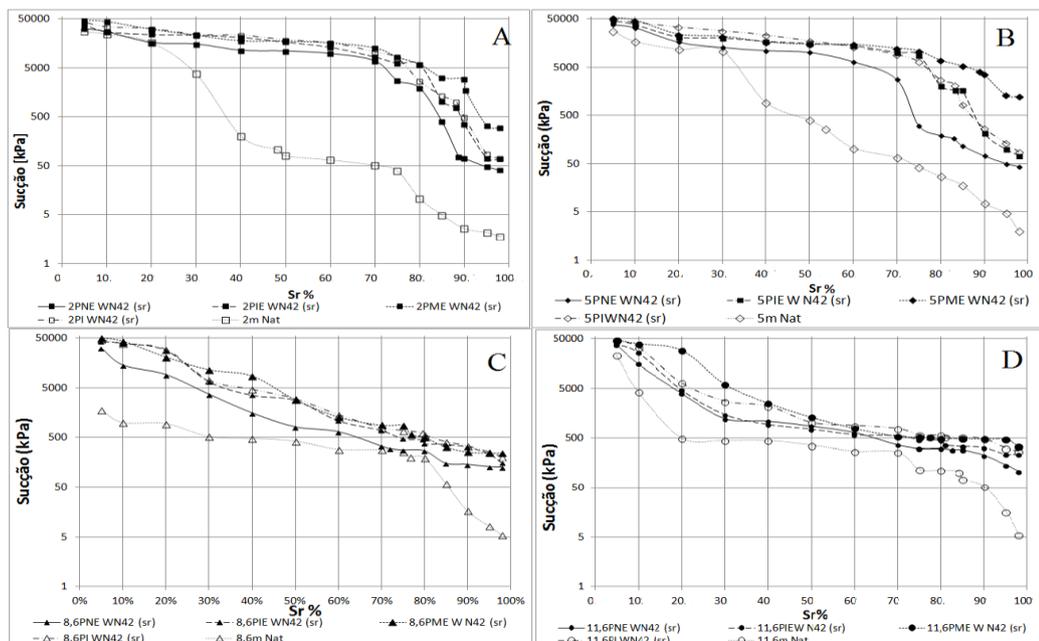


Figura 4.51 Famílias de curvas características por profundidade em função do grau de saturação (Sr).

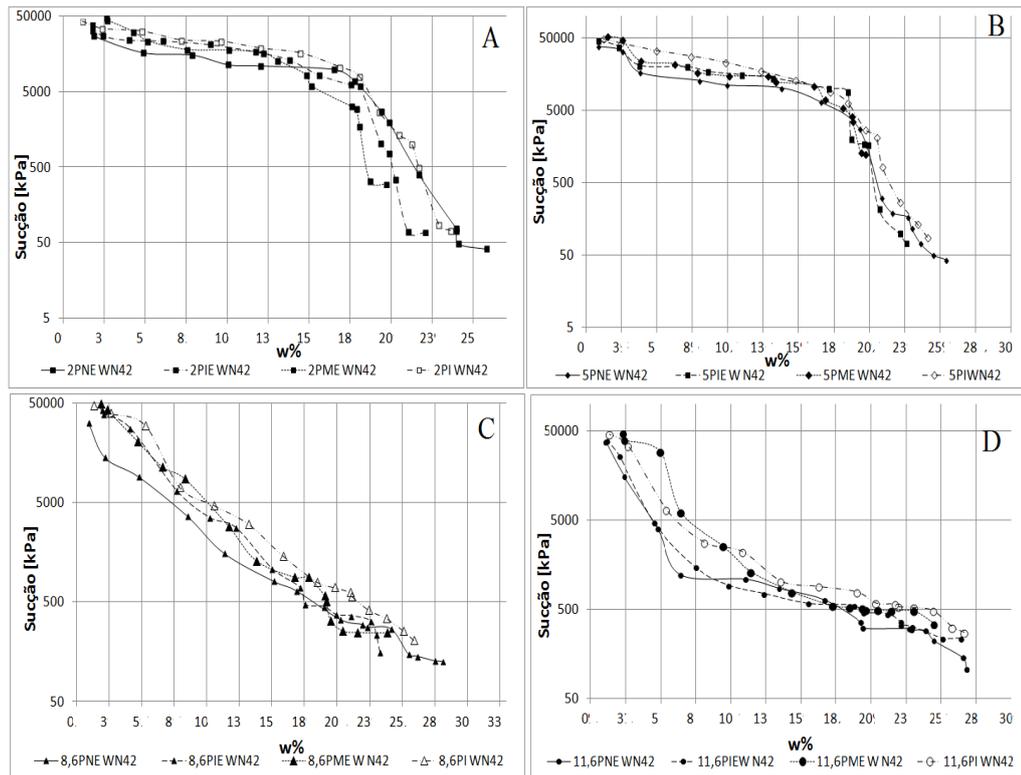


Figura 4.52 Famílias de curvas características por profundidade em função do teor de umidade (w).

Na Figura 4.51 e Tabela 4.21 observa-se, como esperado que maior a energia de compactação maior a sucção.

Tabela 4.21 Variação dos valores de sucção para cada profundidade com o solo em estado natural e compactado.

Pz [m]	Sucção kPa											
	Natural						PNE wop					
	maior	w%	nat	w%	menor	w%	maior	w%	wop	w%	menor	w%
2	27413,58	1,60	138,25	19,87	1,77	53,84	31543,19	1,82	76,92	23,97	41,41	25,81
5	27732,00	2,06	262,40	26,48	2,01	45,17	37744,87	1,85	165,76	22,71	43,00	25,37
8,6	1769,67	1,58	204,77	28,47	5,47	35,52	31683,83	0,96	298,55	21,92	126,30	28,08
11,6	23230,10	1,20	107,19	31,06	5,70	35,05	37644,97	1,12	295,64	22,90	108,16	26,79
Pz [m]	PIE wop						PME wop					
	maior	w%	wop	w%	menor	w%	maior	w%	wop	w%	menor	w%
	2	37986,58	1,80	761,59	19,86	68,45	22,07	46973,55	2,68	1736,51	18,09	298,69
5	45568,56	1,85	1694,10	19,60	72,88	22,58	52246,92	1,52	4149,67	18,74	1259,60	19,76
8,6	42552,57	2,00	450,60	18,99	155,39	23,28	49516,09	1,86	579,21	19,03	244,33	23,81
11,6	38574,74	1,20	362,00	22,15	237,03	26,40	46330,15	2,35	517,85	19,41	343,75	24,51
Pz [m]	PI wop											
	maior	w%	wop	w%	menor	w%						
	2	42548,61	1,21	1021,35	19,87	71,88	22,63					
5	48235,40	1,23	2137,14	20,50	86,71	23,50						
8,6	47572,37	1,32	628,04	20,00	206,46	23,87						
11,6	45151,08	1,36	530,61	22,00	275,33	26,60						

Para observar e comparar melhor a influência da compactação na forma da curva característica segundo o nível de intemperização do solo apresenta-se na Figura 4.53 e na Figura 4.54, gráficos em que se comparam as curvas características obtidas para amostras coletadas nas quatro profundidades estudadas agrupadas por energia de compactação. Verifica-se nesses gráficos que as curvas obtidas para os solos profundamente intemperizados (2 m e 5 m) se colocam acima das obtidas para o solo de transição (8,6 m) e para o solo saprolítico (11,6 m). Isso se dá devido ao fato de que com o fechamento da macroporosidade presente nos solos profundamente intemperizados passa a predominar o efeito dos microporos. Observa-se ainda que as curvas obtidas para 2 m e 5 m assim com as obtidas para 8,6 m e 11,6 m estão próximas refletindo certa semelhança estrutural. A horizontalidade das curvas obtidas para esses solos na zona de microporos aponta para certa homogeneidade no tamanho desses poros. Observa-se ainda nessas figuras que para baixos graus de saturação as curvas características, independentemente da profundidade, tendem a se sobrepor apontando para dimensões de poros semelhantes.

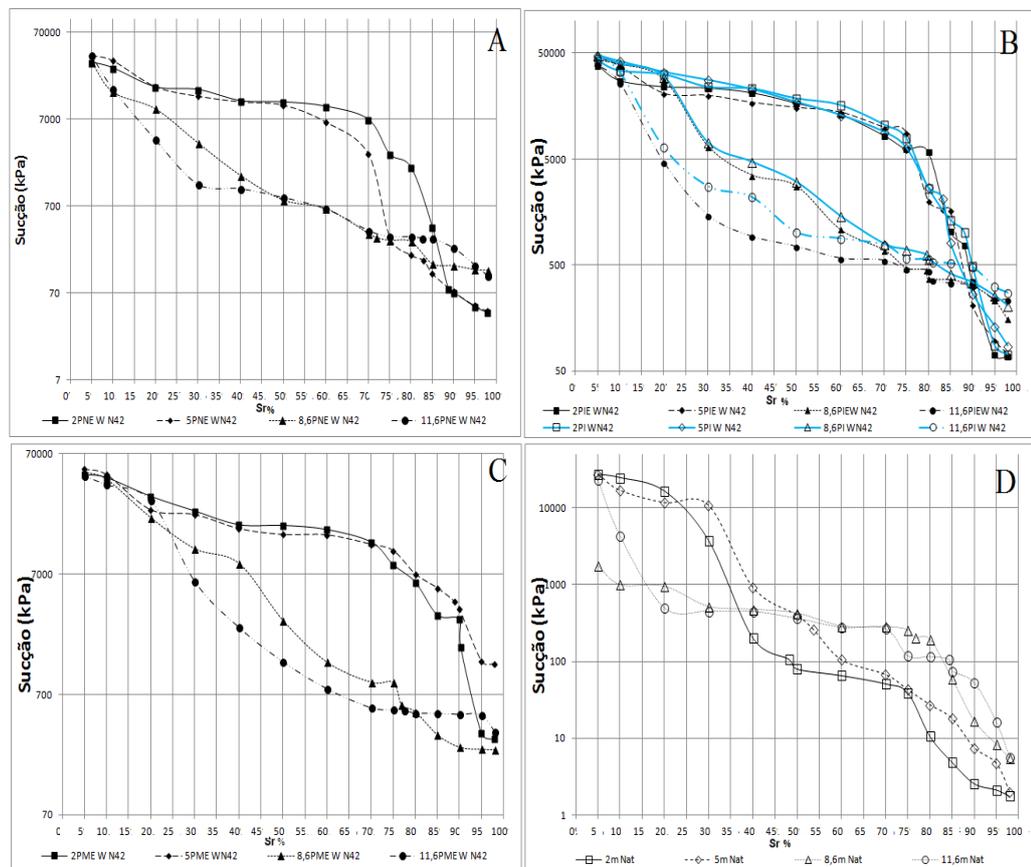


Figura 4.53 Curvas características por estado dos solos em função do grau de saturação (Sr).

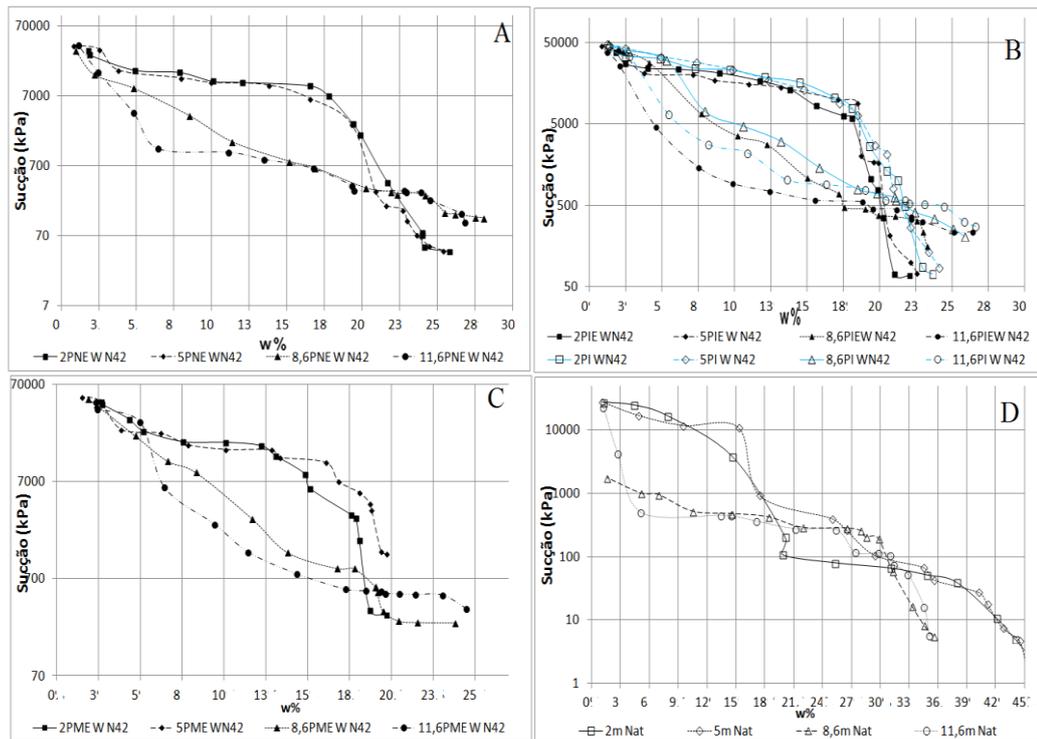


Figura 4.54 Curvas características em função da umidade agrupadas por estado do solo.

Na Figura 4.55 se observa a variação do índice de vazios calculado com base no peso e dimensões dos corpos de prova, em relação à umidade dos corpos de prova compactados que compõem a curva característica. Observa-se índices de vazios na maioria dos casos tendendo para uma constante e em poucos casos valores ligeiramente mais elevados para as maiores umidades. É importante destacar que apesar das menores porosidades registradas nessa figura para os solos profundamente intemperizados (2 m e 5 m) em relação aos solos de transição (8,6 m) e saprolítico (11,6 m) as curvas características em função da umidade (Figura 4.54) obtida para os solos profundamente intemperizados mostram para umidades semelhantes, maiores valores de sucção para graus de saturação inferiores a 80% - 85%. Isso indica zonas de predomínio de micro e de macroporosidade sendo relevante separá-las nos solos profundamente intemperizados.

Na Figura 4.56 obtida plotando-se a sucção em pF transformada em relação ao índice de vazios, se observa como a sucção do solo se altera no perfil de solo e com a compactação ao se isolar o efeito do índice de vazios. Uma análise comparativa mais acurada requer, no entanto, que se considerem separadamente os micro e macroporos

nos solos profundamente intemperizados conforme mostrado por Camapum de Carvalho, J. Pereira & Guimarães, (2002).

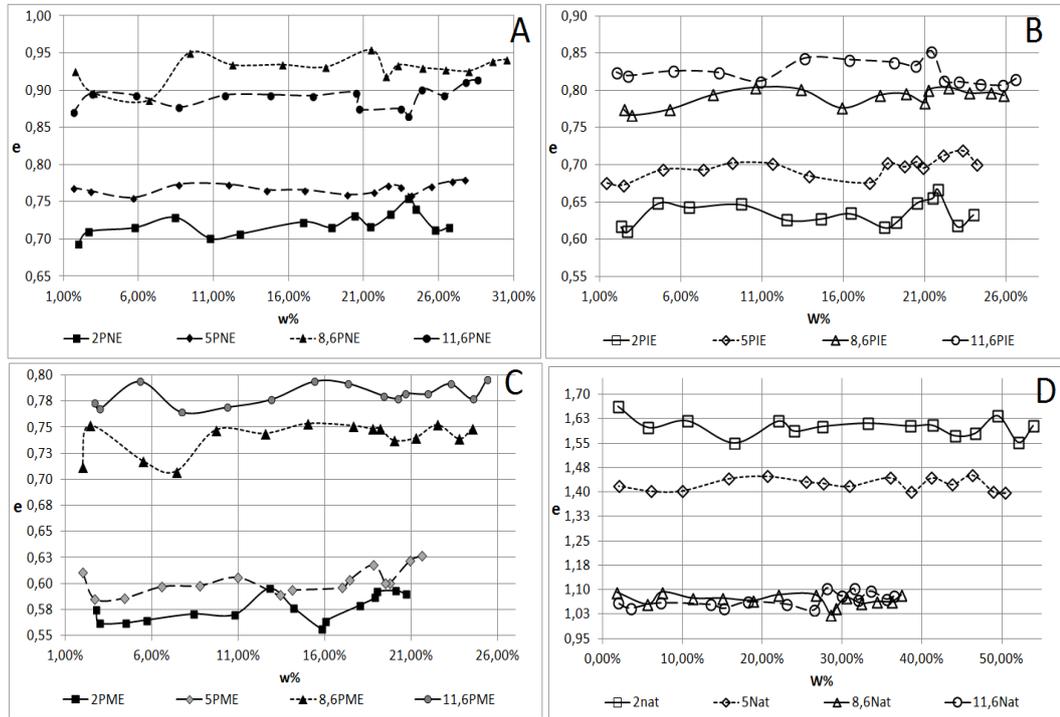


Figura 4.55 Variação do índice de vazios com a variação da umidade da saturação das curvas características.

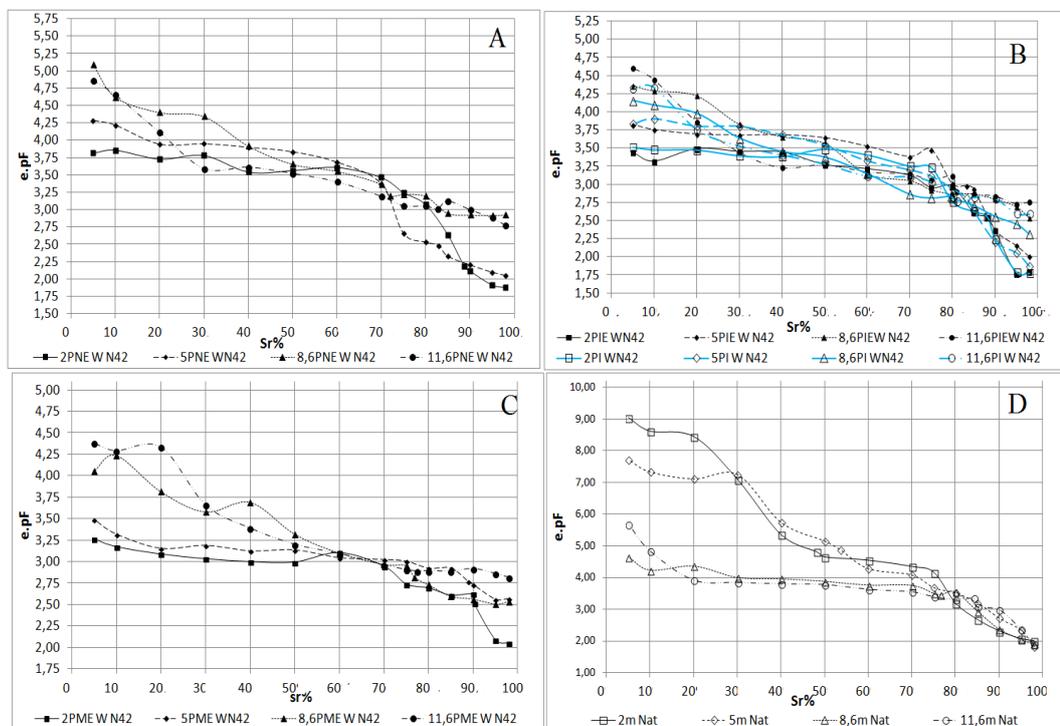


Figura 4.56 Curvas características transformadas por estado do solo (e.pF - Saturação).

4.6 COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência de um solo é geralmente alterada pelas condições de umidade presentes, assim como pela condição estrutural. Para avaliar a resistência não confinada do solo é importante comparar os diferentes estados de umidade e estrutura produzidos pela compactação. A estrutura dos solos compactados é geralmente afetada pela umidade de compactação e pelo tipo de compactação e nível de energia utilizado.

Ainda quando a resistência à compressão simples subestima em muitas situações a capacidade de resistência do solo por ignorar a contribuição do confinamento para o comportamento mecânico minimizando o atrito entre partículas e o efeito da distribuição dos esforços no solo, ela permite avaliar o comportamento do solo em condições não drenadas e não consolidada e o formato da curva obtida para a resistência em função da deformação axial guarda uma boa relação com a estrutura que caracteriza o solo (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987).

Na Tabela 4.22 se observa o comportamento da resistência a compressão simples para as diferentes profundidades ao longo do perfil de intemperismo, considerando-se as três condições de umidade de compactação (umidade ótima menos 2%, umidade ótima e umidade ótima mais 2%) e as três energias de compactação estudadas usando-se os métodos dinâmico e estático (normal, intermediária e modificada). Cabe lembrar que o método estático foi usado buscando-se reproduzir a condição de peso específico definida dinamicamente e os corpos de prova foram rompidos a uma velocidade de 1 mm/min.

O comportamento mecânico avaliado em termos de resistência a compressão simples dos solos tropicais profundamente intemperizados, profundidade de 2 m e 5 m, foi melhor que o apresentado pelo solo de transição (8,6 m) e pelo solo saprolítico (11,6 m). A Tabela 4.22 mostra que as resistências dos solos compactados estaticamente, foram para as três energias e três umidades de compactação, maiores que as obtidas para os solos submetidos à compactação dinâmica, tanto nos solos lateríticos como no solo de transição e solo saprolítico.

As maiores resistências dos solos lateríticos podem se explicar pela estrutura agregada e cimentada que os caracteriza e que se faz ausente nos solos de transição e nos solos saprolíticos. A maior resistência obtida para os corpos de prova compactados estaticamente corrobora com esse entendimento, pois nessa compactação ocorre, como

visto nas análises microestruturais, menor quebra de agregados que na compactação dinâmica no caso dos solos profundamente intemperizados e no caso dos solos de transição e saprolítico a tendência é a de gerar menor orientação das partículas e menor destruição dos pacotes de argila.

Outro aspecto relevante que se observa nos resultados mostrados na Tabela 4.22 é a maior ductilidade dos corpos de prova compactados dinamicamente. Como o comportamento mecânico dos solos não saturados depende da porosidade e da sucção observa-se nos resultados apresentados uma tendência a resistência ser maior no ramo seco, seguido na umidade ótima para a energia de compactação Proctor normal. No entanto, com o aumento da energia de compactação para alguns pontos a resistência se tornou maior na umidade ótima, sendo que em todos os casos a resistência foi menor no ramo úmido, pois além da porosidade inferior à da condição ótima a sucção no ramo úmido geralmente tende a ser muito pequena.

Tabela 4.22 Resultados dos ensaios de compressão simples para o perfil de solo estudado.

Condição	w%	e	Sucção inicial (kPa)	Desloca. (mm)	Carga (kg)	Condição	w%	e	Sucção inicial (kPa)	Desloca. (mm)	Carga (kg)	Condição	w%	e	Sucção inicial (kPa)	Desloca. (mm)	Carga (kg)
2PNwop-2	21,9	0,77	1935,88	1,4	87	2PIwop-2	18,9	0,77	7884,9	1,4	144	2PMwop-2	17,4	0,61	3195,6	2,5	290
2PNwop	23,9	0,73	74,41	1,8	75	2PIwop	21,1	0,66	1424,5	1,1	114	2PMwop	19,1	0,57	1736,5	2,1	520
2PNwop+4	30,4	0,89	10,69	2,5	50	2PIwop+2	23,3	0,72	87,45	1,75	115	2PMwop+2	21,1	0,63	298,69	2,2	120
2PNEwop-2	21,8	0,77	1935,88	1,31	130	2PIEwop-2	18,4	0,76	6077,9	1,15	287	2PMEwop-2	17,4	0,60	5178,8	1,5	601
2PNEwop	23,7	0,73	74,41	1,8	78	2PIEwop	21,1	0,66	723,54	0,71	235	2PMEwop	19,0	0,58	1736,5	1,1	740
2PNEwop+2	26,0	0,79	10,69	2,24	58	2PIEwop+2	22,8	0,72	59,41	1,65	174	2PMEwop+2	20,6	0,62	298,69	1,3	127
5PNwop-2	21,1	0,82	305,73	0,71	87	5PIwop-2	19,0	0,88	3500	1,5	112	5PMwop-2	16,7	0,70	10187	0,9	248
5PNwop	23,5	0,78	165,76	1,8	59	5PIwop	20,6	0,68	2137,1	1,9	112	5PMwop	19,5	0,60	4149,9	1,95	237
5PNwop+2	25,5	0,82	61,7	2,75	53	5PIwop+2	22,0	0,71	271,2	2,55	94	5PMwop+2	21,3	0,65	1259,6	2,04	118
5PNEwop-2	21,4	0,83	305,73	1,11	127	5PIEwop-2	18,2	0,86	3000	1,34	378	5PMEwop-2	16,5	0,72	10187	0,8	404
5PNEwop	23,3	0,77	165,76	1,18	62	5PIEwop	20,1	0,68	1694,1	1,5	370	5PMEwop	19,6	0,62	4149,9	1,05	450
5PNEwop+2	23,3	0,82	61,7	2,2	56	5PIEwop+2	22,4	0,72	214,89	1,78	221	5PMEwop+2	21,5	0,66	1259,6	1,67	285
8,6PNwop-2	20,2	0,91	415,2	0,86	53	8,6PIwop-2	19,2	0,77	730	1,82	55	8,6PMwop-2	17,1	0,75	898,11	1,63	59
8,6PNwop	22,4	0,89	298,55	1,56	50	8,6PIwop	21,0	0,75	628,04	2,31	73	8,6PMwop	19,4	0,71	579,21	1,25	81
8,6PNwop+2	24,3	0,92	254,96	1,44	34	8,6PIwop+2	23,1	0,78	360	1,23	56	8,6PMwop+2	21,5	0,75	324,78	1,72	61
8,6PNEwop-2	20,4	0,91	415,2	1,1	53	8,6PIEwop-2	19,1	0,77	600,3	0,92	63	8,6PMEwop-2	17,2	0,75	898,11	1,4	81
8,6PNEwop	22,1	0,89	298,55	1,58	51	8,6PIEwop	21,1	0,76	450,6	1,72	74	8,6PMEwop	19,0	0,71	579,21	1,71	84
8,6PNEwop+2	24,5	0,92	254,96	1,35	36	8,6PIEwop+2	23,1	0,79	320,7	1,4	64	8,6PMEwop+2	21,3	0,75	324,78	1,63	67
11,6PNwop-2	22,3	0,89	309,5	2,1	51	11,6PIwop-2	21,4	0,79	575,9	1,6	54	11,6PMwop-2	18,2	0,78	546,11	0,85	57
11,6PNwop	24,1	0,86	295,64	1,72	40	11,6PIwop	23,0	0,80	525,6	1,74	53	11,6PMwop	20,3	0,76	522,7	1,48	56
11,6PNwop+2	26,3	0,88	259,31	3,1	39	11,6PIwop+2	25,1	0,85	314,06	2,41	49	11,6PMwop+2	22,3	0,79	490,7	1,88	53
11,6PNEwop-2	22,3	0,90	309,5	1,05	52	11,6PIEwop-2	20,3	0,80	459,29	1,61	65	11,6PMEwop-2	18,4	0,79	546,11	0,85	69
11,6PNEwop	24,3	0,87	295,64	1,56	41	11,6PIEwop	22,5	0,79	293,34	1,6	56	11,6PMEwop	19,5	0,76	522,7	1,39	59
11,6PNEwop+2	25,3	0,88	259,31	2,2	39	11,6PIEwop+2	26,8	0,88	237,03	1,68	52	11,6PMEwop+2	22,2	0,80	490,7	1,55	57

Na Figura 4.57, observa-se um comportamento marcado em ambas as profundidades (2 m e 5 m) pela similaridade de comportamento para a energia Proctor

normal quando o solo foi compactado estática e dinamicamente, apesar das resistências mais elevadas para os corpos de prova (CP) compactados estaticamente. À medida que se amplia a energia de compactação aumenta-se a diferença entre a resistência dos CP compactados dinamicamente e a dos corpos de prova compactados estaticamente sendo estas últimas mais elevadas. Essas diferenças de comportamento podem estar atreladas a estruturas distintas, mas podem também estarem ocorrendo devido a diferenças de porosidade, umidade e por consequência de sucção.

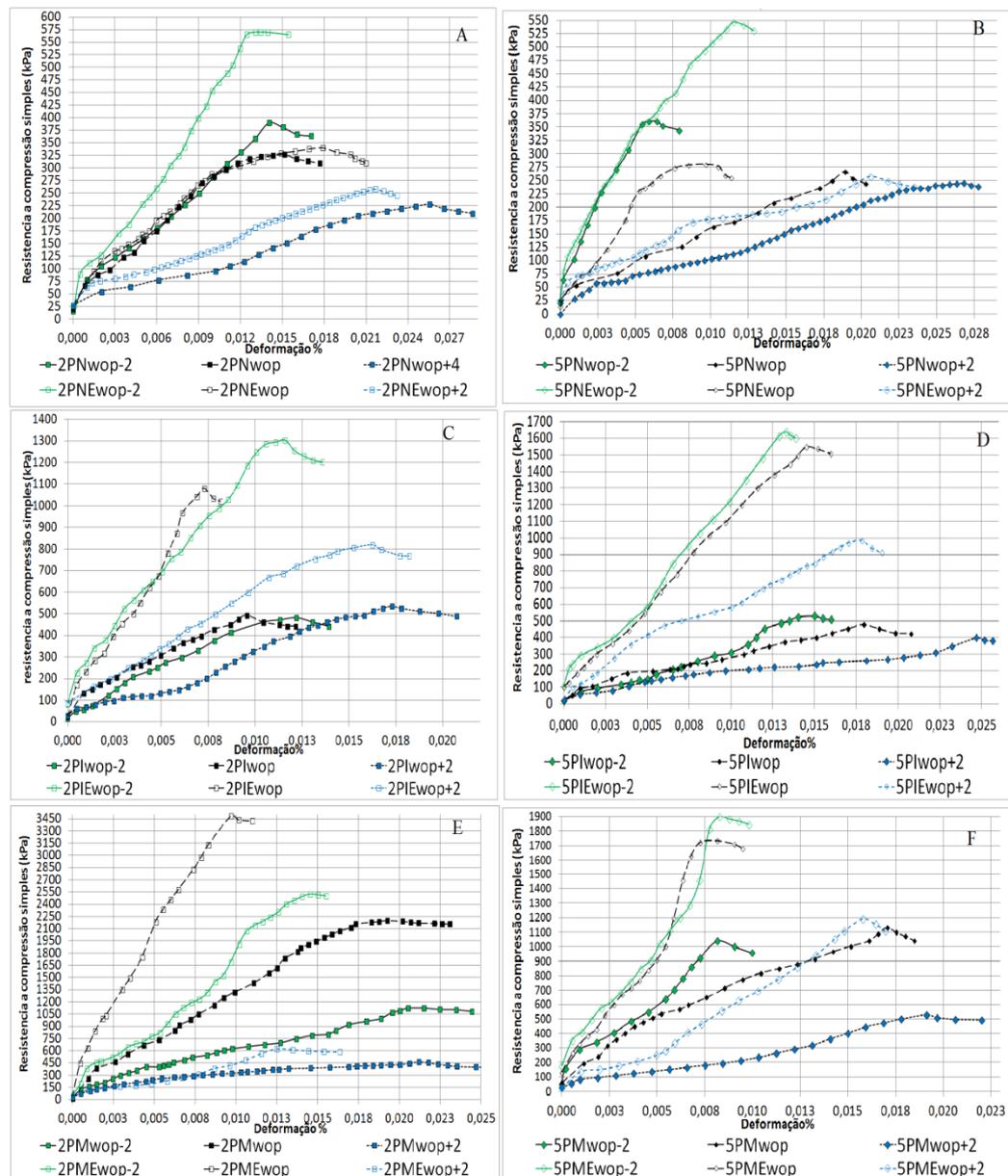


Figura 4.57 Resistência a compressão simples dos solos lateríticos (2 m e 5m).

Algumas curvas têm variações que podem ser atribuídas à ajustes na estrutura oriunda da compactação do CP ou a ajustes de porosidade tornando a estrutura mais

homogênea em termos de porosidade entre as camadas. Esse comportamento é marcado pela redução da deformabilidade com o aumento da deformação específica. Em algumas curvas aparentemente em uma primeira fase ocorre um processo de ajuste ou recompressão do solo em partes do corpo de prova com relaxação estrutural, e quando o estado do solo se equaliza amplia-se o ganho de resistência até o início das deformações de plastificação que levam à ruptura. Esse comportamento pode ainda estar associado a eventuais ineficiências da compactação em partes do corpo de prova, como, por exemplo, na parte inferior das camadas.

A Figura 4.58 apresenta os resultados de resistência à compressão simples obtida para o solo de transição (8,6 m) e para o solo saprolítico (11,6 m). O comportamento de maior resistência do solo compactado estaticamente obtido para os solos profundamente intemperizados se repete para esses solos sem que, no entanto, se verifique maior deformabilidade para os solos compactados dinamicamente, ou seja, aparentemente não se teria diferenças estruturais quanto à orientação de partículas. É visível ainda que as variações das resistências nestes solos são menores que nos solos profundamente intemperizados, tanto em valores absolutos como em proporcionalidade. Se observadas as formas das curvas de compactação esse comportamento está em acordo com seus formatos, pois tanto o ramo seco como o úmido nesses solos de transição e saprolítico são mais suaves que nos solos profundamente intemperizados.

Na Figura 4.59, busca-se avaliar as resistências a compressão simples obtidas em função de parâmetros que podem afetá-las. Essa análise deu em função: da umidade (Figura 4.59a); do índice de vazios (Figura 4.59b); do grau de saturação (Figura 4.59c); da sucção (Figura 4.59d).

Observa-se que com o aumento da umidade a RCS diminui devido em especial à redução na sucção embora efeitos secundários como o de eventual lubrificação possa também contribuir. Tem-se ainda que o aumento da umidade e diminuição da sucção os agregados se tornam menos resistentes e os pacotes de argila menos estáveis (Figura 4.59).

Os solos com menor índice de vazios propiciam maior número de contatos entre as partículas e entre os agregados os que tornam a resistência menor. Tem-se ainda que para um mesmo grau de saturação, menor o índice de vazios maior a sucção e, portanto, a resistência (Figura 4.59).

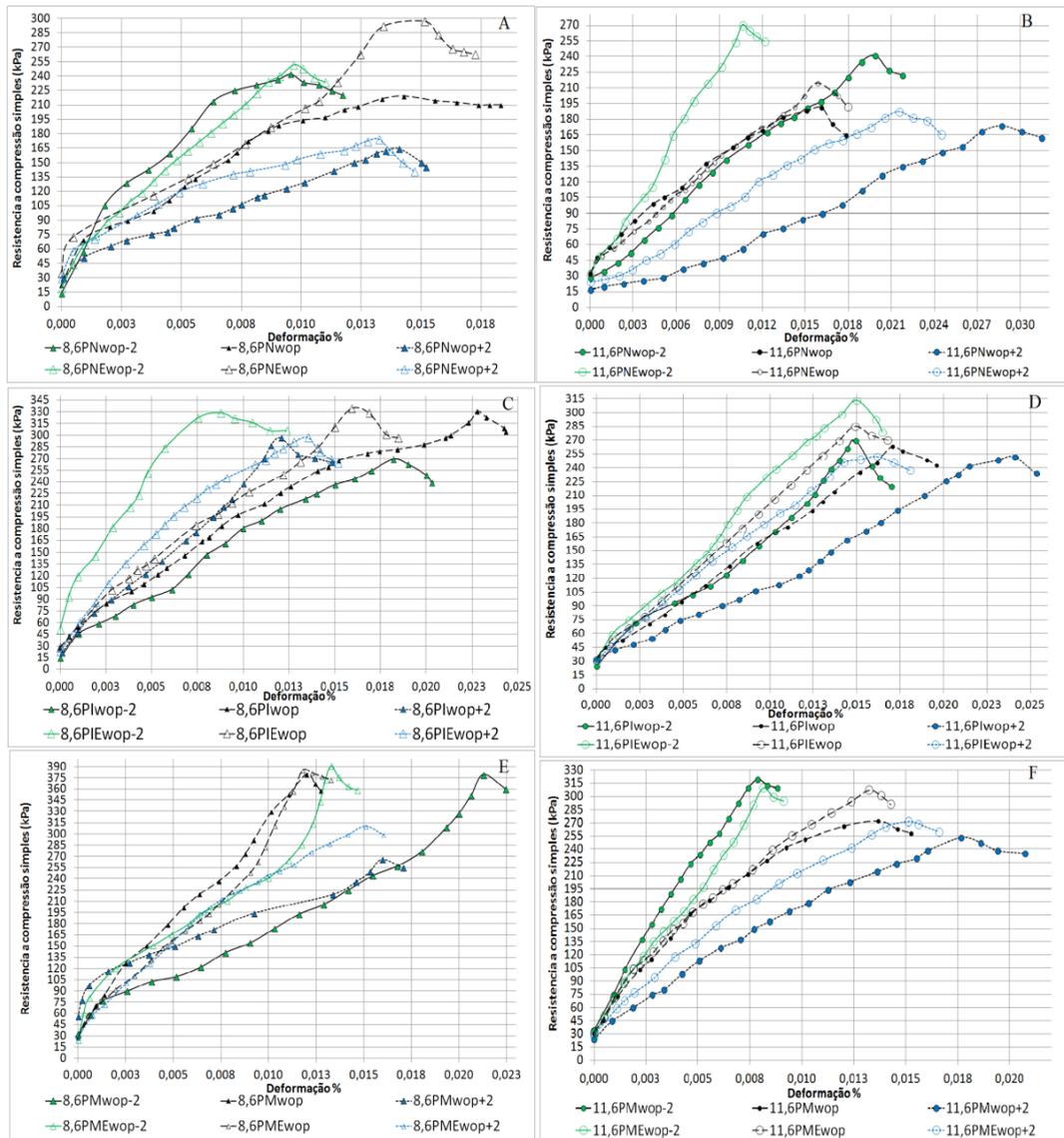


Figura 4.58 Resistência a compressão simples solo de transição (8,6m) e solo saprolítico (11,6m).

O grau de saturação ($S_r = G.w/e$), por ser diretamente proporcional a umidade e inversamente proporcional ao índice de vazios conjuga os efeitos desses dois parâmetros no comportamento mecânico do solo (Figura 4.59).

A ampliação da sucção por seu turno atua, até certo limite, aumentando a resistência do solo (Camapum de Carvalho, 1985).

Do conjunto de resultados apresentados nessa figura se observa que isoladamente apenas a sucção apresentou uma melhor relação com a resistência à compressão simples dos solos analisados, mesmo assim com certo grau de dispersão (Figura 4.59).

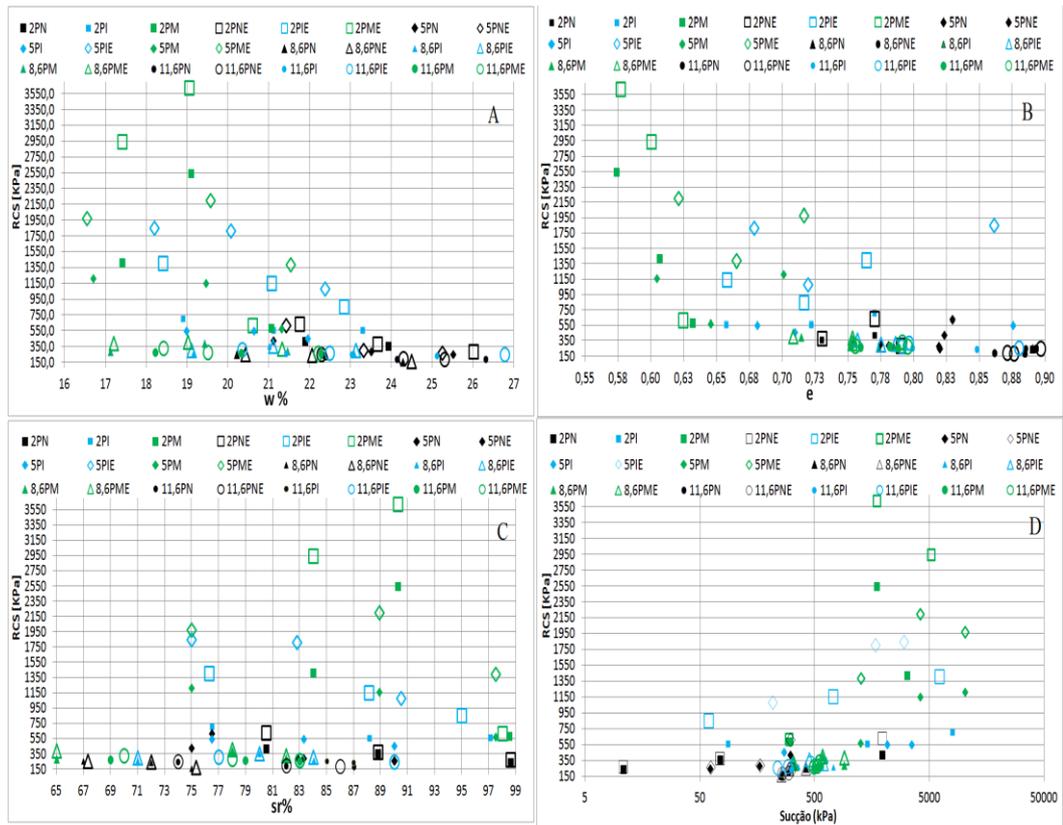


Figura 4.59 RCS em função: a) da umidade; b) do índice de vazios, c) do grau de saturação; d) da sucção.

Na Figura 4.60 a, onde a RCS é colocada em função de pF/e tem-se duas zonas de comportamento distintos. Uma para as relações de pF/e inferiores a aproximadamente 5,5 e a outra para valores superiores a esse limite. Observa-se para a zona com pF/e inferior a 5,5 que o método de compactação não afetou a resistência do solo, exceto para três pontos para os quais o solo compactado estaticamente apresentou maior resistência. Esse comportamento reflete uma estrutura menos afetada pela energia de compactação. No entanto para zona com pF/e maior que 5,5 observa-se uma clara influência do método de compactação no comportamento do solo sendo o maiores valores de RCS para uma mesma relação pF/e obtidos para os corpos de prova compactados estaticamente, o que indica que a compactação dinâmica afeta a estrutura do solo conduzindo-o a um pior comportamento mecânico. Esses resultados são perfeitamente coerentes com as análises estruturais realizadas e já discutidas.

A convergência dos resultados analisados nessa figura para comportamentos únicos bem definidos mostram mais uma vez que as análise de resistência em função de pF/e são muito proveitosas, pois propicia a universalização do comportamento podendo

contribuir para a redução do número de ensaios destinados ao estudo do comportamento mecânico dos solos não saturados (Camapum de Carvalho & Pereira, 2002).

Para melhor análise dos dados anteriores, apresentam-se na Figura 4.60b e Tabela 4.23, os valores dos módulos secantes calculados a partir das curvas apresentadas na Figura 4.57 e Figura 4.58. A análise dos módulos permite ver com maior clareza a correlação direta entre a RCS e os valores de módulos em escala logarítmica, sendo interessante observar que existe um limite de mudança de comportamento semelhante ao observado para a relação da RCS com pF/e discutida anteriormente, não se observando, no entanto, uma influência do método de compactação nessa relação.

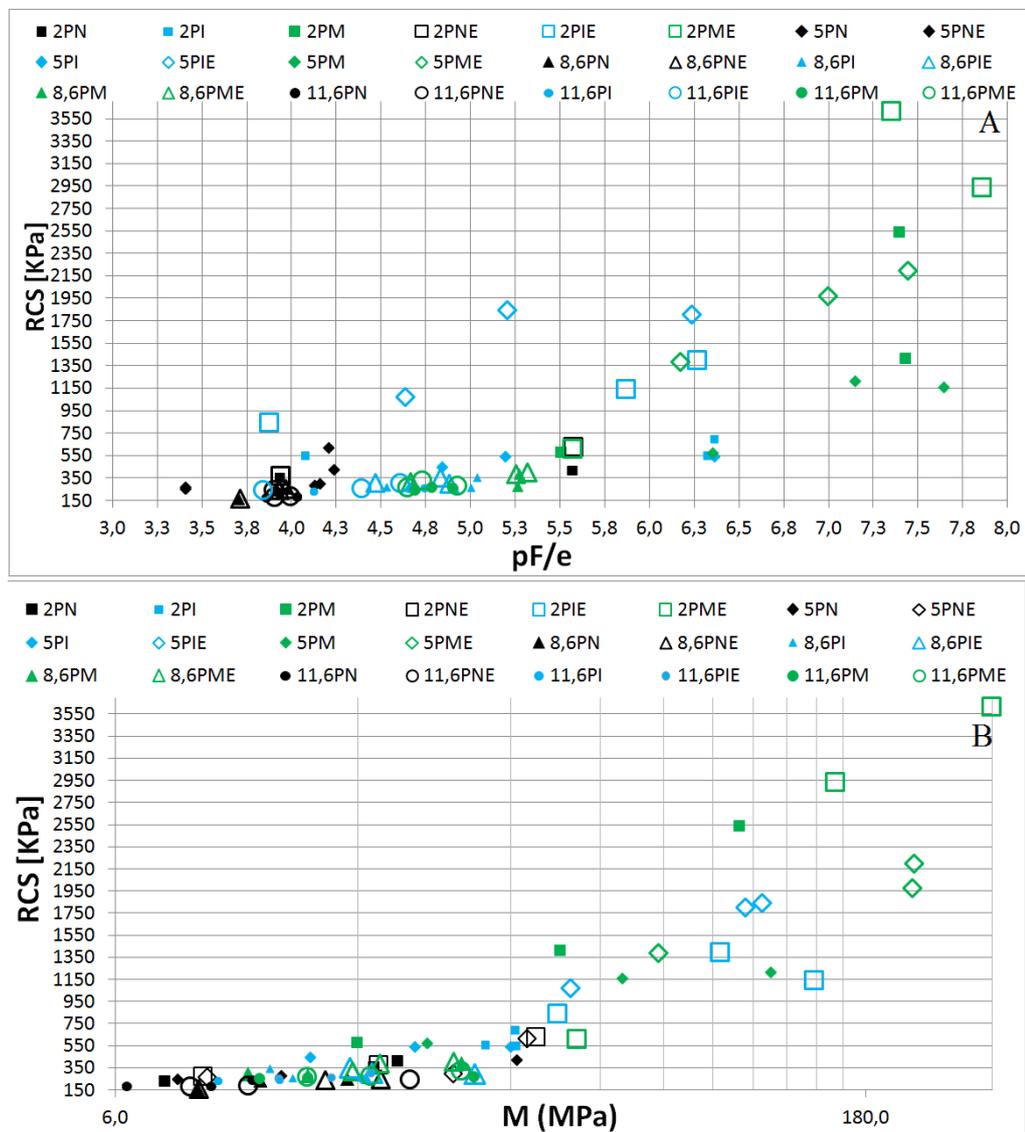


Figura 4.60 Relação entre os valores de módulo e a RCS ao longo do perfil de intemperismo estudado.

Tabela 4.23 Resultados de RCS.

Condição	w (%)	e	Sucção (kPa)	Sucção (Pf)	RCS (KPa)	Sr (%)	pF/e	M (MPa)
2PNwop-2	21,9	0,77	1935,88	4,29	426,6	80,5	5,57	21,50
2PNwop	23,9	0,73	74,41	2,87	367,8	88,8	3,93	19,30
2PNwop+4	30,4	0,89	10,69	2,03	245,2	98,6	2,28	7,48
2PNEwop-2	21,8	0,77	1935,88	4,29	637,5	80,5	5,57	40,30
2PNEwop	23,7	0,73	74,41	2,87	382,5	88,8	3,93	19,70
2PNEwop+2	26,0	0,79	10,69	2,03	284,4	98,6	2,57	8,90
2PIwop-2	18,9	0,77	7884,92	4,90	706,1	76,5	6,36	36,51
2PIwop	21,1	0,66	1424,49	4,15	559,0	88,1	6,32	36,71
2PIwop+2	23,3	0,72	87,45	2,94	563,9	97,1	4,07	31,99
2PIEwop-2	18,4	0,76	6077,9	4,78	1407,3	76,3	6,26	92,59
2PIEwop	21,1	0,66	723,54	3,86	1152,3	88,1	5,87	141,68
2PIEwop+2	22,8	0,72	59,41	2,77	853,2	95,0	3,87	44,37
2PMwop-2	17,4	0,61	3195,55	4,50	1422,0	84,0	7,43	44,90
2PMwop	19,1	0,57	1736,51	4,24	2549,8	90,3	7,39	101,20
2PMwop+2	21,1	0,63	298,69	3,48	588,4	98,5	5,50	17,89
2PMEwop-2	17,4	0,60	5178,82	4,71	2947,0	84,0	7,85	155,70
2PMEwop	19,0	0,58	1736,51	4,24	3628,6	90,3	7,35	316,70
2PMEwop+2	20,6	0,62	298,69	3,48	622,7	98,0	5,57	48,33
5PNwop-2	21,1	0,82	305,73	3,49	426,6	75,0	4,23	36,90
5PNwop	23,5	0,78	165,76	3,22	289,3	82,9	4,12	12,70
5PNwop+2	25,5	0,82	61,7	2,79	259,9	90,0	3,40	7,95
5PNEwop-2	21,4	0,83	305,73	3,49	622,7	76,5	4,20	38,76
5PNEwop	23,3	0,77	165,76	3,22	304,0	83,3	4,15	27,70
5PNEwop+2	25,3	0,82	61,7	2,79	274,6	90,0	3,41	9,10
5PIwop-2	19,0	0,88	3500	4,54	549,2	76,5	5,19	35,87
5PIwop	20,6	0,68	2137,14	4,33	549,2	83,3	6,36	23,27
5PIwop+2	22,0	0,71	271,2	3,43	460,9	90,0	4,84	14,49
5PIEwop-2	18,2	0,86	3000	4,48	1853,5	75,0	5,20	112,39
5PIEwop	20,1	0,68	1694,1	4,23	1814,3	82,8	6,23	104,16
5PIEwop+2	22,4	0,72	214,89	3,33	1083,7	90,5	4,63	47,10
5PMwop-2	16,7	0,70	10187,2	5,01	1216,1	75,0	7,14	117,05
5PMwop	19,5	0,60	4149,9	4,62	1162,1	88,9	7,64	59,50
5PMwop+2	21,3	0,65	1259,6	4,10	578,6	97,5	6,35	24,68
5PMEwop-2	16,5	0,72	10187,2	5,01	1981,0	75,0	6,99	221,22
5PMEwop	19,6	0,62	4149,9	4,62	2206,6	88,9	7,44	223,15
5PMEwop+2	21,5	0,66	1259,6	4,10	1397,5	97,5	6,17	70,11
8,6PNwop-2	20,2	0,91	415,2	3,62	259,9	67,0	3,98	17,10
8,6PNwop	22,4	0,89	298,55	3,48	245,2	72,0	3,90	11,53
8,6PNwop+2	24,3	0,92	254,96	3,41	166,7	75,0	3,70	8,70
8,6PNEwop-2	20,4	0,91	415,2	3,62	259,9	67,3	3,96	19,90
8,6PNEwop	22,1	0,89	298,55	3,48	250,1	72,0	3,92	15,50
8,6PNEwop+2	24,5	0,92	254,96	3,41	176,5	75,3	3,71	8,74
8,6PIwop-2	19,2	0,77	730	3,86	269,7	71,0	5,00	13,41
8,6PIwop	21,0	0,75	628,04	3,80	358,0	80,0	5,03	12,10
8,6PIwop+2	23,1	0,78	360	3,56	274,6	84,0	4,53	18,70
8,6PIEwop-2	19,1	0,77	600,3	3,78	308,9	71,0	4,88	30,50
8,6PIEwop	21,1	0,76	450,6	3,65	362,9	80,0	4,83	17,34
8,6PIEwop+2	23,1	0,79	320,7	3,51	313,8	84,0	4,46	19,10
8,6PMwop-2	17,1	0,75	898,11	3,95	289,3	65,0	5,26	14,30
8,6PMwop	19,4	0,71	579,21	3,76	397,2	78,0	5,27	28,70
8,6PMwop+2	21,5	0,75	324,78	3,51	299,1	82,0	4,67	10,90
8,6PMEwop-2	17,2	0,75	898,11	3,95	397,2	65,0	5,25	19,82
8,6PMEwop	19,0	0,71	579,21	3,76	411,9	78,0	5,31	27,62
8,6PMEwop+2	21,3	0,75	324,78	3,51	328,5	82,0	4,66	17,50
11,6PNwop-2	22,3	0,89	309,5	3,49	250,1	74,0	3,91	11,11
11,6PNwop	24,1	0,86	295,64	3,47	196,1	82,0	4,03	9,20
11,6PNwop+2	26,3	0,88	259,31	3,41	191,2	87,0	3,86	6,30
11,6PNEwop-2	22,3	0,90	309,5	3,49	255,0	74,0	3,89	22,70
11,6PNEwop	24,3	0,87	295,64	3,47	201,0	82,0	3,98	10,93
11,6PNEwop+2	25,3	0,88	259,31	3,41	191,2	86,0	3,90	8,40
11,6PIwop-2	21,4	0,79	575,9	3,76	264,8	79,0	4,74	18,22
11,6PIwop	23,0	0,80	525,6	3,72	259,9	85,0	4,66	12,55
11,6PIwop+2	25,1	0,85	314,06	3,50	240,3	87,0	4,12	9,54
11,6PIEwop-2	20,3	0,80	459,29	3,66	318,7	77,0	4,60	19,00
11,6PIEwop	22,5	0,79	293,34	3,47	274,6	83,0	4,38	15,90
11,6PIEwop+2	26,8	0,88	237,03	3,37	255,0	90,0	3,84	12,60
11,6PMwop-2	18,2	0,78	546,11	3,74	279,5	69,0	4,78	30,38
11,6PMwop	20,3	0,76	522,7	3,72	274,6	79,0	4,90	14,30
11,6PMwop+2	22,3	0,79	490,7	3,69	259,9	83,0	4,68	11,51
11,6PMEwop-2	18,4	0,79	546,11	3,74	338,3	70,0	4,72	28,64
11,6PMEwop	19,5	0,76	522,7	3,72	289,3	78,0	4,92	19,04
11,6PMEwop+2	22,2	0,80	490,7	3,69	279,5	83,0	4,64	14,27

4.7 TRAÇÃO SIMPLES INDIRETA

Na Tabela 4.24, estão apresentados alguns dos resultados dos ensaios de resistência à tração simples indireta (RTSI). A Figura 4.61 mostra que a RTSI está diretamente relacionada ao índice de vazios e à sucção sendo que a influência da umidade mostra-se condicionada pela porosidade o que conduz a uma dispersão significativa no gráfico de RTSI em função do grau de saturação (Sr). No gráfico pF/e observa-se a convergência para uma tendência única.

Tabela 4.24 Valores de resistência a tração simples indireta para ensaios realizados na condição ótima das três energias.

Pz [m]	Resistência a tração simples indireta (KPa)																							
	PNE wop									PIE wop						PME wop								
	Na condição ótima	e	w%	Sr%	Sucção (kPa)	pF/e	Dev. Padrão	Na condição ótima	e	w%	Sr%	Sucção (kPa)	pF/e	Dev. Padrão	Na condição ótima	e	w%	Sr%	Sucção (kPa)	pF/e	Dev. Padrão			
2	294,2	0,73	23,8	88,8	74,41	3,93	202,2	568,8	0,62	21,3	88,1	761,59	6,2608	199,9	931,7	0,57	19,0	90,3	1736,5	7,4	159,7			
5	372,7	0,77	23,5	82,9	165,76	4,18	188,4	686,5	0,72	20,5	83,3	1694,1	5,8735	212,7	1108,2	0,61	19,5	88,9	4149,7	7,6	203,3			
8,6	31,4	1	22,4	77,9	298,55	3,48	8,2	52,0	0,82	21,0	79,6	450,6	4,4558	10,3	85,3	0,81	19,2	76,9	579,21	4,6	18,9			
11,6	44,1	0,94	24,2	82,6	295,64	3,69	11,8	65,7	0,87	22,0	81,0	362	4,0905	14,1	78,5	0,81	20,0	77,5	517,85	4,6	18,4			

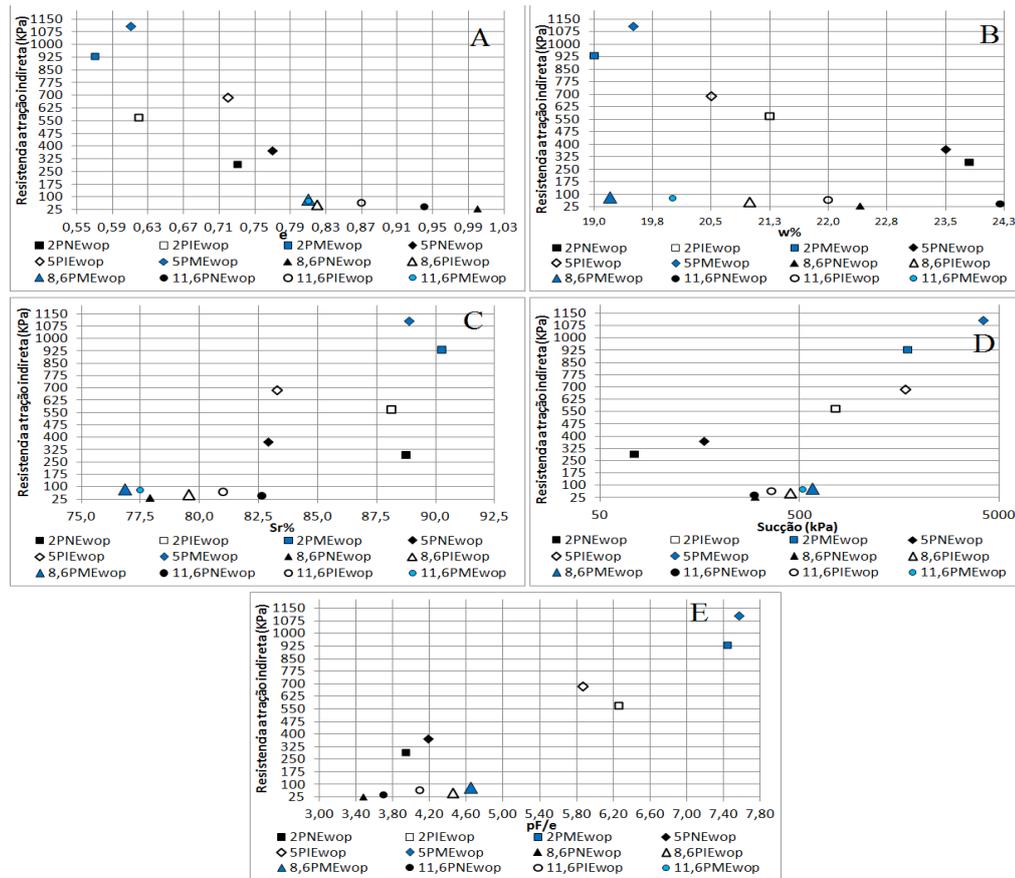


Figura 4.61 RTSI na condição ótima em relação: a) ao índice de vazios; b) à umidade; c) ao grau de saturação; d) à sucção; e) pF/e.

Na Tabela 4.25 e Figura 4.62 são apresentados os maiores valores de RTSI obtidos para os solos estudados em relação: ao índice de vazios (Figura 4.62a); à umidade (Figura 4.62b); à saturação (Figura 4.62c); à sucção (Figura 4.62d); à pF/e (Figura 4.62e).

Tabela 4.25 Variação do maior valor de resistência a tração simples indireta em relação a outras variáveis.

Pz [m]	Resistência a tração simples indireta (KPa)																			
	PNE wop							PIE wop							PME wop					
	Resistênci a máxima	e	w%	Sr%	Sucção (KPa)	pF/e	Desv. Padrão	Resistênci a máxima	e	w%	Sr%	Sucção (KPa)	pF/e	Desv. Padrão	Resistênci a máxima	e	w%	Sr%	Sucção (KPa)	
2	764,9	0,75	20,1	75,0	2755,1	5,9	202,2	1019,9	0,62	19,3	80,0	5687,9	7,7	199,9	1108,2	0,55	17,9	85,0	3195,6	
5	814,0	0,76	21,3	75,0	305,7	4,6	188,4	1059,2	0,67	17,2	70,0	10030,5	7,5	212,7	1206,3	0,63	18,7	85,0	5381,8	
8,6	34,3	1,02	21,8	70,0	335,4	3,5	8,2	59,8	0,87	18,5	70,0	696,0	4,4	10,3	87,3	0,81	18,7	75,0	885,2	
11,6	53,4	0,92	22,0	75,0	309,1	3,8	11,8	80,4	0,85	20,4	75,0	459,3	4,3	14,1	93,2	0,82	19,4	75,0	527,6	

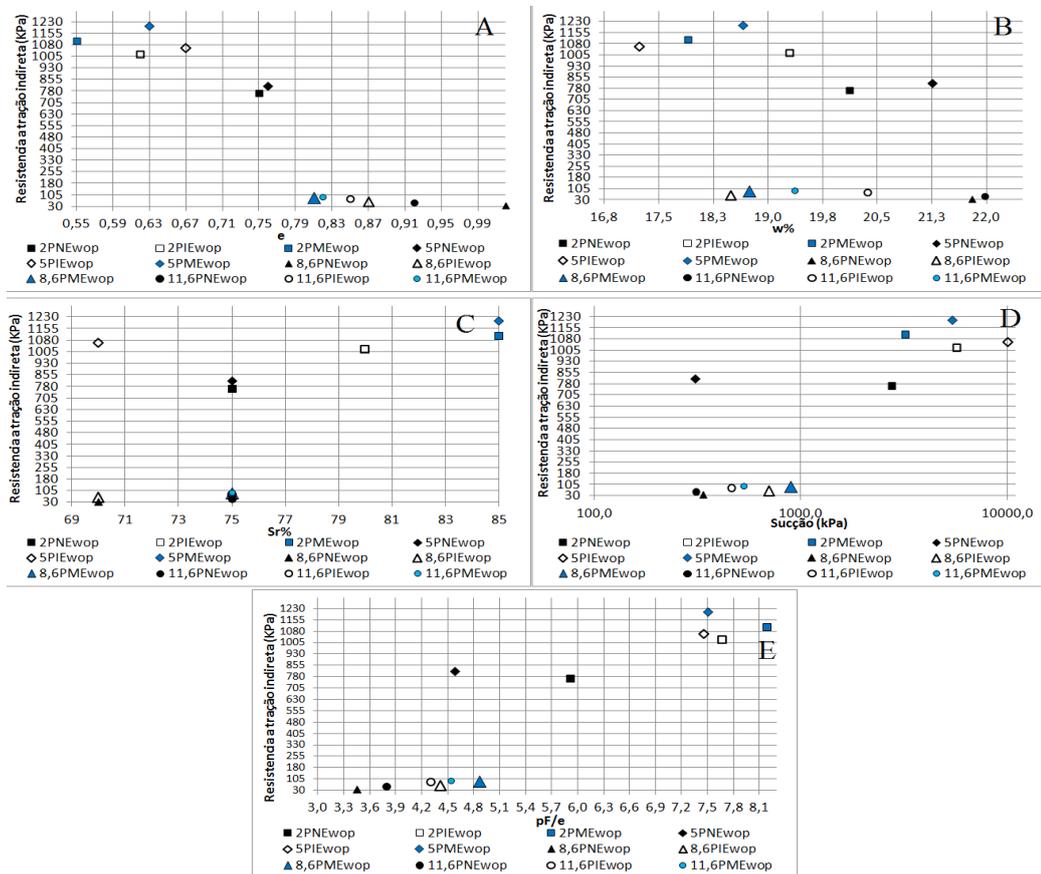


Figura 4.62 Comportamento da RTSI máxima em relação a: a) índice de vazios; b) umidade; c) saturação; d) sucção; e) pF/e.

Os gráficos obtidos usando-se os maiores valores de RTSI são similares aos obtidos para a umidade ótima (Figura 4.61) prevalecendo aqui as mesmas análises feitas para aquela figura.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As propriedades e comportamento dos solos são função da interação solo-água e da estrutura que apresentam. Nos materiais agregados como os solos tropicais profundamente intemperizados essa interação solo-água se dá em duas regiões do solo: no interior dos agregados e entre os agregados. Quando ela se dá no interior do agregado ela afeta quase sempre apenas as propriedades e comportamento do agregado, no entanto, quando ela se dá entre os agregados ela interfere diretamente nas propriedades e comportamento do solo como um todo. Essa particularidade da interação solo-água nos solos tropicais já coloca em destaque, por si só, a importância da estrutura do solo.

Nos solos pouco intemperizados, quando possuidores de argilominerais expansivos, podem também serem considerados dois universos de interação solo-água: o intrapartícula e o interpartículas. O intrapartícula afeta às propriedades da partícula como espessura e o interpartículas afeta as propriedades e comportamento do solo como um todo.

Existem ainda os solos pouco intemperizados desprovidos de argilominerais expansivos e de agregações, nos quais, a interação solo-água se dá apenas entre partículas intervindo diretamente em suas propriedades e comportamento.

Entre os solos muito intemperizados e pouco intemperizados existem os solos de transição, nos quais se misturam porções com propriedades desses dois horizontes.

Portanto, diante desse contexto, o estudo microestrutural dos solos naturais e compactados assume grande relevância, com impacto sobre as propriedades e comportamento que variam ao longo do perfil de intemperismo.

Os estudos microestruturais realizados mostraram que a compactação estática tende a conservar em maior grau as agregações existentes nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, e os pacotes de argila presentes nos solos pouco intemperizados, solos saprolíticos, contribuindo nos perfis de intemperismo tropical para um melhor comportamento mecânico em relação ao que se obteria com a compactação dinâmica.

As análises microestruturais mostraram que a compactação dinâmica tende a gerar maior quebra de agregados nos solos profundamente intemperizados e tendência à

orientação das partículas nos solos pouco intemperizados resultando em pior comportamento mecânico e solos mais deformáveis.

As análises microestruturais realizadas com lupa eletrônica onde se usa amostras na umidade natural forneceram imagens com certa distinção das obtidas no MEV onde se trabalha com amostras submetidas à secagem prévia. A secagem constitui-se na atuação da energia capilar ou de sucção capaz de alterar a porosidade do solo, em especial os meso e macroporos presentes entre os agregados e pacotes de argila. Percebeu-se nas imagens de MEV a presença de trincas dificilmente visualizáveis a olho nu, indicando que a secagem dos solos além dos limites que ocorrem no campo deve ser evitada, pois essa secagem pode alterar a microestrutura e afetar as propriedades e comportamento dos solos.

O impacto da energia de compactação sobre a microestrutura do solo foi mais perceptível nas imagens obtidas com a lupa eletrônica, pois quando do uso do MEV a secagem impõe sucção geradora de alterações estruturais não muito distintas daquelas oriundas da compactação.

Observou-se nas análises microestruturais, e comprovou-se por meio das curvas características, que a distribuição de poros bimodal presente nos solos tropicais profundamente intemperizados é reduzida pela compactação. Verificou-se ainda, que o aumento da energia de compactação gera uma redistribuição de poros fazendo com que a curva característica tenda para o formato monomodal. Nessa redistribuição de poros reduzem-se os meso e macroporos deixando a globalidade dos poros regularmente distribuídos. Esse rearranjo estrutural em consequência da compactação dependerá internamente do nível de agregação, da composição químico-mineralógica e da umidade, e externamente da energia e tipo de compactação.

Nos solos pouco intemperizados, solos saprolíticos, a estrutura depende da natureza das partículas e da energia e tipo de compactação adotada, sendo ela normalmente monomodal com fechamento dos poros em consequência da compactação. Nesses solos a orientação das partículas é mais nítida, porém não se pode falar de uma total orientação nem de estrutura dispersa devido ao fato de que os pacotes de partículas de argila se distribuem aleatoriamente dificultando a orientação em sentido amplo.

As curvas características obtidas são compatíveis com as microestruturas dos solos estudados e mostram que a compactação as altera ao reduzir o teor de macro e mesoporos, e em um nível muito menor, quase desprezível, altera a microporosidade.

A resistência à compressão simples como outros comportamentos do solo geralmente melhoram com o aumento da energia de compactação. A compactação estática gera menor destruição das agregações nos solos profundamente intemperizados proporcionando ao solo maior preservação estrutural e, por consequência, maior resistência à compressão simples. As estruturas geradas pela compactação dinâmica ao proporcionar certa quebra das agregações tornam o solo mais dúctil e menos resistente.

A RCS é inversamente proporcional ao teor de umidade, e por consequência no ramo úmido de compactação as RCS são menores e no ramo seco maiores. Esta diferença de comportamento relacionada à umidade se reduz com o aumento da energia de compactação. Com a maior energia utilizada (Proctor modificado) verificou-se que a maior RCS passou a acontecer na condição ótima e/ou seca, com valores mais próximos entre essas duas condições. Essas constatações por um lado se associam a estrutura do solo, pois ao se aumentar a umidade de compactação amplia-se a quebra de agregações e perda de resistência pelo solo e por outro à sucção, pois maior a umidade menor a sucção, e por consequência a resistência.

Quanto à influência no nível de energia adotado na compactação sobre a RCS observou-se nos resultados aumento da RCS com a diminuição do índice de vazios e, portanto, com o aumento da energia de compactação. Verifica-se então, que apesar da quebra de agregados diminuir a resistência a diminuição do índice de vazios a aumenta.

De modo a contemplar conjuntamente a análise da influência da energia e da umidade de compactação, foi plotado o gráfico da RCS em função de pF/e . Esse gráfico permitiu verificar que para pequenos valores de sucção e/ou elevados valores de índice de vazios o método de compactação afeta pouco o comportamento do solo, no entanto, sua influência torna-se clara para pequenos valores de sucção e/ou de índice de vazios, o que é perfeitamente explicável pela maior suscetibilidade dos solos à quebra de agregados e destruição de pacotes de argila nessas condições de sucção e porosidade.

A resistência à tração indireta dos solos melhora com o aumento do nível de compactação. De forma direta quanto menor o índice de vazios maior a RTSI. A RTSI também aumenta com a sucção atuante no solo.

As RTSI analisadas apresentaram um comportamento no qual o maior valor de resistência está no ramo seco, próximo à condição ótima, colocando em destaque a importância que a sucção exerce sobre esse parâmetro.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões tem-se a necessidade de avaliar a condição da macro e microestrutura do solo sem submetê-lo à secagem.

É importante para o estudo da estrutura do solo avaliar com maior exatidão a distribuição de poros por meio de técnicas de medida direta, como por exemplo, a porosimetria por intrusão de mercúrio.

Para futuras pesquisas, é recomendável ainda realizar outros tipos de ensaios para avaliar a resistência no solo compactado, preferencialmente na condição não saturada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 9604. (1986). Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 9p.
- ABNT NBR1038. (1988). Determinação de massa específica aparente de amostra indeformada com emprego da balança hidrostática. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 4p.
- ABNT NBR5739. (1994). Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 9p.
- ABNT NBR6457. (1986). Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 9p.
- ABNT NBR6459. (1984). Determinação do limite de liquidez. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 6p.
- ABNT NBR7180. (1984). Determinação do limite de plasticidade. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 3p.
- ABNT NBR7181. (1984). Análise granulométrica. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 13p.
- ABNT NBR7182. (1986). Ensaio de compactação. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 10p.
- ABNT NBR9820. (1997). Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagem. ABNT, Rio Janeiro, RJ, : 5p.
- Alonso, E.E. (2004). Suelos compactados en la teoría y en la práctica. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidade Politecnica de Catalunya, Barcelona. 85p.
- Alonso, E.E., Pereira, J.M., Vaunat, J. & Olivella, S. (2010). A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. doi:10.1680/geot.8.p.002. Géotechnique, v60(12): pp 913–925.
- Alonso, E.E., Pinyol, N.M. & Gens, A. (2012). Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling. 1–16. doi:10.1680/geot.11. Géotechnique, V1(16): 134p.
- Araki, M.S. (1997). Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do distrito federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-040A/97, Departamento de engenharia civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121p. .
- Bishop, A. (1959). The principle of effective stress. Tek. Ukebl., v106: pp.859–863.
- Buckman, H. & Brady, N. (1960). The Nature and Properties of Soils. The MacMillan Company, New York, USA, 567 p.
- Caitano Pessoa, F.H. (2012). Avaliações Funcional e Estrutural de Trechos de Rodovias no Distrito Federal Construídos com Diferentes Materiais. Tese de Doutorado, Publicação G.DM-078/2012, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 210 p. .
- Camapum de Carvalho, J. Pereira, J.H.F. & Guimarães, R.C. (2002). Courbes de retention d'eau d'un profil d'alteration. in: Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife., pp.289–294.
- Camapum de Carvalho, J. (1985). Etude du comportement mécanique d'une marne compactée. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, INSA-Toulouse. 200p. .

- Camapum de Carvalho, J., Crispel, J.J., Mieussens, C. & Nardone, A. (1987). La Reconstitution des éprouvettes en laboratoire: Théorie et pratique opératoire. Rapport de recherche LPC No145. Paris: Laboratoire Central de Ponts et Chaussées. 54p.
- Camapum de Carvalho, J., Gitirana Jr, G.F., Machado, S.L., Mascarenha, M.M.A. & Silca Filho, F.C. (2015a). Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). 759p.
- Camapum de Carvalho, J. & Leroueil, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. Solos e Rochas, v27(n.3): pp. 231–242.
- Camapum de Carvalho, J. & Pereira, J.H.F. (2002). Une approche pour la description des propriétés des sols non saturés. in: 3th International Conference On Unsaturated Soils, Recife., 2 : pp– 501–506.
- Camapum de Carvalho, J., Rezende, L.R., Cardoso, F.B.F., Lucena, L.C.F., Guimarães, R.C. & Valencia, Y.G. (2015b). Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. Transp. Geotech., v5: pp. 3–19.
- Campos, D. (1995). Curvas características de sucção. certificação Digit. N 0210661/CA, (1994): pp. 170.
- Campos, I., Guimarães, E. & Camapum de carvalho, J. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Buzios . Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, São Paulo, SP, pp.1–8.
- Cardoso, F.B.F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica dos solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-026A/95, Departamento de engenharia civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p. .
- Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento mecânico de solos do planalto central Brasileiro. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p. .
- Carvalho, M.N. (1995). Seminário da disciplina geotecnia dos solos tropicais. programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília Brasília, DF, 6p.
- Casagrande, A.A. (1948). Classification and identification of soils. Trans. ASCE, v113: pp. 901–991.
- Cetin, H., Ferner, M., Soylemez, M. & Gunaydin, O. (2007). Soil structure changes during compaction of a cohesive soil. Eng. Geol., v92: pp.38–48.
- Chandler, R.J., Crilly, M.S. & Montgomery-Smith, G. (1992). A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. childs,. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, pp. 82–89.
- Chrusciak, M.R. (2011). Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-221/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p. .
- Cozzolino, V.M. & Nogami, J. (1993). Classificação geotécnica mct para solos

- tropicais. Solos e rochas, v16(n.2): pp. 77–91.
- Crispin, F.A. (2007). Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura do solo. Dissertação de Mestrado, Publicação TC932c2007, Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, MG, 77p. .
- Diamond, S. (1971). Microstructure and pore structure of impact-compacted clays. *Clays Clay Miner.*, v19: pp. 239–249.
- Farias, W.M. (2012). Processos evolutivos de intemperismo químico e sua ação no comportamento hidromecânico de solos do planalto central. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-077A/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 263 p. .
- Farias, W.M., Camapum de Carvalho, J., Oliveira, I.C. & Santos Neto, P.M. (2011). Avaliação dos micro e mesoporos nanoestruturados e da área superficial específica de solo laterítico compactado nas diferentes energias. in: II Simpósio Prática Eng. Geotécnica na Região Centro-Oeste, Brasília. São Paulo, ABMS, V1: pp. 321–326.
- Ferner, M. & Yesiller, N. (2013). Vertical pore structure profile of a compacted clayey soil. *Eng. Geol.*, v166: pp. 204–215.
- Gilkes, R., Young & Quirck, J. (1973). Artificial weathering of oxidized biotite. potassium removal by sodium chloride and sodium tetraphenylboron solutions. *soil sci. soc. am. proc. Soil Sci*, v37: pp. 25–28.
- Gomez Muñeton, C.M. (2009). Uso da biotecnologia na melhora de solos para fins de pavimentação rodoviária. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-174/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p. .
- Gon, D.S.F. (2011). Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo de diabásio da região de Campinas/SP. Dissertação de Mestrado, Publicação G586c2011, Faculdade de Engenharia civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 153p. .
- Grim, R.E. (1962). *Applied clay mineralogy*. McGRAW HILLBOOK COMPANY INC, 711p.
- Guimarães, R.C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-090A/02, Dep. de Engenharia Civil e Amb., Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180p. .
- Joachin, A.W.R. & Kandiah, S. (1941). The composition of some local soil concretions and clays. *Trop. Agric.*, v96: pp. 67–75.
- Kiehl, E.J. (1979). *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Ceres, 262 p.
- Klein, V.A. & Libardi, P.L. (2002). Condutividade hidráulica de um latossolo roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Ciência Rural*, 32(6): pp. 945–953.
- Lambe, W. (1958a). The engineering behavior of compacted clay. *J. Soil Mech.*, v84(n8): pp.1–35.
- Lambe, W. (1958b). The struture of compacted clay. *J. Soil Mech. ans Found. Div.*

- ASCE., v84(SM2): pp. 1654–1958.
- Lambe, W. (1960). A mechanistic picture of shear strength in clay. Proc. ASCE Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Boulder (Ed.), University of Colorado, pp. 555–580.
- Li, X. & Zhang, L.M. (2009). Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. *Can. Geotech. J.*, v46: pp129–141.
- Lima, M.C., Camapum de Carvalho, J. & Pereira, J.H. (2002). Estudo das alterações do solo próximo aos taludes de moçorocas . X Congresso Brasileiro de Geologia , de Engenharia e Ambiental, Ouro preto, 8p.
- Llorent, A., Villar, M., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X. & Alonso, E. (2003). Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Geotechnique*, v1(1): pp.27–40.
- Luxmoore, R.J. (1981). Micro, meso and macro porosity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, Madison, v45: pp. 671–672.
- Marinho, F.A.M. (1994). Shrinkage of some plastic soils. Thesis doctor, Imperial College of Science, Technology and medicine, Faculty of engineering, University of London, London. 256p. .
- Marinho, F.A.M. (1995). A tecnica do papel filtro para a medição de sucção. Encontro sobre solos não saturados, Porto Alegre, Anais, pp. 112–125.
- Martin, F.J. & Doynne, H.C. (1927). Laterite and lateritic soils in sierra leone. *I. J. Agric. Sci*, v17: pp. 530–547.
- Millot, G. (1964). *Geologie des argiles*. Masson Cie. Paris, 1(55): pp 1–20.
- Nogami, J. & Villibor, D. (1994). Identificação expedita dos grupos de classificação mct para os solos tropicais. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, fox de iguaçu, vol. 4, . Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, pp. 1293–1300.
- Olmos, J., Rodriguez, J. & Da Silveira, C. (1981). Levantamentos pedologicos no brasil executados pelo s.n.l.c.s-embrapa. Simposio brasileiro de solos tropicais em engenharia, COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS, pp. 500–593.
- Otalvaro, I.F. (2013). Comportamento hidromecânico de um solo tropical compactado. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-082/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 122 p. .
- Ozelim, L.C.S.M., Camapum de Carvalho, J., Cavalcante, A.L.B., Silva, J.P. & Muñetón, C.M.G. (2014). Novel approach to consolidation theory of structured and collapsible soils. *Int. J. Geomech.*, v15(2005): pp. 1–11.
- Pastore, E.L. (1995). Weathering profiles. 10th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Guadalajara, México, pp. 353–364.
- Pedro & Melfi, A. (1983). Weathering of rocks and formation of soils. 2nd International Seminar on Lateritisation Processes, pp. 3–11.
- Proctor, R.R. (1933). Fundamental principles of soil compaction, *Engineering news-record*. McGRAW HILLBOOK COMPANY INC, 286p.

- Queiroz, A.C.G. (2015). Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados, Distrito Federal. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-104/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 108p. .
- Richards, L.A. (1965). Physical conditions of water in soil. in: black, c. a. (ed.). methods of soil analysis. madison: american society for testing and materials., Methods soil Anal., : pp. 128–152.
- Romero, E. & Vanaut, J. (2000). Retention curves of deformable clays. experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils. Balkema rotterdam, Mancuso & Tarantino (Ed.), pp. 91–106.
- Santos, P. de souza. (1975). Tecnologia de argilas aplicada as argilas brasileiras, volume 1. Edgar Blucher Ltda, 737p.
- Schellmann, W. (1982). Eine neue lateritdefinition. Geol. Jahrbuch, R., 58: pp 31–47.
- Seed, H.B. & Chan, C.K. (1959). Structure and strenght characteristics of compacted clays. ASCE, J. Soil Mech. Found. Div., v85: pp.87–128.
- Seed, H.B., Mitchell, J.K. & Chan, C.K. (1960). The strenght of compacted cohesive soils. Shear strenght conference, pp.887–964.
- Sherman, D. (1952). The genesis and morphology of the alumina-rich laterite clays. clay and laterite genesis. Am. Inst. Min, Met, v1: pp 154–161.
- Simon, M.J. (1964). Les compacteurs à pneus en construction routière: recherche d'une, méthode de détermination rationnelle de leurs caractéristiques et de leurs conditions d'emploi optimal annales. I.T.B.T.P., v193(1): pp.121–144.
- Skempton, A. (1953). The colloidal “activity” of clays. Proceedings of Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland, pp 57–61.
- Vargas, M. (1978). Introdução á mecânica dos solos. McGRAW HILLBOOK COMPANY INC, 509 p.