

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS  
TROPICAIS CARACTERÍSTICOS DO DISTRITO FEDERAL  
PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

**ANNA KARINA CHAVES DELGADO**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G.TD- 045A/07**

**BRASÍLIA: MAIO DE 2007**

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS  
CARACTERÍSTICOS DO DISTRITO FEDERAL PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO  
RODOVIÁRIA**

**ANNA KARINA CHAVES DELGADO**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

-----  
JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)  
(ORIENTADOR)

-----  
ALEXANDRE BENETTI PARREIRA, PhD (USP/SC)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

-----  
FABRÍCIO BUENO CARDOSO, PhD  
(EXAMINADOR EXTERNO)

-----  
ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

-----  
MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF, 30 DE ABRIL DE 2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

DELGADO, ANNA KARINA CHAVES

Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária

xvii, 392p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2007).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília.  
Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| 1. Pavimentação | 2. Solos Tropicais       |
| 3. Sucção       | 4. Ensaio de Laboratório |
| I. ENC/FT/UnB   | II. Título (Série)       |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DELGADO, A. K. C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado, G.TD-045/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 392p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Anna Karina Chaves Delgado

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária.

GRAU/ANO: Doutor/2007

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

-----  
Anna Karina Chaves Delgado  
SQN 305, Bloco F, apt.603, Asa Norte  
CEP: 70737-070 Brasília/DF – Brasil

## DEDICATÓRIA

### *A DEUS*

*A minha mãe **Maria Célia**,  
As Tias, **Maria José Chaves** e **Maria Djanira Chaves**,  
Aos Avós, **José Chaves** (in memória) e **Maria do Carmo**,  
Ao Professor e Amigo, **José Henrique Feitosa Pereira**,  
Aos **Irmãos**, **Vladimir** e **Anna Karenina**  
Aos **amigos** verdadeiros pelo apoio e carinho  
Aos **colegas** pelo aprendizado e crescimento.*

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. José Camapum de Carvalho pelo interesse, incentivo, orientação e ensinamentos ministrados durante o período de desenvolvimento da tese.

Ao professor Márcio Muniz de Farias pelas valiosas orientações recebidas na fase de análise dos resultados e pelo incentivo no decorrer desta pesquisa.

Ao professor José Henrique Feitosa Pereira, ser humano e professor fantástico, que ensinou muito além dos livros.

Aos amigos e colegas David Luz, Luiz Guilherme Mello, Maruska Tatiana, Fabrícia Oliveira, Márcia Mascarenha, Marisaides Lima, Luciana Dellabianca, Suzana Dellabianca (in memória), Paula Passos, por todo o apoio e ajuda fornecida, assim como pelo aprendizado tanto no campo profissional quanto pessoal.

Aos técnicos, Oswaldo Filho, Vanilson Gustavo, Alessandro da Silva Barbosa e Ricardo, pelo auxílio na realização dos ensaios laboratoriais.

A minha mãe Maria Célia e tias Maria José e Maria Djanira que sempre me apoiaram no decorrer da vida. E ainda, a prima Maria da Conceição que tanto me ajudou no início em Brasília.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pela oportunidade de desenvolver o trabalho de pesquisa.

# **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS CARACTERÍSTICOS DO DISTRITO FEDERAL PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

## **RESUMO**

Este trabalho visa o estudo da influência da sucção no comportamento mecânico de 13 solos característicos do Distrito Federal, compactados na condição natural e estabilizados quimicamente. A metodologia adotada envolve a execução de ensaios laboratoriais sobre as amostras oriundas de diferentes tipos de solos superficiais, coletados em pontos extremos da região. A análise foi feita a partir de resultados de sucção obtidos pelo método do papel filtro, da umidade determinada em estufa, da massa específica aparente seca obtida usando-se os resultados da balança hidrostática e medições com paquímetro, da resistência à penetração, da resistência a compressão simples, da perda de massa por imersão e da absorção. Os resultados indicam que as propriedades e comportamento dos solos diferem de acordo com suas características físico-químicas, mineralógicas e estruturais, observando-se ainda para alguns dos materiais a importância do intemperismo. Quanto ao comportamento mecânico dos solos compactados, observou-se que para energias e umidades de compactação variáveis, obtêm-se comportamentos distintos. Destaca-se ainda que, a maioria dos solos estudados são passíveis de uso na estrutura de pavimentos ao se considerar a atuação da sucção e da estabilização com cal.

# **MECHANICAL BEHAVIOR OF CHARACTERISTICS TROPICAL SOILS OF THE DISTRITO FEDERAL TO USE IN THE ROADS PAVEMENTS**

## **ABSTRACT**

This research aimed the study of the influence of the suction on the mechanical behavior of 13 characteristic soils of the Federal District, compacted under natural conditions and stabilized. The methodology adopted involved the execution of laboratory testings using samples of different types of soils collected in extreme points of the region. The analysis is made using the results of suctions obtained by the method of the paper filter, the water content determined in stove, the apparent specific mass obtained using the results of the hydrostatic scale and measurements with caliper rule, of the penetration strength, the unconfined compression strength, loss of mass by immersion and absorption. The results indicate that the properties and soils behavior and mixtures differs in their characteristics depending on structural, physical, chemical and mineralogical characteristics, being also observed for some materials the importance of intemperism. With regard to the mechanical behavior of compacted soils, it was observed that for varying compaction energies and pointed out that the majority of the soils studied can be use in pavements structures if suction and time stabilization are considered.

# ÍNDICE

| Capítulo  | Página    |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>  | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                       | <b>4</b>  |
| 2.1 – Solos Lateríticos   | 4         |
| 2.1.1 – Perfis de Intemperismo.   | 9         |
| 2.1.2 – Aspetos Químicos dos Solos Lateríticos                                  | 16        |
| 2.1.2.1 – Hidrólise.  | 16        |
| 2.1.2.2 – Queluviação.  | 17        |
| 2.1.3 - Características Geotécnicas dos Solos Lateríticos do Distrito Federal.  | 18        |
| 2.2 – Classificação dos Solos   | 20        |
| 2.2.1 – A Metodologia e a Classificação Geotécnica MCT                          | 22        |
| 2.2.1.1 – Metodologia MCT.  | 22        |
| 2.2.1.2 – A Classificação Geotécnica MCT.                                       | 26        |
| 2.3 - Solos Não Saturados / Sucção no Solo                                      | 28        |
| 2.3.1 – Fases em um Solo Não Saturado.  | 32        |
| 2.3.2 - Métodos de Medição de Sucção.   | 34        |
| 2.3.3 – Método do Papel Filtro.   | 34        |
| 2.4 - Curva Característica  | 37        |
| 2.4.1 – Curva Característica Transformada.                                      | 42        |
| 2.5 – Solos Compactados   | 44        |
| 2.5.1 – Estrutura dos Solos Compactados.  | 45        |
| 2.6 – Pavimentação de Baixo Custo   | 48        |
| 2.6.1 - Pavimentação com Argilas Lateríticas.                                   | 49        |
| 2.6.2 - Pavimentação com Solo Arenoso Fino Laterítico.                          | 50        |
| 2.7 – Estabilização dos Solos.  | 50        |
| 2.7.1 – Estabilização do Solo com Cal   | 51        |
| 2.7.1.1- Introdução.  | 51        |
| 2.7.1.2- Mecanismo de Estabilização Solo-Cal.                                   | 52        |
| 2.7.1.3- Solos apropriados para a Estabilização com Cal.                        | 54        |
| 2.7.1.4- Alteração nas Propriedades Mecânicas dos Solos devido a Adição da Cal. | 56        |
| 2.8 – Análises Microscópicas.   | 63        |
| <b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E METÓDOS</b>   | <b>66</b> |
| 3.1 – Critério de Escolha dos Solos   | 66        |
| 3.1.1 – Solos estudados.  | 67        |
| 3.2 – Metodologia   | 74        |
| 3.2.1 - Caracterização Física dos Solos.  | 74        |
| 3.2.2 - Análise Mineralógica e Química dos Solos.                               | 74        |
| 3.2.3 - Classificação MCT.  | 75        |
| 3.2.4 - Curvas de Mini- Compactação.  | 75        |
| 3.2.5 - Mini- Compactação.  | 75        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.2.2.5 – Compactação Dinâmica.   | 77         |
| 3.2.6 - Determinação da Sucção – Método do Papel Filtro.  | 79         |
| 3.2.7 - Determinação das Curvas Características.  | 80         |
| 3.2.8 - Determinação do Mini-CBR.   | 83         |
| 3.2.9 - Perda de Massa por Imersão.   | 85         |
| 3.2.10 - Ensaio de Absorção ou Capilaridade.  | 85         |
| 3.2.11 - Determinação do Teor Ótimo de Cal pelo Método de Eades e Grim.   | 86         |
| 3.2.12 - Determinação da Resistência à Compressão Simples dos Solos.  | 87         |
| <b>CAPÍTULO 4 – PROPRIEDADES FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS</b>  | <b>89</b>  |
| 4.1 – Propriedades Físicas dos Solos Estudados.   | 89         |
| 4.2 – Classificação dos Solos.  | 99         |
| <b>CAPÍTULO 5 – PROPRIEDADES QUÍMICAS, MINERALÓGICAS E CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS</b>                                | <b>102</b> |
| 5.1 - Propriedades Químicas.  | 102        |
| 5.2 - Propriedades Mineralógicas.   | 107        |
| 5.3 - Características Estruturais dos Solos Estudados.  | 112        |
| <b>CAPÍTULO 6 – CURVAS DE COMPACTAÇÃO</b>   | <b>169</b> |
| <b>CAPÍTULO 7 – CURVAS CARACTERÍSTICAS</b>  | <b>186</b> |
| 7.1 – Efeito do Tipo de Solo nas Curvas Características (Amostras Indeformadas).                                      | 187        |
| 7.2 – Influência da Estabilização Física e Química na Forma da Curva Característica.                                  | 193        |
| 7.2.1- Influência da Energia e da Umidade Compactação na Curva Característica   | 193        |
| 7.2.1.1 - Curvas Características dos Solos Estudados Compactados nas Condições Ótimas do PN.                          | 194        |
| 7.2.1.2 – Influência da Energia de Compactação na Curva Característica.   | 200        |
| 7.2.2 – Influência da Estabilização Química, da Umidade e da Energia de Compactação na Forma da Curva Característica. | 202        |
| 7.3 – Influência do Tempo de Estabilização na Forma da Curva Característica.  | 208        |
| 7.4 – Efeito da Trajetória de Variação de Umidade na Forma da Curva Característica.                                   | 212        |
| <b>CAPÍTULO 8 – RESISTÊNCIA DOS SOLOS COMPACTADOS</b>   | <b>216</b> |
| 8.1 – Efeito da Energia de Compactação (N) na Sucção (pF) e no Índice de Vazios (e).                                  | 217        |
| 8.2 – Efeito da Sucção e do Índice de Vazios no Comportamento Mecânico dos Solos                                      | 237        |
| 8.2.1 – Solos Compactados Naturais Não Saturados.   | 237        |
| 8.2.2 – Solos Compactados no Estado Natural e Saturados.  | 246        |
| 8.2.3 – Solos Estabilizados Não Saturados Compactados na Umidade Ótima.   | 251        |
| 8.2.4 – Solos Estabilizados Saturados e Compactados na Umidade Ótima.   | 263        |
| 8.2.5 – Solos Estabilizados Não Saturados Compactados em Diferentes Umidades.   | 268        |
| 8.2.6 – Solos Estabilizados Compactados em Diferentes Umidades e Saturados.   | 277        |
| 8.3 – Considerações Finais sobre a Capacidade de Suporte dos Solos Estudados.   | 285        |
| <b>CAPÍTULO 9 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES</b>  | <b>287</b> |
| 9.1 – Avaliação da Reatividade.   | 287        |
| 9.2 – Avaliação da Resistência à Compressão Simples com o Tempo de Cura.  | 291        |
| <b>CAPÍTULO 10 – PERDA DE MASSA POR IMERSÃO</b>   | <b>297</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 11 – ENSAIO DE CAPILARIDADE OU ABSORÇÃO</b>  | <b>303</b> |
| <b>CAPÍTULO 12 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b>   | <b>315</b> |
| 12.1 – Conclusões  | 315        |
| 12.2 - Sugestões para Pesquisas Futuras  | 324        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>  | <b>327</b> |
| <b>ANEXOS</b>  |            |
| ANEXO I – Curvas Granulométricas.  | 340        |
| ANEXO II – Curvas de Compactação.  | 345        |
| ANEXO III – Efeito da Energia de Compactação na Sucção e no Índice de Vazios para a Umidade de Compactação Ótima do Proctor Normal.  | 349        |
| ANEXO IV – Efeito da Energia de Compactação na Sucção e no Índice de Vazios para Diferentes Umidades de Compactação nos Solos Estabilizados.                                   | 351        |
| ANEXO V – Efeito da Energia de Compactação na Sucção e no Índice de vazios para a Umidade de Compactação Ótima do Proctor Normal.  | 355        |
| ANEXO VI – Efeito da Energia de Compactação na Sucção e no Índice de Vazios para Solos Estabilizados e Compactados no Teor Ótimo de Umidade da Energia Proctor Normal.         | 360        |
| ANEXO VII – Efeito da Estabilização na Resistência a Penetração dos Solos Compactados no Teor Ótimo de Umidade e Ensaiaados na Condição Não Saturada.                          | 364        |
| ANEXO VIII – Efeito da Estabilização na Resistência a Penetração para os Solos Compactados no Teor Ótimo de Umidade e Ensaiaados na Condição Saturada.                         | 365        |
| ANEXO IX – Efeito da Estabilização na Resistência a Penetração para os Solos Compactados em Diferentes Teores de Umidade, Estabilizados e Ensaiaados na Condição Não Saturada. | 367        |
| ANEXO X – Variação Percentual de Resistência verificada para os Solos Compactados e Estabilizados na Condição Não Saturada, considerando Diferentes Umidades de Compactação.   | 374        |
| ANEXO XI – Variação Percentual de Resistência verificada para os Solos Compactados e Estabilizados na Condição Saturada, considerando Diferentes Umidades de Compactação.      | 377        |
| ANEXO XII – Resultados das Resistências a Compressão Simples (RCS) para os Solos Compactados na Condição Natural e Estabilizados Quimicamente.                                 | 383        |
| ANEXO XIII – Curvas de Absorção.   | 390        |

## LISTA DE FIGURAS

| Figura   | Página |
|--|--------|
| Figura 1.1 - Ocorrência dos Solos Lateríticos no Território Brasileiro.  | 2      |
| Figura 2.1 – Perfis Lateríticos.   | 11     |
| Figura 2.2 – Perfil Hipotético de um Solo onde são vistos os Principais Horizontes e Sub-Horizontes.               | 12     |
| Figura 2.3 - Aparelho Compactador.   | 24     |
| Figura 2.4 - Gráficos Representativos de Resultados de Ensaios.  | 25     |
| Figura 2.5 - Gráfico da Classificação MCT e Dados Diversos dos Grupos de Solos.                                    | 28     |
| Figura 2.6 - Estruturas de Solos Compactados.  | 32     |
| Figura 2.7 - Curvas de Calibração para o Papel Filtro Whatman n <sup>o</sup> 42.                                   | 36     |
| Figura 2.8 – Formas de Fluxo da Água.  | 37     |
| Figura 2.9 - Definição de Variáveis associadas com a Curva Característica do Solo.                                 | 39     |
| Figura 2.10 – Curvas Características.  | 41     |
| Figura 2.11 – Curva Característica e Curva Característica Transformada.  | 43     |
| Figura 2.12 – Estudo do Comportamento Mecânico dos Solos.  | 44     |
| Figura 2.13 – Estruturas de Solos Compactados.   | 47     |
| <br>   |        |
| Figura 3.1 - Mapa de Localização dos Pontos de Coleta dos Solos Estudados.   | 71     |
| Figura 3.2 - Mapa Geológico do Distrito Federal e os Pontos de Coleta das Amostras.                                | 72     |
| Figura 3.3 – Mapa Pedológico do Distrito Federal e os Pontos de Coleta das Amostras.                               | 73     |
| Figura 3.4 – Curva de Compactação.   | 78     |
| Figura 3.5 – Compactação Dinâmica para a Obtenção das Curvas Características.                                      | 81     |
| Figura 3.6 – Trajetórias de Variação de Umidade.   | 81     |
| Figura 3.7 – Correção de Índice de Vazios.   | 83     |
| Figura 3.8 – Obtenção dos Valores de Mini-CBR e PMI.   | 84     |
| Figura 3.9 – Ensaio de Absorção.   | 86     |
| Figura 3.10 – Obtenção das Absorções.  | 86     |
| Figura 3.11- Obtenção das Resistências a Compressão Simples (RCS).   | 88     |
| <br>   |        |
| Figura 4.1- Índices Físicos x Limite de Plasticidade.  | 93     |
| Figura 4.2 – Curvas Granulométricas Representativas dos Solos Estudados.   | 95     |
| Figura 4.3 - Relação entre Teor de Argila Com e Sem Defloculante e Índice de Vazios.                               | 96     |
| Figura 4.4 – Classificação TRB.  | 100    |
| Figura 4.5 – Classificação SUCS.   | 100    |
| Figura 4.6 - Ábaco para Classificação MCT.   | 101    |
| <br>   |        |
| Figura 5.1 - Microscopia do Solo HB7 obtida para Amostra Natural (Indeformada).                                    | 112    |
| Figura 5.2 - Microscopia de Varredura do Solo HB7 Compactado na Energia PN.  | 114    |
| Figura 5.3 - Microanálise do Solo HB7 Compactado na Energia PN.  | 114    |
| Figura 5.4 - Microscopia de Varredura do Solo HB7 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN. | 115    |
| Figura 5.5 – Microanálise no Solo HB7 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.             | 116    |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.6 – Curvas Granulométricas obtidas para o Solo HB7.  | 116 |
| Figura 5.7 - Microscopia do Solo HB9b obtida para Amostra Natural (Indeformada).  | 117 |
| Figura 5.8 - Microscopia de Varredura do Solo HB9b Compactado na Energia PN.  | 118 |
| Figura 5.9 - Microanálise do Solo HB9b Compactado na Energia PN.  | 118 |
| Figura 5.10 - Microscopia de Varredura do Solo HB9b Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.  | 119 |
| Figura 5.11 – Microanálise do Solo HB9b Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.  | 120 |
| Figura 5.12 – Microscopias do solo HB10 em Estado Indeformado, mostrando Agregados no Interior do Solo e, Grãos de Quartzo Arredondados a Angulosos Dispersos.                            | 121 |
| Figura 5.13 - Microscopia de Varredura do Solo HB10 Compactado na Energia PN.   | 122 |
| Figura 5.14 - Microanálise do Solo HB10 Compactado na Energia PN.   | 123 |
| Figura 5.15 - Microscopia de Varredura do Solo HB10 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.  | 124 |
| Figura 5.16 – Microanálise do Solo HB10 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.  | 124 |
| Figura 5.17 – Curvas Granulométricas do Solo HB10.  | 125 |
| Figura 5.18 - Microscopia do Solo HB11 obtida para Amostra Natural (Indeformada).   | 126 |
| Figura 5.19 - Microscopia de Varredura do Solo HB11 Compactado na Energia PN.   | 127 |
| Figura 5.20 - Microanálise do Solo HB11 Compactado na Energia PN.   | 127 |
| Figura 5.21 - Microscopia de Varredura do Solo HB11 Estabilizado e Compactado na Energia PN.  | 128 |
| Figura 5.22 – Microanálise do Solo HB11 Estabilizado e Compactado na Energia PN.  | 129 |
| Figura 5.23 – Microscopia do Solo HB12 em Estado Indeformado, mostrando Agregados, na Maioria em Blocos, e os Vazios Compactos Simples .  | 130 |
| Figura 5.24 - Microscopia de Varredura do Solo HB12 Compactado na Energia PN.   | 131 |
| Figura 5.25 - Microanálise do Solo HB12 Compactado na Energia PN.   | 132 |
| Figura 5.26 - Microscopia de Varredura do Solo HB12 Estabilizado e Compactado na Energia PN.  | 133 |
| Figura 5.27 – Microanálise do Solo HB12 Estabilizado e Compactado na Energia PN – Análise realizada na massa do solo. Prováveis illita+caulinita.   | 134 |
| Figura 5.28 – Curvas Granulométricas do Solo HB12.  | 134 |
| Figura 5.29 – Detalhes Observados Microscopicamente para o Solo Fino (HBR1).  | 135 |
| Figura 5.30 – Solo Fino em Diferentes Umidades de Compactação.  | 135 |
| Figura 5.31 – Solo-Cal no Ramo Seco (w = 17%).  | 136 |
| Figura 5.32 – Curvas Granulométricas do Solo HBR1.  | 138 |
| Figura 5.33 – Solo Fino HBR2.   | 139 |
| Figura 5.34 – Microscopia de Varredura do Solo HBR2 - Aumento de 100x.  | 140 |
| Figura 5.35 – Microscopia de Varredura – Solo-Cal (3%) - Aumento de 100x.   | 140 |
| Figura 5.36 – Microscopia de Varredura – Solo-Cal (6%) - Aumento de 100x.   | 141 |
| Figura 5.37 – Microscopia –Materiais Diversos – Aumento de 5000x.   | 142 |
| Figura 5.38 – Curvas Granulométricas do Solo HBR2.  | 142 |
| Figura 5.39 - Microfotografias do Solo ZM3 em Estado Natural (Indeformado) Mostrando Grãos de Quartzo Dispersos e, Vazios Compactos, onde alguns são Preenchidos por Nódulos de Hematita. | 143 |
| Figura 5.40 - Microscopia de Varredura do Solo ZM3 Compactado na Energia PN.  | 144 |
| Figura 5.41 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo ZM3.  | 144 |
| Figura 5.42 - Microscopia de Varredura do Solo ZM3 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.   | 145 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.43 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo ZM3 Estabilizado.   | 146 |
| Figura 5.44 – Curvas Granulométricas do Solo ZM3.   | 147 |
| Figura 5.45 - Microscopia do Solo ZM6 obtida para Amostra Natural (Indeformada), mostrando Vazio Preenchido por Hematita.                   | 148 |
| Figura 5.46 - Microscopia de Varredura do Solo ZM6 Compactado na Energia PN.  | 149 |
| Figura 5.47 – Microanálise do Solo ZM6 Compactado na Energia PN.  | 149 |
| Figura 5.48 - Microscopia de Varredura do Solo ZM6 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.                         | 150 |
| Figura 5.49 – Microanálise x1 - Na palheta. Argilomineral (prováveis illita e caulinita). Solo ZM6 Estabilizado e Compactado na Energia PN. | 151 |
| Figura 5.50 – Curvas Granulométricas do Solo ZM6.   | 151 |
| Figura 5.51 - Microfotografias do Solo SF2 em Estado Natural (Indeformado).   | 152 |
| Figura 5.52 - Microscopia de Varredura do Solo SF2 Compactado na Energia PN.  | 153 |
| Figura 5.53 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo SF2.  | 153 |
| Figura 5.54 - Microscopia de Varredura do Solo SF2 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.                         | 154 |
| Figura 5.55 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo SF2 Estabilizado.   | 155 |
| Figura 5.56 – Curvas Granulométricas do Solo SF2.   | 155 |
| Figura 5.57 - Fotomicrografia do Solo SF4 referente à LD com Corte Perpendicular à Clivagem Ardosiana.                                      | 156 |
| Figura 5.58 - Microscopia de Varredura do Solo SF4 Compactado na Energia PN.  | 157 |
| Figura 5.59 - Microanálise do Solo SF4 Compactado na Energia PN.  | 158 |
| Figura 5.60 - Microscopia de Varredura do Solo SF4 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.                         | 158 |
| Figura 5.61 - Microanálise do Solo SF4 Estabilizado e Compactado na Energia PN.   | 159 |
| Figura 5.62 – Curvas Granulométricas do Solo SF4.   | 160 |
| Figura 5.63 - Microfotografias do solo SF8 em Estado Natural (Indeformado).   | 160 |
| Figura 5.64 - Microscopia de Varredura do Solo SF8 Compactado na Energia PN.  | 161 |
| Figura 5.65 – Microanálise na Estrutura do Solo SF8.  | 162 |
| Figura 5.66 - Microscopia de Varredura do Solo SF8 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.                         | 162 |
| Figura 5.67 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo SF8 Estabilizado.   | 163 |
| Figura 5.68 – Curvas Granulométricas do Solo SF8.   | 164 |
| Figura 5.69 – Microscopia do Solo SF13 no Estado Indeformado, mostrando os Minerais Orientados segundo as Foliações.                        | 164 |
| Figura 5.70 - Microscopia de Varredura do Solo SF13 Compactado na Energia PN.   | 165 |
| Figura 5.71 - Microanálise do Solo SF13 Compactado na Energia PN.   | 166 |
| Figura 5.72 - Microscopia de Varredura do Solo SF13 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.                        | 166 |
| Figura 5.73 - Microanálise do Solo SF13 Estabilizado e Compactado na Energia PN.  | 167 |
| Figura 5.74 – Curvas Granulométricas do Solo SF13.  | 168 |
| <br>  |     |
| Figura 6.1 – Parâmetros de Mini-compactação.  | 170 |
| Figura 6.2 – Mini-compactação do Solo HB7.  | 172 |
| Figura 6.3 – Mini-compactação do Solo HB9b.   | 173 |
| Figura 6.4 – Mini-compactação do Solo HB10.   | 173 |
| Figura 6.5 – Mini-compactação do Solo HB11.   | 174 |
| Figura 6.6 – Mini-compactação do Solo HB12.   | 175 |
| Figura 6.7 – Mini-compactação do Solo HBR1.   | 176 |
| Figura 6.8 – Mini-compactação do Solo HBR2.   | 176 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.9 – Mini-compactação do Solo ZM3.  | 177 |
| Figura 6.10 – Mini-compactação do Solo ZM6.   | 178 |
| Figura 6.11 – Mini-compactação do Solo SF2.   | 179 |
| Figura 6.12 – Mini-compactação do Solo SF4.   | 180 |
| Figura 6.13 – Mini-compactação do Solo SF8.   | 180 |
| Figura 6.14 – Mini-compactação do Solo SF13.  | 181 |
|   |     |
| Figura 7.1 – Curvas Características dos Solos HB (Indeformadas).  | 190 |
| Figura 7.2 – Curvas Características dos Solos ZM (Indeformadas).  | 190 |
| Figura 7.3 – Curvas Características dos Solos SF (Indeformadas).  | 190 |
| Figura 7.4 – Curvas Características das Amostras Indeformadas (TU).   | 192 |
| Figura 7.5 - Curvas Características Indeformadas e Compactadas dos Latossolos.  | 196 |
| Figura 7.6 - Curvas Características Indeformadas e Compactadas dos Solos da Zona Mosqueada.   | 196 |
| Figura 7.7 - Curvas Características Indeformadas e Compactadas dos Solos Saprólíticos.  | 196 |
| Figura 7.8 - Curvas Características do Solo HB7 Compactado em Diferentes Umidades.  | 198 |
| Figura 7.9 - Curvas Características do Solo HB9b Compactado em Diferentes Umidades.   | 198 |
| Figura 7.10 - Curvas Características do Solo HB11 Compactado em Diferentes Umidades.  | 198 |
| Figura 7.11 - Curvas Características do Solo ZM6 Compactado em Diferentes Umidades  | 199 |
| Figura 7.12 - Curvas Características do Solo SF4 Compactado em Diferentes Umidades.   | 199 |
| Figura 7.13 - Curvas Características de Amostras Compactadas para Solos HB e ZM.  | 200 |
| Figura 7.14 - Curvas Características Compactadas na Energia Proctor Intermediária (PI).   | 201 |
| Figura 7.15 - Curvas Características dos Latossolos Estabilizados Quimicamente – PN.  | 205 |
| Figura 7.16 - Curvas Características dos Solos Pertencentes a Zona Mosqueada Estabilizados Quimicamente – PN.   | 206 |
| Figura 7.17 - Curvas Características dos Solos Saprólíticos Estabilizados – PN.   | 207 |
| Figura 7.18 - Curvas Características de Solos Estabilizados - PN  | 208 |
| Figura 7.19 - Curvas Características do Solo HB11 – 15 e 30 dias.   | 210 |
| Figura 7.20 - Curvas Características do Solo ZM6 – 15 e 30 dias.  | 210 |
| Figura 7.21 - Curvas Características do Solo SF4 – 15 e 30 dias.  | 211 |
| Figura 7.22 - Curvas Características do Solo HB11 na (TU) e na (TM) para wót de Compactação e Tempo de Equilíbrio de Sucção igual a 15 dias.                      | 213 |
| Figura 7.23 - Curvas Características do Solo ZM6 na (TU) e na (TM) para wót de Compactação e Tempo de Equilíbrio de Sucção igual a 15 dias.                       | 213 |
| Figura 7.24 - Curvas Características do Solo SF4 na (TU) e na (TM) para wót de Compactação e Tempo de Equilíbrio de Sucção igual a 15 dias.                       | 214 |
| Figura 7.25 - Curvas Características do Solo HB11 Natural e Estabilizado.   | 215 |
| Figura 7.26 - Curvas Características do Solo ZM6 Natural e Estabilizado.  | 215 |
| Figura 7.27 - Curvas Características do Solo SF4 Natural e Estabilizado.  | 215 |
|   |     |
| Figura 8.1 - Curvas “pF x e” para Diferentes Umidades - Solos HB.   | 219 |
| Figura 8.2 - Curvas “pF x e” para Diferentes Umidades - Solos ZM.   | 221 |
| Figura 8.3 - Curvas “pF x e” para Diferentes Umidades - Solos SF.   | 222 |
| Figura 8.4 - Curvas “e x N” para Diferentes Umidades - Solos HB.  | 223 |
| Figura 8.5 - Curvas “e x N” para Diferentes Umidades - Solos ZM.  | 225 |
| Figura 8.6 - Curvas “e x N” para Diferentes Umidades - Solos SF.  | 225 |
| Figura 8.7 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos HB Compactados no Teor de Umidade Ótima do Proctor Normal e Estabilizados com Diferentes Percentuais de Cal. | 227 |
| Figura 8.8 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos ZM Compactados no Teor de  | 229 |

|   |     |
|---|-----|
| Umidade Ótima do Proctor Normal e Estabilizados com Diferentes Percentuais de Cal.  |     |
| Figura 8.9 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos SF Compactados no Teor de Umidade Ótima do Proctor Normal e Estabilizados com Diferentes Percentuais de Cal. | 231 |
| Figura 8.10 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos HB Compactados em Diferentes Teores de Umidade e Estabilizados.   | 231 |
| Figura 8.11 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos ZM Compactados em Diferentes Teores de Umidade e Estabilizados.   | 233 |
| Figura 8.12 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o Solo SF2 Compactado em Diferentes Teores de Umidade e Estabilizados.   | 233 |
| Figura 8.13 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB7.   | 239 |
| Figura 8.14 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB9b.  | 239 |
| Figura 8.15 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB11.  | 240 |
| Figura 8.16 - Variação Percentual do Mini-CBR em Relação aos Valores obtidos para o Teor de Umidade de Compactação Ótimo.   | 241 |
| Figura 8.17 - Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6.   | 243 |
| Figura 8.18 - Variação Percentual do Mini-CBR em Relação aos Valores obtidos para o Teor de Umidade de Compactação Ótimo – Solos ZM.                              | 243 |
| Figura 8.19 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF4.   | 244 |
| Figura 8.20 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF8.   | 244 |
| Figura 8.21 - Variação Percentual do Mini-CBR, em Relação aos Valores obtidos para a Compactação na w <sub>ót</sub> – Solos SF.                                   | 245 |
| Figura 8.22 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos HB.   | 247 |
| Figura 8.23 - Variação Percentual de Queda da Resistência Com a Imersão.  | 249 |
| Figura 8.24 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos ZM.   | 249 |
| Figura 8.25 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos SF.   | 250 |
| Figura 8.26 - Variação Percentual de Queda da Resistência Com a Imersão – Solos SF.   | 250 |
| Figura 8.27 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB7.   | 255 |
| Figura 8.28 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB11.  | 255 |
| Figura 8.29 - Variação do Mini-CBR para o Solo HBR1.  | 256 |
| Figura 8.30 - Variação do Mini-CBR para o Solo ZM3.   | 258 |
| Figura 8.31 - Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6.   | 258 |
| Figura 8.32 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF2.   | 261 |
| Figura 8.33 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF4.   | 261 |
| Figura 8.34 - Acréscimo (%) do Mini-CBR Com a Estabilização Química – Solos HB.   | 262 |
| Figura 8.35 - Acréscimo (%) do Mini-CBR Com a Estabilização Química – Solos ZM.   | 263 |
| Figura 8.36 - Acréscimo (%) do Mini-CBR Com a Estabilização Química – Solos SF.   | 263 |
| Figura 8.37 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos HB.   | 265 |
| Figura 8.38 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos ZM.   | 266 |
| Figura 8.39 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos SF.   | 266 |
| Figura 8.40 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB7.   | 269 |
| Figura 8.41 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB9b.  | 271 |
| Figura 8.42 - Variação Percentual do Mini-CBR.  | 272 |
| Figura 8.43 – Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6.   | 273 |
| Figura 8.44 - Variação Percentual do Mini-CBR para o Solo ZM6.  | 274 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 8.45 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF4.  | 275 |
| Figura 8.46- Variação Percentual do Mini-CBR para o Solo SF4.                              | 277 |
| Figura 8.47 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo HB7.                              | 278 |
| Figura 8.48 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo HB9b.                             | 279 |
| Figura 8.49 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo ZM6.                              | 281 |
| Figura 8.50 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo SF2.                              | 282 |
| Figura 8.51 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo SF4.                              | 283 |
| <br>   |     |
| Figura 9.1 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo HB7.                          | 289 |
| Figura 9.2 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo HB9b                          | 290 |
| Figura 9.3 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo ZM6                           | 290 |
| Figura 9.4 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo SF4.                          | 291 |
| Figura 9.5 – Comparação entre os Latossolos Compactados a 30% e 29% de Umidade             | 296 |
| <br>   |     |
| Figura 10.1 – PMI obtidas para os Latossolos Com e Sem Estabilização Química.              | 299 |
| Figura 10.2 – PMI obtidas para os Solos da Zona Mosqueada Com e Sem Estabilização Química. | 301 |
| Figura 10.3 – PMI obtidas para os Solos Saprólitos Com e Sem Estabilização Química.        | 302 |
| <br>   |     |
| Figura 11.1 – Curva de Infiltrabilidade do Solo HB7 Natural e Estabilizado.                | 305 |
| Figura 11.2 – Curva de Infiltrabilidade do Solo HB9b Natural e Estabilizado.               | 306 |
| Figura 11.3 – Curva de Infiltrabilidade do Solo ZM3 Natural e Estabilizado.                | 309 |
| Figura 11.4 – Curva de Infiltrabilidade do Solo ZM6 Natural e Estabilizado.                | 310 |
| Figura 11.5 – Curva de Infiltrabilidade do Solo SF2 Natural e Estabilizado.                | 311 |
| Figura 11.6 – Curva de Infiltrabilidade do Solo SF4 Natural e Estabilizado.                | 312 |
| <br>   |     |
| Figura I.1 – Curvas Granulométricas do Solo HB7.   | 340 |
| Figura I.2 – Curvas Granulométricas do solo HB9b.  | 340 |
| Figura I.3 – Curvas Granulométricas do solo HB10.  | 340 |
| Figura I.4 – Curvas Granulométricas do solo HB11.  | 341 |
| Figura I.5 – Curvas Granulométricas do solo HB12.  | 341 |
| Figura I.6 – Curvas Granulométricas do solo HBR1.  | 341 |
| Figura I.7 – Curvas Granulométricas do solo HBR2.  | 342 |
| Figura I.8 – Curvas Granulométricas do solo ZM3.   | 342 |
| Figura I.9 – Curvas Granulométricas do solo ZM5.   | 342 |
| Figura I.10 – Curvas Granulométricas do solo ZM6.  | 343 |
| Figura I.11 – Curvas Granulométricas do solo SF1.  | 343 |
| Figura I.12 – Curvas Granulométricas do solo SF2.  | 343 |
| Figura I.13 – Curvas Granulométricas do solo SF4.  | 344 |
| Figura I.14 – Curvas Granulométricas do solo SF8.  | 344 |
| Figura I.15 – Curvas Granulométricas do solo SF13.   | 344 |
| <br>   |     |
| Figura II.1- Mini-compactação do solo HB7.   | 345 |
| Figura II.2- Mini-compactação do solo HB9b.  | 345 |
| Figura II.3- Mini-compactação do solo HB10.  | 346 |
| Figura II.4- Mini-compactação do solo HB11.  | 346 |
| Figura II.5- Mini-compactação do solo HB12.  | 346 |
| Figura II.6- Mini-compactação do solo ZM3.   | 347 |
| Figura II.7- Mini-compactação do solo ZM6.   | 347 |
| Figura II.8- Mini-compactação do solo SF2.   | 347 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura II.9- Mini-compactação do solo SF4.  | 348 |
| Figura II.10- Mini-compactação do solo SF8.   | 348 |
| Figura II.11- Mini-compactação do solo SF13.  | 348 |
| Figura III.1 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB9b compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal. | 349 |
| Figura III.2 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB11 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal. | 349 |
| Figura III.3- Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR1 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.  | 349 |
| Figura III.4 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR2 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal. | 350 |
| Figura III.5 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo SF8 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.  | 350 |
| Figura III.6 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo SF13 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal. | 350 |
| Figura IV.1 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB9b compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.                         | 352 |
| Figura IV.2 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB12 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.                         | 352 |
| Figura IV.3 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR1 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.                         | 352 |
| Figura IV.4 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR2 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.                         | 352 |
| Figura IV.5 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo SF4 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.                          | 353 |
| Figura IV.6 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo SF13 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.                         | 354 |
| Figura V.1- Variação do Mini-CBR para o solo HB10.  | 355 |
| Figura V.2 - Variação do Mini-CBR para o solo HB12.   | 355 |
| Figura V.3 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR1.   | 356 |
| Figura V.4 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR2.   | 357 |
| Figura V.5- Variação do Mini-CBR para o solo ZM3.   | 357 |
| Figura V.6 - Variação do Mini-CBR para o solo SF2.  | 358 |
| Figura V.7- Variação do Mini-CBR para o solo SF13.  | 359 |
| Figura VI.1 - Variação do mini-CBR para o solo HB9b.  | 360 |
| Figura VI.2 - Variação do mini-CBR para o solo HB10.  | 360 |
| Figura VI.3 - Variação do mini-CBR para o solo HB12.  | 361 |
| Figura VI.4 - Variação do mini-CBR para o solo HBR2.  | 362 |
| Figura VI.5 - Variação do mini-CBR para o solo SF8.   | 362 |
| Figura VI.6 - Variação do mini-CBR para o solo SF13.  | 363 |
| Figura VII.1- Acréscimo de Mini-CBR com a estabilização para os solos HB.   | 364 |
| Figura VII.2- Acréscimo de Mini-CBR com a estabilização para os solos SF.   | 364 |
| Figura VIII.1- Decréscimo de mini-CBR com a estabilização para os solos HB.   | 365 |
| Figura VIII.2 - Decréscimo de mini-CBR com a estabilização para os solos SF.  | 366 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura IX.1 - Variação do mini-CBR para o solo HB10.  | 367 |
| Figura IX.2 - Variação do mini-CBR para o solo HB11.  | 368 |
| Figura IX.3 - Variação do mini-CBR para o solo HB12.  | 369 |
| Figura IX.4 - Variação do mini-CBR para o solo HBR1.  | 369 |
| Figura IX.5 - Variação do mini-CBR para o solo HBR2.  | 370 |
| Figura IX.6 - Variação do mini-CBR para o solo ZM3.   | 371 |
| Figura IX.7 - Variação do mini-CBR para o solo SF2.   | 372 |
| Figura IX.8 - Variação do mini-CBR para o solo SF13.  | 373 |
| <br>  |     |
| Figura X.1- Variação do Mini-CBR para o solo HB10.  | 374 |
| Figura X.2 - Variação do Mini-CBR para o solo HB11.   | 374 |
| Figura X.3 - Variação do Mini-CBR para o solo HB12.   | 375 |
| Figura X.4 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR1.   | 375 |
| Figura X.5 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR2.   | 375 |
| Figura X.6- Variação do Mini-CBR para o solo ZM3.   | 376 |
| Figura X.7 - Variação do Mini-CBR para o solo SF2.  | 376 |
| Figura X.8 - Variação do Mini-CBR para o solo SF13.   | 376 |
| <br>  |     |
| Figura XI.1 - Efeito da saturação na resistência do solo HB10.  | 377 |
| Figura XI.2 - Efeito da saturação na resistência do solo HB11.  | 378 |
| Figura XI.3 - Efeito da saturação na resistência do solo HB12.  | 379 |
| Figura XI.4 - Efeito da saturação na resistência do solo HBR1.  | 379 |
| Figura XI.5 - Efeito da saturação na resistência do solo HBR2.  | 380 |
| Figura XI.6 - Efeito da saturação na resistência do solo ZM3.   | 381 |
| Figura XI.7 - Efeito da saturação na resistência do solo SF13.  | 382 |
| <br>  |     |
| Figura XII.1- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HB10.                                     | 383 |
| Figura XII.2- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HB11.                                     | 383 |
| Figura XII.3- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HB12.                                     | 384 |
| Figura XII.4- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HBR1.                                     | 384 |
| Figura XII.5- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HBR2.                                     | 384 |
| Figura XII.6 - Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo ZM3.                                     | 385 |
| Figura XII.7 - Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo SF2.                                     | 385 |
| Figura XII.8 - Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo SF8.                                     | 385 |
| Figura XII.9- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo SF13.                                     | 386 |
| Figura XII.10 – Comparação entre os latossolos compactados a 28% e 29% de umidade.                      | 386 |
| Figura XII.11 – Comparação entre os latossolos compactados a 32% de umidade.                            | 386 |
| Figura XII.12 – Comparação entre os solos HB10 e SF8 compactados a 13% de umidade.                      | 387 |
| Figura XII.13 – Comparação entre os solos HB10, HB11 e SF13 compactados a 15% de umidade.               | 387 |
| Figura XII.14 – Comparação entre os solos HB10, HB11, SF2 e SF13 compactados a 17% de umidade.          | 387 |
| Figura XII.15 – Comparação entre os solos HB11, ZM3, ZM6, SF2 e SF4 compactados a 19% e 20% de umidade. | 388 |
| Figura XII.16 – Comparação entre os solos HBR1, ZM3, ZM6 e SF4 compactados a 24% de umidade.            | 388 |
| Figura XII.17 – Comparação entre os solos HBR1 e HB12 compactados a 26% de umidade.                     | 388 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura XII.18 – Comparação entre os solos ZM3, ZM6, SF2, SF4 e SF13 compactados a 20% e 21% de umidade. | 389 |
| Figura XIII.1 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HB10.                                       | 390 |
| Figura XIII.2 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HB11.                                       | 390 |
| Figura XIII.3 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HB12.                                       | 391 |
| Figura XIII.4 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HBR1.                                       | 391 |
| Figura XIII.5 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HBR2.                                       | 391 |
| Figura XIII.6 - Evolução da umidade com o tempo para o solo SF8.  | 392 |
| Figura XIII.7 - Evolução da umidade com o tempo para o solo SF13.                                       | 392 |

## LISTA DE TABELAS

| Tabela   | Página |
|--|--------|
| Tabela 2.1 - Correlações entre as diferentes classificações de perfis lateríticos completos  | 15     |
| Tabela 2.2 – Técnicas de Medição de Sucção   | 34     |
| Tabela 2.3 – Tempo de Equilíbrio para a Medição da Sucção Total  | 36     |
| <br>   |        |
| Tabela 3.1 - Coordenadas Geodésicas das Amostras Coletadas   | 68     |
| Tabela 3.2 - Os Tipos de Horizontes e as Siglas que os Denominam   | 68     |
| Tabela 3.3 – Tipos de Solos Tropicais a serem Estudados  | 69     |
| Tabela 3.4 – Descrição de Campo dos Materiais Coletados  | 69     |
| Tabela 3.5 – Características Físico-Químicas da Cal Hidratada  | 77     |
| <br>   |        |
| Tabela 4.1 – Resultados dos Ensaios de Caracterização Geotécnica dos Solos <i>in natura</i>  | 90     |
| Tabela 4.2 – Limites de Atterberg  | 92     |
| Tabela 4.3 – Análise Granulométrica das Amostras de Solos em Estado Natural  | 94     |
| Tabela 4.4 – Razões entre as Frações Granulométricas Obtidas Com (CD) e Sem (SD) o Uso de Defloculante.  | 96     |
| Tabela 4.5 – Limites de Atterberg Com a Cal Hidratada Incorporada  | 98     |
| Figura 4.6 – Classificação dos Solos   | 99     |
| <br>   |        |
| Tabela 5.1 – Propriedades Químicas dos Solos Estudados.  | 104    |
| Tabela 5.2 – Propriedades Químicas dos Solos Estudados   | 104    |
| Tabela 5.3 – Análise Química Total e Cálculo da Relação Sílica-Sesquióxidos  | 105    |
| Tabela 5.4 – Evolução do pH com a Incorporação de Cal  | 106    |
| Tabela 5.5– Características Mineralógicas dos Materiais Estudados  | 108    |
| Tabela 5.6 – Teor de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nas Amostras Estudadas   | 111    |
| <br>   |        |
| Tabela 6.1 – Resumo de Análises Física, Mineralógica, Química e Efeito da Cal em Relação ao Material Natural                                     | 183    |
| Tabela 6.2 - Valores de $w_{ót}$ e $\gamma_{dmax}$ obtidos no Ensaio de Mini-Compactação   | 184    |
| <br>   |        |
| Tabela 7.1 – Resumo dos Ensaios Realizados   | 187    |
| Tabela 7.2 - Dados das Curvas Características para Amostras Indeformadas.  | 191    |
| <br>   |        |
| Tabela 8.1 – Corpos de Prova Compactados para Ensaio de Resistência (mini-CBR)   | 216    |
| Tabela 8.2 – Aplicabilidade dos Materiais na Pavimentação Rodoviária   | 251    |
| Tabela 8.3 – Aplicabilidade dos Materiais Estabilizados na Pavimentação Rodoviária.  | 267    |
| Tabela 8.4 – Aplicabilidade dos Materiais Estabilizados na Pavimentação Rodoviária Considerando todas as Variações Estudadas – Com e Sem Imersão | 284    |
| <br>   |        |
| Tabela 9.1 – Parâmetros dos Corpos de Prova Submetidos a RCS   | 288    |
| <br>   |        |
| Tabela 11.1 - Resumo de Infiltrabilidade em Variação de Umidade.   | 314    |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>A.A.</b>          | Amostra Amolgada  |
| <b>A.I.</b>          | Amostra Indeformada   |
| <b>AASHO</b>         | <i>American Association of State Highway Officials</i>                                |
| <b>AASHTO</b>        | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>             |
| <b>ABNT</b>          | Associação Brasileira de normas Técnicas  |
| <b>%aCD / %aSD</b>   | Relação entre percentual de argila com e sem defloculante                             |
| <b>Al</b>            | Alumínio  |
| <b>%Al</b>           | Percentual de Saturação em Alumínio   |
| <b>ASTM</b>          | <i>American Society for Testing and Materials</i>                                     |
| <b>B<sub>0</sub></b> | Pressão correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos                     |
| <b>C</b>             | Carbono orgânico  |
| <b>Ca</b>            | Cálcio  |
| <b>CBR</b>           | <i>California Bearing Ratio</i>   |
| <b>c'</b>            | Coefficiente de deformabilidade da classificação MCT                                  |
| <b>CCI</b>           | Curva Característica obtida a partir de Amostra Indeformada                           |
| <b>CD</b>            | Ensaio realizado com defloculante   |
| <b>CCN</b>           | Curva Característica obtida a partir de Amostra Compactada na Energia Normal          |
| <b>CTC</b>           | Capacidade de Troca Catiônica   |
| <b>DCTC</b>          | Diferença de Capacidade de Troca Catiônica medida em meio alcalino e neutro           |
| <b>DNER</b>          | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  |
| <b>DER-DF</b>        | Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal                               |
| <b>DER-SP</b>        | Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo                            |
| <b>d'</b>            | Inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação na metodologia MCT |
| <b>e<sub>0</sub></b> | Índice de vazios inicial  |
| <b>e'</b>            | Índice de classificação MCT   |
| <b>e</b>             | Índice de vazios  |
| <b>EAMI</b>          | Pressão de entrada de ar nos microporos   |
| <b>eb</b>            | Índice de vazios obtido pela balança hidrostática                                     |
| <b>ec</b>            | Índice de vazios corrigido  |
| <b>HB</b>            | Latossolos  |
| <b>ep</b>            | Índice de vazios obtido através de medições do paquímetro                             |
| <b>Fe</b>            | Ferro   |
| <b>G</b>             | Densidade dos grãos   |
| <b>Ia</b>            | Índice de atividade   |
| <b>IPT/ SP</b>       | Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo                              |
| <b>IP</b>            | Índice de Plasticidade  |
| <b>ISC</b>           | Índice de Suporte Califórnia  |
| <b>Iseco</b>         | Inclinação do ramo seco   |
| <b>Iúmido</b>        | Inclinação do ramo úmido  |
| <b>K</b>             | Potássio  |
| <b>MCT</b>           | Miniatura, Compactado, Tropical   |
| <b>MCV</b>           | <i>Moisture Condition Value</i>   |
| <b>Mg</b>            | Magnésio  |
| <b>mini-MCV</b>      | Ensaio MCV da metodologia MCT   |
| <b>mini-CBR</b>      | Ensaio de suporte da metodologia MCT  |
| <b>mini-Proctor</b>  | Ensaio de compactação de energia constante da metodologia MCT                         |
| <b>MO</b>            | Matéria Orgânica  |

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>M<sub>R</sub></b> .....       | Módulo Resiliente   |
| <b>N</b> .....                   | Número de golpes  |
| <b>Na</b> .....                  | Sódio   |
| <b>NBR</b> .....                 | Norma Brasileira Registrada   |
| <b>P</b> .....                   | Peso  |
| <b>PEA CCI</b> .....             | Ponto de entrada de ar na característica de amostra compactada na energia intermediária (CCI) |
| <b>PEA CCN</b> .....             | Ponto de entrada de ar na curva característica de amostra compactada na energia normal (CCN)  |
| <b>pF</b> .....                  | Logarítmo da sucção em centímetros de coluna de água  |
| <b>pF/e</b> .....                | Sucção normalizada  |
| <b>pH</b> .....                  | Potencial Hidrogeniônico  |
| <b>PN</b> .....                  | Proctor normal  |
| <b>PI</b> .....                  | Proctor intermediário   |
| <b>PMI</b> .....                 | Perda de massa por imersão  |
| <b>PM</b> .....                  | Proctor modificado  |
| <b>RCS</b> .....                 | Resistência a compressão simples  |
| <b>SF</b> .....                  | Solos saprolíticos finos  |
| <b>SD</b> .....                  | Ensaio realizado sem defloculante   |
| <b>Si</b> .....                  | Silício   |
| <b>Sr</b> .....                  | Grau de saturação   |
| <b>Sr B<sub>0</sub></b> .....    | Saturação correspondente ao ponto B <sub>0</sub>  |
| <b>Sr EAMI</b> .....             | Saturação correspondente ao ponto de entrada de ar nos microporos (EAMI)                      |
| <b>SUCS</b> .....                | <i>Unified Soil Classification System</i>   |
| <b>TRB</b> .....                 | <i>Transportation Research Board</i>  |
| <b>T.S.</b> .....                | Trajatória de Secagem   |
| <b>T.U.</b> .....                | Trajatória de Umedecimento  |
| <b>T.M.</b> .....                | Trajatória Mista  |
| <b>ua-uw (kPa)</b> .....         | Sucção em quiloPascal   |
| <b>UnB</b> .....                 | Universidade de Brasília  |
| <b>u<sub>a</sub></b> .....       | Pressão de ar   |
| <b>u<sub>w</sub></b> .....       | Pressão de água   |
| <b>%V</b> .....                  | Percentual de saturação de bases  |
| <b>wB<sub>0</sub></b> .....      | Teor de umidade correspondente ao ponto B <sub>0</sub>  |
| <b>wEAMI</b> .....               | Teor de umidade correspondente ao ponto de entrada de ar nos microporos (EAMI)                |
| <b>wf</b> .....                  | Umidade obtida pela estufa, após realização do ensaio de resistência                          |
| <b>w<sub>L</sub></b> .....       | Limite de liquidez  |
| <b>w<sub>P</sub></b> .....       | Limite de Plasticidade  |
| <b>w</b> .....                   | Teor de umidade   |
| <b>w<sub>n</sub></b> .....       | Umidade natural   |
| <b>w<sub>ót</sub></b> .....      | Teor de umidade ótimo   |
| <b>ZM</b> .....                  | Solos pertencentes a zona mosqueada   |
| <b>γ<sub>obt (b)</sub></b> ..... | Peso específico obtido pela balança hidrostática  |
| <b>γ<sub>obt (p)</sub></b> ..... | Peso específico obtido pelo paquímetro  |
| <b>γ<sub>d máx</sub></b> .....   | Peso específico aparente seco máximo  |
| <b>η</b> .....                   | Porosidade  |

## 1 - INTRODUÇÃO

No Brasil existe em abundância materiais naturais conhecidos como solos tropicais (Figura 1.1). Estes solos apresentam características diferentes daquelas tradicionalmente adotadas, o que foi comprovado com a utilização mais generalizada do ensaio CBR. Como os materiais que atendem às especificações tradicionais (materiais granulares) não são facilmente encontrados em todas as regiões do Brasil, e principalmente junto aos grandes centros urbanos, tornou-se essencial o estudo de materiais alternativos, como os solos lateríticos finos. Atualmente, cresce a importância do uso dos solos finos locais nas camadas de pavimentos rodoviários, seja pelas restrições ambientais, pela escassez de jazidas capazes de fornecer solos grossos adequados para as finalidades rodoviárias ou pelo custo excessivo do transporte.

O emprego de solos finos locais, na condição natural ou mesmo estabilizados impõe a necessidade de um estudo mais detalhado de suas propriedades geotécnicas, considerando parâmetros como sucção, energia e umidade de compactação, perda de massa por Imersão (PMI), resistência à compressão simples (RCS), capacidade de Absorção de água, módulo resiliente, e demais propriedades que reflitam no comportamento e durabilidade das camadas estruturais dos pavimentos. Sabe-se que o comportamento mecânico também é influenciado pelas características do solo natural, portanto, é necessária a vinculação do comportamento mecânico às características físicas, químicas, mineralógicas e estruturais dos solos *in natura* e compactados. Neste contexto, o presente trabalho visa estudar o comportamento mecânico de 13 tipos de solo característicos da região do Distrito Federal, considerando variações de umidade, energia, teor de cal e tempo de estabilização para a determinação da sucção. De forma a se ter uma noção mais realista do comportamento dos diferentes materiais e sua conseqüente aplicabilidade na construção rodoviária, foram realizados os ensaios anteriormente citados à exceção do módulo resiliente, decorrente da não existência de tal aparelho na UnB e ainda, devido à grande variabilidade de materiais aqui estudados. É ainda importante ressaltar que, estes 13 tipos de solos foram anteriormente estudados por Cardoso (2002) e Rezende (2003), o primeiro autor avaliou 11 solos na condição indeformada, caracterizando seus aspectos químicos e mineralógicos para as amostras naturais, além de considerar remoção de matéria orgânica e remoção de óxidos de ferro e alumínio. Rezende (2003) avaliou 2 tipos de solo que foram objeto de construção de camadas de base e sub-base de dois trechos de rodovias atualmente em uso na região do Distrito Federal, sendo, portanto, essencial continuar a caracterização destes materiais.

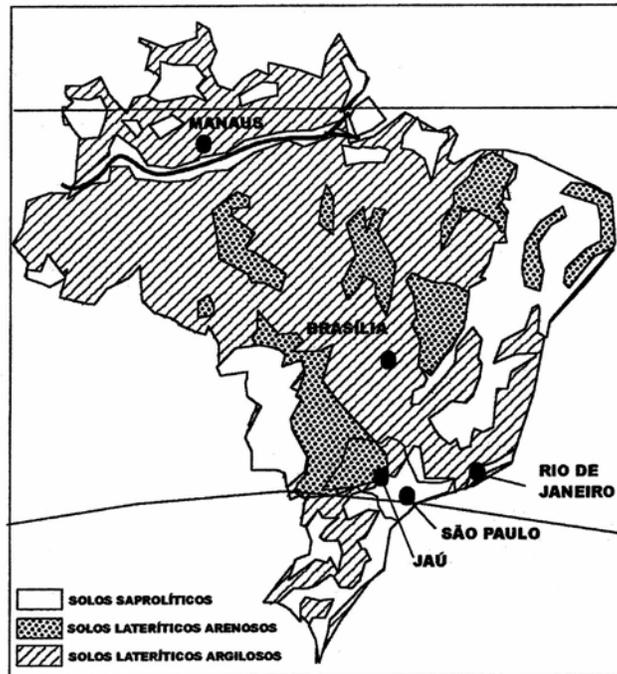


Figura 1.1 – Ocorrência dos solos lateríticos no território brasileiro Villibor, et al., (2000).

De forma sintética, a presente pesquisa teve como objetivo básico: Avaliar o potencial de aplicação dos solos lateríticos locais do Distrito Federal como materiais para construção de pavimentos rodoviários, considerando o efeito da estrutura e das propriedades químicas e mineralógicas no comportamento mecânico dos solos compactados.

De forma a englobar os objetivos acima citados, esta tese é composta pelos seguintes capítulos:

**Capítulo 1** – Introdução;

**Capítulo 2** – Revisão bibliográfica abrangendo conceitos sobre os solos lateríticos, sua utilização na pavimentação, sua importância e o desenvolvimento da metodologia MCT. Também se apresenta uma breve descrição dessa metodologia, da sucção, da curva característica do solo, da estrutura do solo compactado, de algumas características que compõe o solo do Distrito Federal, os tipos de estabilização dos solos e as mudanças que ocorrem nas propriedades dos solos com a adição de produtos químicos.

**Capítulo 3** – Materiais e Métodos, em que conste a descrição dos materiais utilizados, os ensaios realizados e, a metodologia empregada para sua realização em laboratório;

**Capítulo 4** – Propriedades Físicas e Classificação dos solos, apresentando a granulometria dos solos, limites de Atterberg (com e sem cal), e demais características (índice de vazios, densidade, etc). Os solos são ainda classificados de acordo com os sistemas TRB, SUCS e a metodologia MCT.

**Capítulo 5** – Propriedades Químicas, Mineralógicas e Características Estruturais dos solos. Neste capítulo serão apresentadas as propriedades químicas e a mineralogia dos solos, seguidas, de análises microscópicas óticas e de varredura realizadas nas amostras de solo indeformado e compactado (com e sem estabilização química).

**Capítulo 6** – Curvas de Compactação, em que constarão as curvas de mini-compactação obtidas para todos os solos na condição com e sem estabilização, tendo sido determinadas estas curvas para as energias proctor normal (PN) e proctor intermediário (PI).

**Capítulo 7** – Curvas Características. Neste capítulo serão apresentadas curvas características determinadas para as amostras indeformadas e compactadas (considerando as energias PN e PI) com e sem estabilização química.

**Capítulo 8** – Resistência dos solos compactados, obtida através do mini-CBR. As determinações de resistência tendo sido realizadas considerando variações de teor de cal, energia e umidade de compactação.

**Capítulo 9** – Resistência à Compressão Simples, onde será avaliado o parâmetro de reatividade de Thompson e a variação da resistência para diferentes períodos de tempo.

**Capítulo 10** – Perda de Massa por Imersão, determinada para corpos de prova compactados nas energias PN e PI, considerando solo natural e estabilizado.

**Capítulo 11** – Ensaio de Capilaridade ou Absorção. Este ensaio objetivou verificar o efeito da estabilização com cal, na capacidade de absorção total de umidade e ainda, como esta absorção se dá ao longo do tempo.

**Capítulo 12** – Conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Atualmente, na grande maioria dos projetos geotécnicos em regiões tropicais, os perfis de solos situam-se acima da zona vadosa, ou seja, os solos encontram-se na condição não saturada. Visando a utilização destes solos como materiais de construção na condição compactada, torna-se muito importante entender o comportamento mecânico destes materiais não saturados após a compactação.

Tal conhecimento é aplicável ao projeto, construção e manutenção de pavimentos, que freqüentemente são submetidos a variações de umidade no solo e, portanto, a modificações de comportamento geotécnico ao longo de sua vida útil. Neste contexto, esta tese pretende desenvolver um estudo experimental visando à determinação do comportamento mecânico de 13 solos finos compactados, com vistas a sua aplicabilidade na construção rodoviária.

### **2.1 – SOLOS LATERÍTICOS**

De acordo com o DER-SP (1971) define-se como solo laterítico, o material cuja fração coloidal (abaixo de 2 micra) apresenta relação molecular sílica/sesquióxidos menor que 2 e, em conjunto a presença apreciável de sesquióxido de ferro, tendência para o concrecionamento e endurecimento sob exposição ao sol, baixa expansibilidade e baixo teor de matéria orgânica.

Casanova (1987) complementa a definição anterior dando um enfoque mais detalhado quanto à mineralogia deste tipo de solo. O autor observa que: “Um solo dito tropical tem a sua mineralogia restrita a argilominerais do tipo (1:1) e óxidos livres, além de sílica livre na forma de quartzo, podendo ocorrer pequena quantidade de material paracrystalino. Todos esses minerais compartilham o fato de serem minerais cuja carga superficial é variável e dependente do pH. Como um todo, apresentam baixos valores para a superfície específica, a capacidade de troca catiônica e densidade superficial da carga”.

Vaughan (1985), no entanto, define os solos tropicais como produtos resultantes essencialmente da intemperização física e química de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, devido às mudanças nas condições climáticas.

De uma forma geral, em um perfil de solo tropical são normalmente encontrados dois tipos de solo, o laterítico e o saprolítico. O primeiro, residual ou não, intemperizado e rico em minerais de argila e sesquióxidos formando a camada superficial. O saprolítico, localizado na camada mais profunda, mantém a estrutura da rocha de origem. Várias classificações foram

propostas com o objetivo de agrupar os diferentes tipos de lateritas. Algumas se basearam na porcentagem de sesquióxidos, outras nas propriedades químicas e mineralógicas e, algumas nos aspectos físico-morfológicos (Rezende, 1999).

Segundo Nogami *et al* (1996), os solos lateríticos constituem a parte mais superficial do subsolo em áreas bem drenadas (acima do lençol freático, indicando a ausência de cursos d'água permanentes). Estes solos se destacam no perfil, devido a sua uniformidade e coloração característica: vermelha, alaranjada ou amarela. Formam um capeamento recobrendo as demais camadas de solos; e possuem aspecto uniforme não se percebendo, manchas, listras, camadas e xistosidades.

Ainda segundo os autores, estes solos apresentam constituição mineralógica caracterizada, principalmente, pela presença de reduzido número de minerais resistentes ao intemperismo tropical. Sua fração de areia sendo constituída de quartzo e outros minerais resistentes tanto às intempéries como mecanicamente, como a magnetita, a ilmenita, a turmalina e o zircão. Quanto à fração pedregulho, podem ocorrer quantidades variadas de concreções ferruginosas ou aluminosas, conhecidas como lateritas, que apresentam resistência mecânica inferior aos minerais referidos anteriormente. A fração argila, no entanto, é constituída de argilo-minerais da família da caulinita e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. Estes óxidos envolvem os argilo-minerais, resultando uma microfábrica esponjosa ou de “pipoca”, muito característica.

Devido à cimentação existente entre os elementos que compõe esta microestrutura (diâmetro inferior a 2 microns), a granulometria resultante dos ensaios padronizados pode acusar elevada porcentagem de grãos maiores nas frações silte e areia, devido à presença de torrões.

Segundo Fookes (1997) *apud* Cardoso (2002) ao contrário dos solos de regiões temperadas, os solos residuais tropicais lateríticos sofrem um intemperismo tão intenso que quase nunca apresentam as mesmas características dos materiais de origem. Nestas regiões, o intemperismo atinge grandes profundidades. Além disto, estes solos incluem a incorporação de húmus (proveniente da decomposição da vegetação), a lixiviação de materiais insolúveis, o carreamento de partículas finas, as perturbações por penetração de raízes, as escavações realizadas por animais e a dessecação. Agindo individualmente ou conjuntamente, estes fatores produzem uma sucessão de horizontes mais ou menos distintos, aproximadamente paralelos à superfície. Quimicamente, os óxidos de ferro e alumínio liberados pelo intemperismo tropical na subsuperfície não são dissolvidos tanto quanto acontece em ambientes mais ácidos (típicos de regiões temperadas) e, por conseguinte, os mesmos tendem

a permanecer *in situ*. O óxido de ferro é cristalizado como hematita na época seca e como goethita em um ambiente constantemente úmido. A gibbsita será o principal óxido de alumínio formado, resultando num solo de cores predominantemente vermelhas (hematita) ou amarelas (goethita).

Quanto aos solos saprolíticos, estes constituem predominantemente a parte subjacente da camada de solos lateríticos. Localizam-se em terrenos bem drenados (sem nível freático emergente). São predominantemente heterogêneos (manchados, listrados ou xistosos) e apresenta freqüentemente camadas de formas complexas, presença de matacões, dobras e camadas inclinadas. Originam-se pela decomposição de rocha matriz, sendo, portanto, genuinamente residual e assim, herdando a sua estrutura, além de desenvolver outras feições decorrentes da heterogeneidade de atuação do processo de intemperismo. Apresentam cores variadas, tais como: branco, preto, azul, verde, roxo, róseo, amarelo, vermelho e variegado.

Ao contrário dos solos lateríticos, sua composição mineralógica é variada, podendo ser simples ou extremamente complexa, dependendo do tipo de rocha matriz e do seu grau de intemperização. No entanto é bastante típica a ocorrência de mineralogia complexa em todas as suas frações granulométricas. Na fração areia, podem ocorrer minerais não estáveis, mica e feldspatos, ao intemperismo tropical e, na fração argila, minerais expansivos da família da illita e da montmorillonita. Estes minerais geralmente se encontram sob a forma de cristais ou pacotes de cristais isolados. Na fração silte, no entanto, destacam-se entre seus componentes os argilo-minerais especialmente sob a forma de “sanfonas” de caulinita, as micas, o quartzo, a magnetita e a ilmenita, por exemplo.

Os solos lateríticos mais típicos pertencem à classe dos latossolos (segundo terminologia adotada pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo). Porém, em termos de comportamento geotécnico, tem-se incluído outros solos de outras classes pedológicas no grupo dos de comportamento laterítico (L), como é o caso de muitos solos podzólicos e algumas areias quartzosas (Godoy *et al.*, 1996).

Segundo Queiroz de Carvalho (1987), os solos lateríticos, como resultado do processo de laterização, são largamente dependentes dos seus constituintes finos, tidos como constituintes ativos, isto é, constituintes amorfos e constituintes da fração tamanho argila. Estes constituintes ativos são normalmente cimentados pelos óxidos de ferro e/ ou alumínio, passando assim, a desempenhar um papel essencial quanto ao comportamento geotécnico destes solos. Godoy & Bernucci (2000), complementam observando que, a principal peculiaridade dos solos tropicais lateríticos (que os diferencia dos solos de clima temperado),

é justamente a presença desta cimentação natural causada pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

De acordo com a análise da microestrutura de solos lateríticos em duas regiões do Brasil (PB e PA), Queiroz de Carvalho (1987) também observou que, a composição mineralógica destes solos apresenta argilomineral do tipo haloisita, e uma estrutura concrecionária com cimentação/agregação das partículas finas por sesquióxidos de ferro e/ou alumínio. Comprovou então, que estes possuem um alto grau de cimentação devido quase que exclusivamente ao óxido de ferro/alumínio hidratado. No entanto, Cardoso (1995), estudando solos lateríticos do Distrito Federal, observou microestruturas em que os solos apresentaram níveis de cimentação por óxidos de ferro e alumínio bastante baixos.

Resultados de medidas de sucção, porosimetria e estudos químicos e mineralógicos em solos lateríticos na região de Minas Gerais, sugerem que em estado não saturado, uma grande porção das partículas argilosas são mantidas juntas por forças de capilaridade, adsorção e interpartículas (Galvão *et al.*, 1997).

De acordo com Santana & Gontijo (1987) observa-se em solos de comportamento lateríticos as seguintes características bastante peculiares: i) pequena fração de areia grossa entre as peneiras nº 10 e nº 40; ii) possibilidade de ocorrência de elevados teores de finos, mais de 25% passando na peneira nº 200, com elevados valores de LL e IP, maiores que 25 e 8, respectivamente, embora com CBRs elevados; iii) dificuldade em enquadrá-los nas especificações granulométricas da AASHTO, similarmente ao que ocorre em relação aos limites de  $LL \leq 25\%$  e  $IP \leq 6\%$ ; iv) encontra-se com pouca frequência a relação  $kr$  (sílica/sesquióxidos)  $> 2$ ; v) expansão baixa e; vi) minerais argílicos do tipo caulinita, às vezes com traços de illita, mas nunca de montmorilonita.

Gidigas (1976) *apud* Rezende (1999), estudou grãos finos lateríticos e não lateríticos que sofreram processo de lixiviação e laterização em vários graus de intensidade, diferenciadas pelas condições climáticas, vegetação, topografia, condições de drenagem e tipos de rocha de origem. Este autor confirmou que a relação entre o teor de argila e as características geotécnicas de um solo é governada pelo grau de lixiviação e laterização a que são submetidos e também pela mineralogia da argila.

Segundo Melfi (1994), a relação existente entre as propriedades mecânicas dos materiais, sua composição mineralógica e organização interna (estado de cristalização dos minerais secundários, sistema poral, estado físico-químico da fração argila, composição mineralógica da fração argila a arranjo microestrutural dos constituintes dos solos e das lateritas) é marcante. Sendo assim, torna-se cada vez mais importante o estudo microscópico

das lateritas (amostras indeformadas), que além de estabelecer as relações entre as fases minerais presentes e sua organização, possibilita a compreensão de solos com índices geotécnicos semelhantes apresentarem comportamento mecânico distinto. Observa-se então que, as condições climáticas em que os solos são formados, assim como aos diferentes graus de intemperização a que são submetidos, têm influência marcante no seu comportamento do ponto de vista da engenharia.

As propriedades índices tradicionais não permitem identificar diretamente os solos de comportamento laterítico, pois solos possuidores de idênticos índices podem apresentar propriedades mecânicas e hidráulicas, tanto em estado natural como compactado, bem diferentes, conforme se tenha comportamento laterítico ou não (Nogami & Villibor, 1995).

De acordo com Godoy & Bernucci (2000), na engenharia, os solos lateríticos são aqueles que quando devidamente compactados, ao perderem umidade, adquirem condição de baixa perda de resistência ou até nenhuma perda, mesmo na presença de água. Por outro lado, no estado natural, quanto maior o grau de laterização menor a sua susceptibilidade à erosão, além de serem altamente permeáveis, possuem baixa capacidade de suporte, elevada deformabilidade, excelentes condições de drenagem e possibilidade de colapso quando submetido a determinadas cargas e molhagem (Nogami *et al.*, 1993).

Nogami & Villibor (1995) constataram a relevância da definição apresentada por Godoy, além de detalharem o comportamento dos mesmos quando compactados. Os autores observaram que estes solos se caracterizam pelo ramo seco da curva de compactação muito inclinada, elevado grau de saturação quando compactados na densidade máxima, valores de suporte elevados, baixa perda de suporte por imersão, baixa permeabilidade, lento deslocamento da frente de umidade, baixa perda de massa por imersão, baixa expansibilidade quando em contato com água livre, contração apreciável por perda de umidade e possibilidade de elevado módulo de resiliência.

Vasconcelos Costa & Lucena (1987), após a realização de estudos em laboratório visando definir a influência do desvio de umidade na resistência dos solos lateríticos compactados após a saturação, concluíram que, ocorrendo desvios de umidade em relação à ótima, superiores a 0,5% no lado úmido e 1% no lado seco, alterariam-se substancialmente os valores de resistência, em termos de CBR, dos solos lateríticos ensaiados após quatro dias de imersão. No entanto, ao se avaliar as resistências à penetração obtidas para os diferentes tipos de solos estudados, verificou-se que dependendo do tipo de solo e da energia de compactação, a variação de umidade de compactação de até 2% em torno da ótima não conduz a diferenças tão significativas em termos de mini-CBR.

O comportamento resiliente destes solos, segundo dados publicados pela COPPE (Medina e Motta, 1988) é bastante variado, obedecendo a quatro modelos diferentes. Cabe destacar que valores muito elevados de módulo resiliente foram encontrados nas camadas lateríticas compactadas, mesmo as de natureza eminentemente argilosa (grupo LG'). Verificou-se, portanto que, os solos lateríticos têm seu comportamento extremamente influenciado pela gênese, composição química e mineralógica, grau de intemperização e condições ambientais.

### 2.1.1 – Perfis de Intemperismo

O solo, dependendo dos objetivos e enfoques científicos, tem sido interpretado de maneira diversa: produto do intemperismo físico e químico das rochas (geologia); material escavável, que perde sua resistência quando em contato com a água (engenharia civil); camada superficial de terra arável, possuidora de vida microbiana (agronomia) (Salomão & Antunes, 1998 *apud* Cardoso, 2002). Desta forma, de acordo com os diferentes campos do conhecimento científico e tecnológico, existem várias classificações e terminologias para os perfis de solo.

Os perfis de solos tropicais mais conhecidos quase sempre apresentam uma zonalidade vertical possível de ser identificada no próprio campo, sendo assim nitidamente estruturados em horizontes. À medida que se transforma em solo, o material de origem vai se diferenciando em camadas mais ou menos paralelas à superfície, camadas essas denominadas horizontes. A quantidade de horizontes e o nível de diferenciação dependem do grau de evolução do perfil e também do tipo litológico da rocha-mãe (Vieira, 1988).

Martins (2000) *apud* Cardoso (2002), a partir de vários trabalhos, define uma nova proposta de classificação para um perfil de solo tropical laterizado completo. As características dos horizontes são descritas a seguir, do topo para a base (Figura 2.1A):

- **Solum e Pedon** (espessura entre 0 e 15 m) - Material superior do perfil e que pode ser residual ou não. Caracteriza-se por ser inconsolidado e apresentar estruturas formadas pela intensa atividade biológica, individualizando os horizontes A e B da classificação morfo-genética de solos. Designado como *solum*, quando observado em nível de perfil, e de *pedon*, quando caracterizado em três dimensões.
- **Horizontes Ferruginosos** - Envolvem um ou mais horizontes, diferenciados pelo grau de endurecimento de feições pedológicas resultantes do enriquecimento de oxi-hidróxidos de Fe e subsidiariamente de Al. Constituem horizontes ferruginosos:

⇒ **Cascalho laterítico** (espessura até 5 m) - horizonte formado pela degradação de outros horizontes ferruginosos, enriquecidos em feições pedológicas endurecidas e soltas.

⇒ **Couraça ou duricrosta** (espessura até 5 m) - enriquecido em oxi-hidróxidos de Fe e Al, geralmente na forma de feições pedológicas endurecidas (nódulos, incrustações, concreções etc.). Constitui um horizonte de acumulação, relativa e/ou absoluta, de Fe e Al. A acumulação relativa é causada pela lixiviação seletiva da sílica e bases. A acumulação absoluta deve-se à concentração de Fe mobilizado de outros horizontes.

⇒ **Carapaça** (espessura entre 0 e 5 m) - caracteriza-se por ser transicional entre o horizonte de couraça e a zona mosqueada. Apresenta características físicas e químicas intermediárias entre estes dois horizontes. Os nódulos apresentam-se em diferenciados graus de endurecimento, sendo que a matriz internodular é geralmente friável.

⇒ **Zona mosqueada ou horizonte mosqueado** (espessura até 5 m) - horizonte com a presença de concentrações de oxi-hidróxidos de Fe, através da floculação de colóides na forma de mosqueados avermelhados no interior de uma matriz típica do saprólito. Os materiais deste horizonte são normalmente friáveis, mas podem endurecer irreversivelmente se forem colocados em condições secas. É um horizonte mal drenado. Pode ser considerado o horizonte intermediário entre o saprólito e os horizontes superiores.

- **Saprólito** (espessura entre 1 e 100 m) - Pode ser subdividido em saprólito fino ou argiloso e saprólito grosso ou arenoso, apesar desta terminologia não representar a textura real do material. O saprólito fino ocorre acima do saprólito grosso e apresenta-se enriquecido em argilo-minerais do tipo 1:1, enquanto o saprólito grosso pode apresentar argilo-minerais do tipo 2:1. No saprólito ocorrem processos de lixiviação, com retirada de sílica do sistema, produto da hidrólise de silicatos, e geração de argilo-minerais. O Fe é translocado para outros horizontes, ou retirado do perfil, induzindo o aspecto pálido típico desse horizonte. O saprólito fino também é designado de zona pálida, por sua cor geralmente branca a creme, em função do empobrecimento em Fe. O saprólito grosso caracteriza-se por apresentar porções preservadas da rocha-mãe; posiciona-se próximo ao contato com a rocha-mãe ou com o *saprock*, definido abaixo.

- **Saprock** - Em geral, ocorre uma transição entre a rocha-mãe e o saprólito, por meio de fragmentos de rocha fresca imersos em matriz intemperizada. Essas características indicam um intemperismo diferencial em função da organização dos materiais (estrutura, textura e trama) e da composição mineralógica. O limite de diferenciação entre essa transição e o saprólito grosso é tênue. Pode ser definida empregando a proporção entre o material fresco e o

intemperizado, ou seja, se o primeiro domina sobre o segundo, caracteriza-se o *saprock*, e o inverso, o saprólito grosso.

- **Rocha-mãe ou Protólito** - Caracterizada pela ausência de feições de intemperismo.

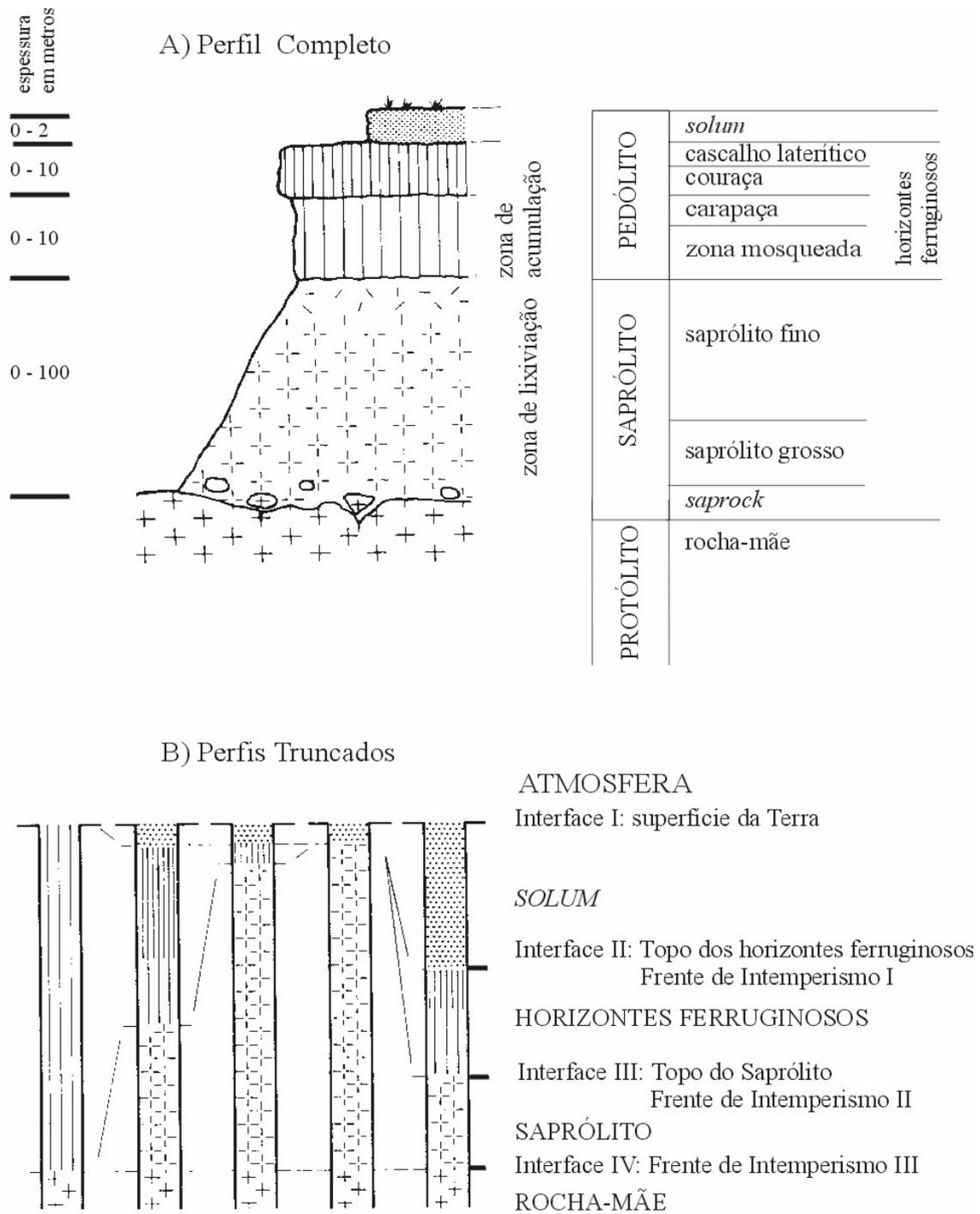


Figura 2.1 - Perfis Lateríticos. A) Esquema do Perfil Completo; B) Diagrama ilustrando Perfis Reduzidos e Truncados (Martins, 2000 *apud* Cardoso, 2002).

Esta descrição corresponde a um perfil completo e raramente são observados todos os horizontes num mesmo perfil, ou mesmo em topossequência. Os perfis geralmente são truncados, apresentando a predominância de um ou mais horizontes (Figura 2.1B).

Os estudos pedológicos concentram-se na parte superficial do perfil de solo, onde é mais evidente a atuação de fatores pedogenéticos, sendo os horizontes distinguidos por letras maiúsculas, onde os principais são denominados: O, A, B, C e R. Estes horizontes podem ainda ser subdivididos, colocando-se números arábicos após as letras maiúsculas, como por exemplo: A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>2</sub> e C<sub>1</sub>, onde normalmente os números 1 e 3 traduzem a transição entre os horizontes, e o número 2 representa a máxima expressão da característica típica do horizonte (Figura 2.2). Segundo Cardoso (2002) esta descrição de um perfil é conhecida como classificação morfo-genética dos solos e foi desenvolvida por Dokuchaev (1883). As características principais destes horizontes são resumidamente descritas a seguir:

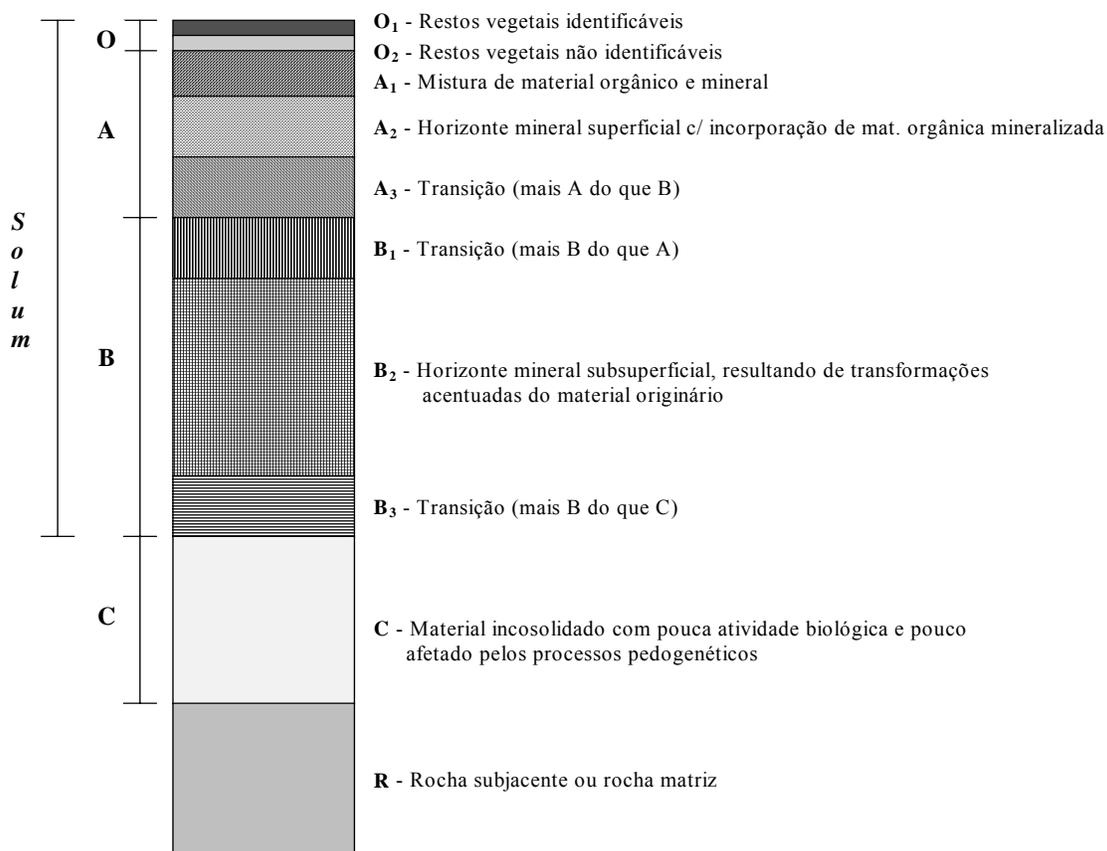


Figura 2.2 - Perfil Hipotético de um Solo onde são vistos os Principais Horizontes e Subhorizontes (Vieira & Vieira, 1983 *apud* Cardoso, 2002).

- **Horizonte O** - horizonte orgânico superficial constituído por detritos vegetais e substâncias húmicas acumuladas na superfície, em ambientes onde não há impedimento à drenagem. Ocorre, em geral, em áreas de florestas, distinguindo-se do horizonte mineral subjacente, pela coloração mais escura, e pelo conteúdo em matéria orgânica. O mínimo de matéria orgânica é de 20%.
- **Horizonte A** - horizonte mineral superficial ou subjacente ao Horizonte O, com a incorporação de matéria orgânica mineralizada. É o horizonte de maior atividade biológica, apresentando coloração escurecida pela presença de matéria orgânica. Existem vários tipos de Horizonte A, dependendo dos ambientes em que são formados, uns mais pobres em matéria orgânica e outros com maiores teores de compostos orgânicos.
- **Horizonte B** - horizonte mineral subsuperficial situado abaixo do Horizonte A. É considerado o horizonte mais importante na diferenciação das classes de solo, resultando de transformações relativamente acentuadas do material originário e/ou ganho de constituintes minerais e/ou orgânicos migrados de outros horizontes. Em perfis de solos lateríticos, normalmente sob o contato entre os horizontes B e C, podem ser encontrados os horizontes diagnósticos Plíntico e/ou Litoplíntico.
- **Horizonte C** - horizonte mineral, relativamente pouco afetado pelos processos pedogenéticos mais superficiais, formado a partir da decomposição do substrato rochoso, não apresentando características diagnósticas dos horizontes A e B. Em perfis de solos lateríticos, normalmente junto ao contato com o horizonte B, pode ser encontrado o horizonte diagnóstico Glei.
- **Horizonte R** - camada correspondente ao substrato rochoso.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, cuja última reformulação ocorreu em 1999, tem, como uma das características, a utilização principalmente do Horizonte B como atributo distintivo, ou seja, horizonte diagnóstico (Camargo *et al.*, 1987 *apud* Cardoso, 2002). As características dos principais horizontes diagnósticos deste sistema nos solos encontrados no Brasil e Distrito Federal são resumidos a seguir:

- **Horizonte B latossólico (Bw)** - horizonte com pelo menos 50 cm de espessura, que apresenta alto grau de intemperismo químico. É constituído por quantidades variáveis de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, argilo-minerais 1:1, quartzo e outros minerais mais resistentes ao intemperismo. Tem baixa CTC (< 17 cmol<sub>c</sub>/kg) e baixa relação silte/argila (< 0,7).

Apresenta-se geralmente, em solos profundos, friáveis, e com grande proporção de macroporos. A Ordem de solo associada a este horizonte diagnóstico é a dos Latossolos e de forma secundária ocorre em Plintossolos.

- **Horizonte B textural (Bt)** - horizonte com incremento da fração argilosa por processos de iluviação. Razão da proporção da fração argila ( $B/A \geq 1,5$ ), se o horizonte A tem argila > 40% de argila; 1,7, se tem de 15 a 40% de argila; 1,8, se tem < 15% de argila. Quando o horizonte B apresenta estrutura em blocos ou prismática com cerosidade associada, que exceda de pouca a fraca, o gradiente textural supracitado não é requerido. Os solos associados a este horizonte diagnóstico são todos subordens pertencentes aos Argissolos e a maioria dos Luvissolos, Chernossolos e Alissolos. Estas Ordens são representadas no antigo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos pelos solos Podzólico Vermelho-Escuro, Podzólico Vermelho-Amarelo, Terra Roxa Estruturada, Terra Bruna Estruturada, Podzólico Bruno-acinzentado, Brunizem, Brunizem A avermelhado e Bruno Não Cálcico.

- **Horizonte B incipiente ou câmbico (Bi)** - horizonte com pequena espessura, raramente superior a 1 metro. Apresenta baixo grau de intemperismo químico, porém suficiente para o desenvolvimento de cor e/ou de estrutura (alguns podem ser maciços), dominando estruturas pedológicas. Apresenta minerais primários facilmente intemperizáveis ou argila mais ativa, ou teores mais elevados de silte. A Ordem de solo associada a este horizonte diagnóstico é a dos Cambissolos, contudo pode ocorrer em alguns subgrupos pertencentes aos Chernossolos e Gleissolos, e de forma secundária em Plintossolos.

- **Horizonte plíntico** - horizonte mineral B ( $B_f$ ) e/ou C com 15 cm ou mais de espessura, formado por 15% ou mais por volume de plintita. Pode-se definir plintita como uma formação constituída da mistura argila, pobre em húmus e rica em Fe e Al, com quartzo e outros minerais. No solo ocorre comumente sob um arranjo de cores variegadas (vermelhas e acinzentadas ou brancas, com ou sem cores amareladas ou brunadas), com padrões usualmente laminares, reticulados ou poligonais. Este material consolida-se irreversivelmente quando submetido a ciclos alternados de hidratação e desidratação, resultando na produção de material concrecionário neoformado, denominado petroplintita. Quando isto ocorre, este deixa de ser horizonte diagnóstico plíntico e passa a ser um horizonte com caráter petroplíntico. Os solos associados a este horizonte diagnóstico são todas as classes pertencentes aos Plintossolos, Entretanto este horizonte também pode estar presente secundariamente em alguns subgrupos de Latossolos, Argissolos, Alissolos, Luvissolos, Gleissolos e Cambissolos. A atual Ordem dos Plintossolos é representada pelas Lateritas Hidromórficas, parte dos

Podzólicos Plínticos, parte dos Gleis Húmicos e Gleis Pouco Húmicos Plínticos e alguns dos possíveis Latossolos Plínticos.

- **Horizonte litoplíntico** - é uma camada consolidada contínua ou praticamente contínua, endurecida por Fe e/ou Al, na qual a matéria orgânica está ausente. Este horizonte pode englobar uma camada muito fraturada, mas normalmente pode existir um predomínio de blocos com dimensões mínimas de 20 cm. Os solos associados a este horizonte diagnóstico são os mesmos referentes ao horizonte plíntico.
- **Horizonte glei** - é um horizonte subsuperficial ou eventualmente superficial, com espessura mínima de 15 cm, caracterizado pela intensa redução de Fe e formado sob condições de excesso de água, o que lhe confere cores neutras ou próximas a neutra na matiz do solo, com ou sem mosqueamentos. É um horizonte fortemente influenciado pelo lençol freático e regime de umidade redutor, virtualmente livre de oxigênio dissolvido em razão da saturação por água durante todo ano, ou longo período. O horizonte sendo saturado periodicamente, deve apresentar mosqueamentos, de cromas altos concernentes a cores amareladas ou avermelhadas, resultantes de segregação de Fe. Apresenta menos de 15% de plintita. Ele pode ser um horizonte C, B (B<sub>g</sub>) ou mais raramente A. Este é o horizonte diagnóstico na Ordem dos Gleissolos, onde deve começar dentro dos 50 cm da superfície do solo. Pode existir em alguns subgrupos de Latossolos, Argissolos, Alissolos, Luvisolos e Cambissolos.

Com base nas diferentes classificações dos solos, Cardoso (2002) apresentou uma nova classificação dos perfis lateríticos, esta apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Correlações entre as diferentes classificações de perfis lateríticos completos.

| Maiores Subdivisões      | Nova Proposta Cardoso (2002) | Martins (2000)              | Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (1999)         | Pastore (1995)  |     |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|-----|
| Pedólito<br>(0 a 30 m)   | Horizonte <u>Q</u>           | <i>Solum</i>                | Horizonte <u>Q</u>  | Solo orgânico   |     |
|                          | Horizonte <u>A</u>           |                             | Horizonte <u>A</u>  |   |     |
|                          | Horizonte <u>B</u>           |                             | Horizonte <u>B</u>  | Horizonte laterítico  |     |
|                          | Cascalho laterítico          |                             | Cascalho laterítico   | Horizonte <u>B</u> com caráter petroplíntico  | ??? |
|                          | Couraça ferruginosa          |                             | Couraça ferruginosa   | Horizonte <u>B</u>  |     |
|                          | Carapaça                     |                             | Carapaça  | litoplíntico ou similar a litoplíntico  |     |
|                          | Zona Mosqueada               |                             | Zona Mosqueada  | Horizontes <u>C</u> plíntico ou similar a plíntico, ou glei com mosqueamentos ou similar a glei |     |
| Saprólito<br>(0 a 100 m) | Saprólito fino ou argiloso   | Saprólito fino ou argiloso  | Horizonte <u>C</u> glei sem mosqueamentos ou similar a glei | Solo saprolítico  |     |
|                          | Saprólito ou saprólito       | Saprólito grosso ou arenoso | Horizonte <u>C</u>  | Saprólito   |     |
|                          | Rocha muito alterada         | <i>Saprock</i>              | Horizonte <u>R</u>  | Rocha muito alterada  |     |
|                          | Rocha alterada               |                             |   | Rocha alterada  |     |
| Protólito                | Rocha sã                     | Rocha-mãe                   |   | Rocha sã  |     |

## 2.1.2 – Aspectos Químicos dos Solos Lateríticos

Segundo Vieira (1988), os tipos de reações que acarretam as alterações químicas no ambiente superficial são: hidratação-desidratação, oxidação-redução, dissolução-precipitação, carbonatação-descarbonatação, hidrólise e queluviação.

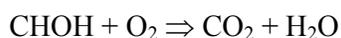
Entre estas reações químicas, as principais identificadas nos solos brasileiros são: a hidrólise e a queluviação.

### 2.1.2.1 - Hidrólise

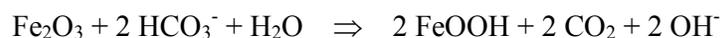
No Brasil, o mecanismo essencial de alteração superficial das rochas é a hidrólise (Melfi & Pedro, 1977). Esta reação química se dá pela quebra da ligação entre os íons dos minerais pela ação dos íons  $H^+$  e  $OH^-$  da água. Os prótons  $H^+$  e íons  $OH^-$ , cátions e ácido silícico são colocados em solução, podendo ser formados produtos secundários.

Ainda segundo os autores, as soluções de alteração que ocorrem nos meios tropicais são caracterizadas por uma certa carga em  $CO_2$ , devido à rápida degradação da matéria orgânica, que confere a estas soluções características levemente ácidas (pH 5,5 a 6,0).

Tardy (1993) *apud* Cardoso (2002) admite que boa parte do  $CO_2$  dissolvido nas águas percolantes proveniente da mineralização da matéria orgânica provém da seguinte reação:



Este  $CO_2$  dissolvido na água como  $HCO_3^-$  participa das reações de hidrólise dos minerais, como por exemplo:



Hematita

Goethita



Caulinita

Gibbsita

Este pH resultante da degradação da matéria orgânica é um parâmetro de fundamental importância para a alteração, pelo fato de controlar de forma específica o comportamento dos principais elementos constituintes dos minerais formadores das rochas (alumínio, silício, ferro, alcalinos e alcalino-terrosos). Assim, nestas condições de pH, o alumínio e o ferro são praticamente insolúveis, acumulando-se na forma de óxidos e hidróxidos. Os elementos

alcalinos e alcalino-terrosos são, na maioria das vezes, totalmente lixiviados, enquanto que a sílica também é mobilizada, porém com velocidade mais baixa do que os alcalinos. Porém, a hidrólise pode ser mais ou menos completa, de acordo com as condições termodinâmicas reinantes, e, com isso, o grau de eliminação dos elementos químicos, caracteriza os diferentes tipos de hidrólise:

- **Hidrólise total** - ocorre quando toda a sílica e bases são eliminadas, enquanto o  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , ao contrário, acumula-se *in situ* e se individualiza em forma de hidróxidos de alumínio do tipo gibbsita. A formação da gibbsita corresponde a um processo de alteração bem definido, denominado Alitização.
- **Hidrólise parcial** - ocorre onde uma parte da sílica liberada do mineral primário reage com o alumínio para formar “sais básicos” insolúveis que são hidroxissilicatos aluminosos (argilas). É o processo denominado Sialitização, onde a dessilicatação do meio é incompleta, porém a eliminação dos cátions básicos pode ser mais ou menos elevada. Quando é importante (quase-total), individualiza-se argilo-mineral com estrutura 1:1 do tipo caulinita, e este é conhecido como Monossialitização (Vieira, 1988). No entanto, se a eliminação de cátions básicos é parcial, ocorre à gênese de argilo-minerais com estrutura 2:1 do tipo esmectita, cuja carga das camadas é compensada pela presença de íons em posições interfoliares. Neste caso, tem-se a Bissialitização.

#### **2.1.2.2 - Queluviação**

Segundo Carvalho (1995), a queluviação é o processo em que os elementos metálicos, de maneira especial o alumínio e o ferro-férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), são móveis em relação à sílica que, neste tipo de intemperismo, tende a se concentrar no perfil de alteração. A saída do perfil de alteração de elementos metálicos dá-se principalmente sob a forma de quelatos (complexos orgânicos). Tem-se categorizados dois mecanismos de queluviação que são conhecidos como queluviação total e queluviação parcial.

- **Queluviação total** - ocorre com a total saída de bases e do alumínio. A alteração requer condições de acidez relativamente alta, na qual a atividade de  $\text{H}^+$  na solução reagente e percolante tende ser maior que a concentração molar do  $\text{Al}^{3+}$  a ser liberado. O material residual será um produto silicoso.
- **Queluviação parcial** - além da permanência da sílica, existe uma retenção parcial do alumínio e mesmo de algumas bases, tais como o K e o Mg. A solução percolante não é tão

ácida como no caso precedente, de forma que a concentração molar do  $Al^{3+}$  liberado pode ser igual ou maior a atividade do  $H^+$  dessa solução. Como há uma retenção parcial de Al, temos, pela sua redistribuição no perfil, a formação de argilominerais 2:1 ou do grupo das esmectitas e o processo chama-se Aluminossilificação.

### **2.1.3 - Características Geotécnicas dos Solos Lateríticos do Distrito Federal**

Os solos de um modo geral apresentam características próprias, herdadas ou adquiridas, resultantes de fatores tais como: rocha matriz, clima, relevo, tempo e ação química e biológica acrescidos das ações antrópicas. No distrito Federal, como em outras regiões tropicais, através dos diversos processos ocorridos desde sua gênese, o solo apresenta propriedades, estruturas e comportamentos hidráulicos e mecânico peculiares (Guimarães *et al.*, 1997).

Os solos do Distrito Federal representam bem os solos da região do cerrado, como comprovado por Melfi & Pedro (1977), através da verificação da abundância de gibbsita, nos solos do DF. Este fenômeno foi também constatado por Martins (1998) *apud* Cardoso (2002), que caracterizou as camadas mais superficiais da região por sofrerem essencialmente o processo de alitização, em áreas com solos bem drenados. De acordo com o autor, em regiões de solos mal drenados ocorre a ressilificação da gibbsita para caulinita.

Observa-se que a laterização controla basicamente toda a formação dos solos de Brasília e, segundo Martins (1998) *apud* Cardoso (2002), tanto as reações de hidrólise, como queluviação parcial agem conjuntamente para esta formação.

O manto superficial dos perfis de solo característicos do DF são geralmente constituídos de um material poroso, seja residual ou transportado. Sua espessura varia de centímetros a dezenas de metros. Estes solos foram submetidos ao processo de laterização caracterizando-se pela predominância de argilominerais do tipo caulinita e presença de óxidos de ferro e alumínio e hidróxido de alumínio (Gibbsita). A maioria das bases Ca, Mg, K, Na e  $SiO_2$  foram lixiviadas, restando materiais em estado avançado de intemperismo que apresentam uma estrutura porosa com partículas geralmente ligadas por pontes de argila (Paixão & Camapum de Carvalho, 1994; Cardoso, 1995 e Araki, 1997). O pH ácido desses solos (4,5 a 5) favorece a agregação existente no solo em seu estado natural. A estrutura porosa e as agregações que existem nestes solos conferem aos mesmos, elevada porosidade (apesar da matriz argilosa) e comportamento em termos de permeabilidade similar aos solos granulares finos ( $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  cm/s).

Cardoso (1995) observa que, devido à agregação das partículas de solo e a conseqüente geração de grandes vazios (associados aos contatos estruturais realizados através de pontes de argila), bem como, a inexpressiva ação da cimentação (devido ao pH ácido) e conseqüente dissolução e precipitação dos óxi-hidróxidos de ferro, ocorre à existência de elevados potenciais de colapso. Paixão & Camapum de Carvalho (1994) correlacionam o colapso à camada de “argila porosa”.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (1993), a “argila porosa” é constituída por argilas, siltes e areias combinadas em diferentes proporções dependendo do domínio geológico local, apresentando geralmente as seguintes características:

- SPT inferior a 6 golpes;
- limite de liquidez entre 25 e 78%;
- limite de plasticidade entre 58 e 18%;
- índice de plasticidade entre 4 e 38%; e
- índice de Vazios entre 1,2 e 2,2.

Segundo Camapum de Carvalho & Leroueil (2000), a presença de agregações nos solos do DF, faz com que a textura argilosa verificada em ensaios granulométricos convencionais com o uso de defloculante não seja normalmente constatada no solo em estado natural. Estas agregações por sua vez se relacionando à presença de óxidos de ferro e alumínio e, sendo responsáveis pela geração de uma microestrutura importante para as propriedades e comportamento dos solos.

De acordo com Araki (1997) e Cardoso (1995), esta microestrutura é constituída por poros no interior das agregações normalmente distintos dos poros existentes entre elas. A estabilidade estrutural do solo estando então, diretamente ligada à natureza das ligações nas agregações e entre elas.

Araki (1997) realizando um estudo em perfil, sob a camada de “argila porosa” na região da Asa Sul, no Metrô de Brasília, verificou que, a gibbsita e os minerais paracrystalinos de Al são predominantes nos primeiros metros, e sofrem uma redução gradual em seus teores de acordo com a profundidade, o que também se reflete nos valores referentes de índice de vazios. Tal fenômeno sendo resultado do intemperismo químico mais intenso em condições mais superficiais.

Cardoso (1995) mostram a análise de um solo saprolítico colapsível, coletado sob os taludes do Metrô de Brasília. A descrição micromorfológica mostrou que uma parte

expressiva das frações argilosas encontravam-se sob a forma de agregados, e o índice de vazios era de 1,0, ou seja, elevado para um material com esta gênese. De modo semelhante à “argila porosa”, o solo saprolítico possui uma quantidade importante de gibbsita e Al em estado amorfo.

O solo estudado para fins de elaboração da presente tese encontra-se detalhado em termos de sua composição física, química e mineralógica nos Capítulos 4 e 5.

## **2.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS**

A dificuldade de localização de materiais granulares e a predominância dos solos de comportamento tropical contribuiu para o desenvolvimento de novos procedimentos laboratoriais que possibilitassem uma melhor caracterização dos solos tropicais. Os solos lateríticos têm constituído importante fonte de matéria-prima para a construção viária, devido a seu excelente comportamento estrutural, ao menor custo em relação aos outros tipos de matéria-prima e a sua abundância. São empregados na constituição de estruturas de pavimentos (reforço do subleito, sub-base e base), aterros, camadas de proteção de taludes, recuperação de áreas degradadas, camadas de proteção de bacias de decantação, *clay liners*, etc.

Como as propriedades índices tradicionais variam em função da estrutura dos solos, estas não se prestam para prever de forma apropriada o comportamento dos solos lateríticos em obras civis. Segundo Villibor (1981) ocorrem limitações nas avaliações referentes às propriedades dos solos tropicais, baseadas nas classificações TRB e SUCS, devido à dificuldade em se conseguir repetibilidade nos ensaios de limites de consistência. Tal fato sendo parcialmente ocasionado pela decomposição dos materiais primários, as partículas finas fortemente agregadas e a força de ligação variada nas concreções. O autor observou ainda que, as propriedades previstas nas classificações tradicionais conduzem geralmente a um comportamento inferior ao verificado na prática quando se trata dos solos lateríticos e, superior quando em solos saprolíticos (não lateríticos).

De acordo com Wesley & Irfan (1997) existem várias razões pelas quais os solos residuais tropicais necessitam de um sistema de classificação especial, pois suas características não estão devidamente cobertas pelos atuais métodos convencionais de classificação de solos. Entre estas razões podem ser citadas:

- a) a mineralogia distinta das argilas em alguns solos tropicais produz características que não são compatíveis com o grupo no qual se enquadram no Sistema Unificado de Classificação dos Solos. A composição mineralógica promove fenômenos de agregação que induzem à resultados enganosos de distribuição granulométrica;
- b) a massa de solo residual *in situ* pode apresentar uma seqüência de materiais que vai desde um solo propriamente dito até uma rocha branda, dependendo do grau de intemperismo, e que não pode ser adequadamente descrita usando os sistemas convencionais, baseados em solos transportados;
- c) os sistemas de classificação convencionais focalizam principalmente as propriedades do solo no estado deformado. Isto é diferente para os solos residuais, cujas propriedades são fortemente influenciadas pelas características estruturais *in situ*, herdadas da massa de solo original ou desenvolvidas como consequência do intemperismo. O próprio termo solo residual engloba toda a profundidade do perfil, incluindo mesmo alguns horizontes que se comportam mais como rocha que como solo.

No Brasil, a classificação proposta por Nogami & Vilibor (1981), denominada de Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), buscou solucionar as lacunas deixadas pelos demais métodos em relação aos solos residuais tropicais.

Após o desenvolvimento da metodologia MCT desenvolveram-se várias pesquisas objetivando verificar o comportamento dos solos lateríticos como material de construção rodoviária. Santana & Gontijo (1987) observaram que, o pavimento laterítico possui durabilidade aproximadamente duas vezes maior que o pavimento não laterítico. Tal fato foi verificado através dos maiores valores de módulo resiliente para o pavimento com base laterítica. Nota-se daí, a importância de se trabalhar com métodos de dimensionamento que levem em conta os módulos resilientes das diversas camadas que constituem a estrutura de um pavimento.

Nogami & Vilibor (1993) estudaram o desempenho destes solos como subleito, reforço de subleito, sub-base e base. Dentre as bases estudadas estavam às misturas estabilizadas granulometricamente, a argila laterítica, a argila laterítica + brita, argila laterítica + outros estabilizantes. Os autores verificaram que, os solos de comportamento laterítico dispensavam a estabilização granulométrica tradicional ou adição de estabilizantes químicos e, que, às misturas dos mesmos com material granular visava apenas a atender diferentes critérios daqueles considerados para as misturas bem-graduadas.

Tendo em vista facilitar sua utilização, os materiais lateríticos foram classificados em Concreções Ferruginosas (ou lateríticas) resistentes, Solos Finos de comportamento laterítico

e Solos Graúdos de comportamento laterítico. As Concreções Ferruginosas são passíveis de, por britagem, fornecerem agregados graúdos. Quanto aos solos finos podem ser usados como material para sub-bases e bases (exceto para tráfego pesado). Os solos graúdos além de usado como material (inclusive para tráfego pesado), podem ser usados como agregados graúdos em forma de pisólitos lateríticos, obtidos por lavagem e peneiramento, para camadas asfálticas (inclusive tratamentos superficiais) e de concreto de cimento portland (Santana & Gontijo, 1987).

Após vários estudos realizados observou-se que, a utilização de materiais locais, aliada à métodos apropriados de dimensionamento, propicia um pavimento de custo bem menor e de características técnicas iguais ou superiores ao pavimento obtido com materiais que concordem com as especificações granulométricas ortodoxas. Verificou-se que apenas a garantia da ausência de fadiga no concreto asfáltico, justifica a melhor qualidade técnica do chamado pavimento laterítico.

Outra classificação nacional, denominada de Tipologia de Solos Compactados, foi proposta por Maiolino (1985) e Cruz & Maiolino (1983 e 1985) *apud* Martínez (2003). Consiste numa descrição das características e resultados de ensaios comuns para quatro grupos de solos tropicais. A descrição relaciona itens como grau de intemperismo (e propriedades associadas), posição no perfil, rocha de origem, trabalhabilidade e outras. Logo, para ser efetivo, um sistema de classificação de solos residuais e residuais tropicais deve levar em consideração outros fatores adicionais em relação aos métodos convencionais de classificação, tais como grau de intemperismo, mineralogia, estrutura e clima.

## **2.2.1 – A Metodologia e a Classificação Geotécnica MCT**

### **2.2.1.1 - Metodologia MCT**

A metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) baseia-se no princípio que, os índices classificatórios tradicionais não podem ser aplicados diretamente aos solos tropicais. Surgindo a necessidade de desenvolver novos índices mais significativos, passou-se a efetuar ensaios mecânicos e hidráulicos simplificados, mais diretamente correlacionáveis com o comportamento dos solos tropicais.

Segundo Nogami & Villibor (1995), a miniaturização da aparelhagem utilizada, que corresponde à redução para 1/3 das dimensões lineares dos corpos de prova utilizados no procedimento tradicional, foi indispensável por motivos econômicos. Escolheu-se o diâmetro

de 50 mm para os corpos de prova e, adotou-se o procedimento de compactação desenvolvido em Iowa, segundo sugestão do Prof. Carlos Sousa Pinto.

Um dos passos mais importantes para o desenvolvimento de uma metodologia própria para solos tropicais foi à introdução do mini-CBR, devido a sua importância no projeto de pavimentos. Verificou-se, porém, que esse ensaio por si só, não era suficiente para a escolha dos melhores solos; assim, os ensaios de infiltrabilidade, permeabilidade, contração, penetração da pintura betuminosa e mini-CBR de campo, foram incorporados.

Apesar da miniaturização, o custo e a complexidade dos ensaios eram ainda relativamente elevados para a fase de estudos preliminares, sendo adequada no entanto, para a escolha definitiva de solos de granulação fina lateríticos destinados a bases de pavimentos de baixo custo.

Para que o Mini-CBR e ensaios associados pudessem ser usados em estudos geotécnicos preliminares apresentando custo comparável ao dos procedimentos tradicionais baseados na determinação de  $w_L$ ,  $w_P$  e granulometria por peneiramento, houve necessidade de uma drástica simplificação. De acordo com Nogami & Villibor (1995), isto só foi possível com a adoção do novo método de compactação desenvolvido no *Transport and Road Research Laboratory*, conhecido como MCV (*Moisture Condition Value*).

O procedimento MCV envolve a determinação do MCV adaptado para o uso de corpos de prova de dimensões reduzidas, que será designado de Ensaio mini-MCV. Este procedimento caracteriza-se por utilizar:

- a) Energia de Compactação variável: Para cada teor de umidade do corpo de prova, aplica-se um número de golpes crescentes, até atingir uma massa específica aparente máxima;
- b) Compactador: Provido de soquete de seção plena que trabalha dentro de um molde cilíndrico de 50 mm de diâmetro, com pesos variando de 2270 g a 1000g e alturas de queda de 30,5 cm a 20 cm, no caso de adaptação para miniatura e sub-miniatura, respectivamente (Figura 2.3).

A adaptação realizada conduziu a parâmetros designados como  $a'$  e  $b'$ ; que não distinguem os solos lateríticos dos saprolíticos. Daí a necessidade de introduzir um novo coeficiente  $c'$ , obtido a partir do ensaio de Perda de Massa por Imersão e também, a consideração da inclinação do ramo seco da curva de compactação, que corresponde ao coeficiente  $d'$ .

Um exemplo da determinação destes coeficientes é apresentada na Figura 2.4.

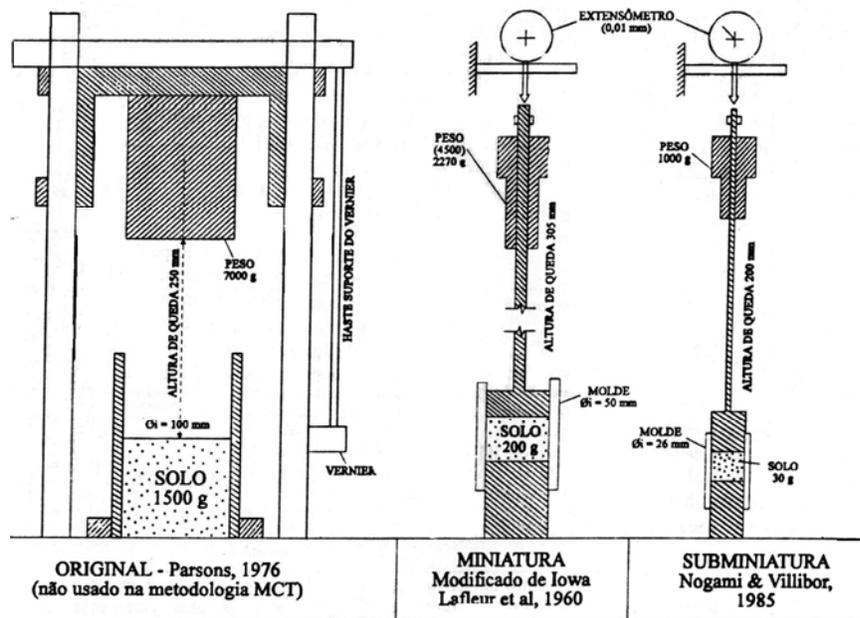


Figura 2.3 - Aparelho Compactador  
(Nogami & Villibor, 1995).

Destaca-se ainda que, a adaptação não objetiva apenas a classificação do solo, pois, a partir da sistemática de ensaios que envolvem o mini-MCV e o ensaio de comportamento dos corpos de prova a imersão em água, outros dados de importância são considerados, tais como:

- Família de Curvas de Compactação, obtida com energia variável (da normal a intermediária);
- Relação entre o mini-MCV e o Teor de Umidade, que permite determinar no campo o teor de umidade de compactação;
- Capacidade de Suporte, expressa em Mini-CBR, sem imersão dos corpos de prova e com máxima densidade obtida para um determinado teor de umidade;
- Classificação do solo
- Ordem de grandeza da Permeabilidade do solo através da determinação do mini-MCV correspondente à exsudação, na ocasião da compactação dos corpos de prova;
- Características de Expansibilidade e Coesão do solo compactado sob condição de imersão total em água, com confinamento parcial.

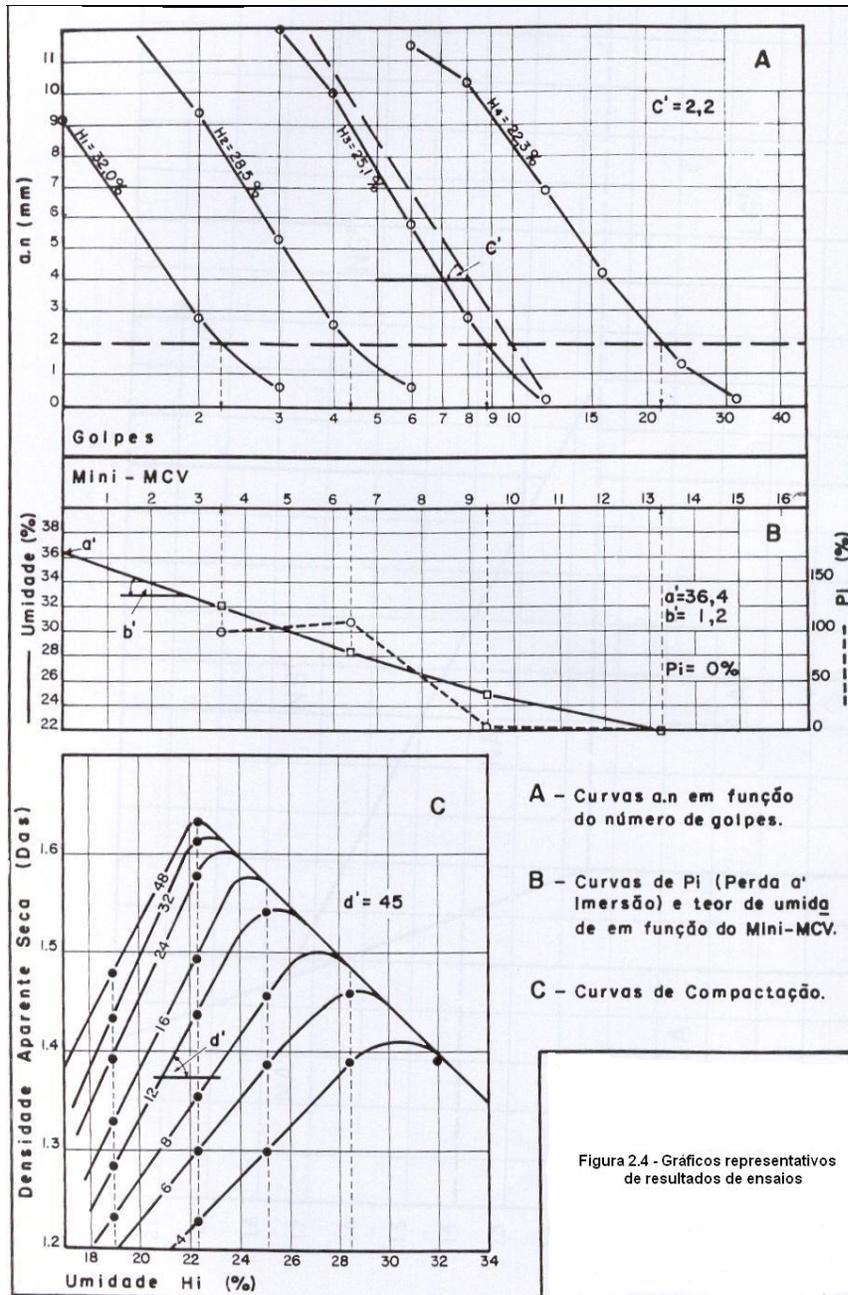


Figura 2.4 - Gráficos Representativos de Resultados de Ensaio (Nogami & Villibor, 1995).

Paralelamente ao desenvolvimento da metodologia MCT são estudados procedimentos associados visando uma maior simplificação na obtenção dos parâmetros necessários, sendo estes:

- Identificação Expedida dos Grupos MCT pelo Método das Pastilhas: visa a correlação do coeficiente  $c'$  com a contração de corpos de prova, e, do índice  $e'$  com a consistência da pastilha previamente seca e posteriormente submetida à embebição em água. Estes corpos de prova são moldados (não-compactados) em anéis de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura, utilizando-se a fração de solo que passa na peneira 0,42 mm.
- Penetrômetros: visa verificar a diferença entre as propriedades dos solos naturais “*in situ*” e após a compactação.
- Previsão de erosão: visa desenvolver uma série de procedimentos para previsão e combate da erosão em cortes, saias de aterros e faixa marginal dos pavimentos adaptados aos solos tropicais. Para tal considera-se as propriedades de infiltrabilidade e perda de massa por imersão.

### **2.2.1.2 - A Classificação Geotécnica MCT**

A classificação geotécnica MCT para um determinado solo é realizada a partir do gráfico, apresentado na Figura 2.5, onde se considera em abscissas o coeficiente  $c'$ , obtido no ensaio de compactação e, em ordenadas, o índice  $e'$  calculado pela equação (2.1):

$$e' = (P_i / 100 + d' / 20)^{1/3} \quad (2.1)$$

onde:

$P_i$  = perda de massa por imersão;

$d'$  = inclinação do ramo seco da curva de compactação, correspondente à energia de 12 golpes, soquete tipo leve.

Para fins classificatórios é necessária a determinação dos parâmetros  $c'$ ,  $d'$  e  $e'$ , assim sendo torna-se necessária uma breve descrição quanto a obtenção dos mesmos.

A compactação é realizada considerando teores de umidade e energias variáveis, obtendo-se assim, uma família de curvas de compactação. Com os dados obtidos para uma determinada umidade, plota-se uma curva de deformabilidade, considerando-se as diferenças de altura do corpo de prova entre os golpes  $n$  e  $4n$ . De acordo com Villibor *et al.* (1996), a inclinação (coeficiente  $c'$ ) das curvas de deformabilidade na compactação apresenta-se

variável com a granulometria dos solos, no entanto, como  $c'$  não varia com a laterização, tornou-se necessário o desenvolvimento do índice  $e'$ .

Estudos realizados por Barroso & Fabbri (1996) em solos artificiais, variando-se o tipo e o teor da fração fina presente, demonstraram que o coeficiente  $c'$  é ineficiente para expressar o grau de argilosidade dos solos. De acordo com Nogami & Villibor (2000), em grande parte esta ineficiência decorre do uso da mesma série de golpes e do mesmo procedimento para cálculo das deformações, utilizado originalmente por Parsons. Assim, os autores propõem o uso de uma nova série de golpes e uma nova maneira de calcular as deformações dos corpos de prova.

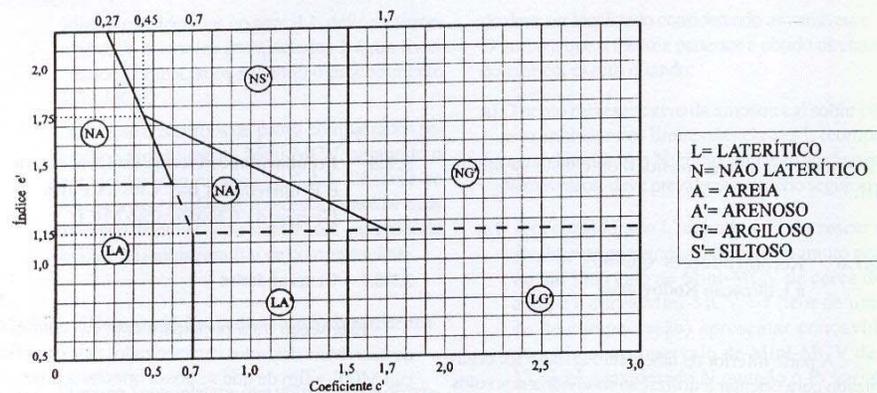
No gráfico, apresentado na Figura 2.5, observa-se a linha tracejada que divide as áreas ocupadas pelos solos de comportamento laterítico (sigla L) dos não-lateríticos (sigla N). Cabe ressaltar que esse comportamento só se refere aos solos compactados, no entanto, através de correlação pode-se inferir muitas das propriedades dos solos em estado natural.

Quanto aos solos saprolíticos, de comportamento pior do que o previsto pelos métodos tradicionais, encaixam-se nesta classificação, sobretudo na classe NS'.

Ainda se tratando de classificação, observa-se na Figura 2.5 que, a classificação MCT comporta 7 grupos distintos, onde constam as características texturais e mineralógicas dos vários grupos de solos tropicais, bem como algumas de suas propriedades mecânicas e hídricas. Estas propriedades correspondem à compactação realizada no teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima, correspondentes ao mini-Proctor.

De acordo com Nogami & Villibor (1985) tem sido constatadas diferenças no grau de confiabilidade de previsão das propriedades nos diversos grupos da classificação. No que se refere à capacidade de suporte mini-CBR, obteve-se maior confiabilidade nos solos de comportamento laterítico, tanto na condição não imersa como imersa, sob condições padronizadas. Já para os solos NS' (Solos Siltosos Não Lateríticos) foram constatadas grandes dispersões, em termos de capacidade de suporte, sobretudo se forem considerados tipos mineralógicos e texturais extremos, tais como solos saprolíticos constituídos essencialmente de silte caulínico ou de silte sericítico.

Verificou-se que, a classificação MCT não se relaciona de forma simples com os grupos de classificação TRB, podendo, por exemplo, um solo A-7 corresponder tanto a argilas lateríticas do grupo LG', de excelente comportamento, ou as argilas expansivas do grupo NG' ou, ainda, a siltes micáceos saprolíticos do grupo NS', que incluem os piores solos que se conhecem.



| GRANULOMETRIAS TÍPICAS<br>Designações do T1-71 do DER-SP<br>(equivalentes da Mississippi River<br>Commission, USA)     |                                |                   | argilas<br>siltos (q,s)                   | areias siltosas | siltos (k,m)<br>siltos arenosos | argilas<br>argilas arenosas<br>argilas siltosas<br>siltos argilosos | areias siltosas                                | areias argilosas                | argilas<br>argilas arenosas<br>argilas siltosas<br>siltos argilosos |                |
|--|--------------------------------|-------------------|---|-----------------|---------------------------------|---|--|---------------------------------|---|----------------|
| k=caolínico      m=micáceo<br>s=sericítico      q=quartzoso  |                                |                   | N = Não Laterítico                        |                 |                                 |   | L = Laterítico                                 |                                 |   |                |
| COMPORTAMENTO  |                                |                   | NA  | NA'             | NS'                             | NG'   | LA   | LA'                             | LG'   |                |
| GRUPO MCT  |                                |                   | NA  | NA'             | NS'                             | NG'   | LA   | LA'                             | LG'   |                |
| Propriedades   | MINI-CBR (%)                   | sem imersão       | M, E                                      | E               | M, E                            | E   | E  | E, EE                           | E   |                |
|  |                                | perda por imersão | B, M                                      | B               | E                               | E   | B  | B                               | B   |                |
|  | EXPANSÃO                       |                   | B   | B               | E                               | M, E  | B  | B                               | B   |                |
|  | CONTRAÇÃO                      |                   | B   | B, M            | M                               | M, E  | B  | B, M                            | M, E  |                |
|  | COEF. DE PERMEABILIDADE (k)    |                   | M, E                                      | B               | B, M                            | B, M  | B, M   | B                               | B   |                |
| COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)  |                                | E                 | B, M                                      | E               | M, E                            | B   | B  | B                               |   |                |
| Corpos de prova compactados na<br>massa específica aparente seca máxima<br>da energia normal                           |                                |                   | EE = Muito Elevado (a)<br>E = Elevado (a) |                 | M = Médio (a)<br>B = Baixo (a)  |   | Vide Tabela III.3 para<br>equivalente numérico |                                 |   |                |
| Utilização   | Base de pavimento              |                   | n   | 4°              | n                               | n   | 2°   | 1°                              | 3°  |                |
|  | Reforço do subleito compactado |                   | 4°  | 5°              | n                               | n   | 2°   | 1°                              | 3°  |                |
|  | Subleito compactado            |                   | 4°  | 5°              | 7°                              | 6°  | 2°   | 1°                              | 3°  |                |
|  | Aterro (corpo) compactado      |                   | 4°  | 5°              | 6°                              | 7°  | 2°   | 1°                              | 3°  |                |
|  | Proteção à erosão              |                   | n   | 3°              | n                               | n   | n  | 2°                              | 1°  |                |
|  | Revestimento primário          |                   | 5°  | 3°              | n                               | n   | 4°   | 1°                              | 2°  |                |
|  |                                |                   | n = não recomendado                       |                 |                                 |   |  |                                 |   |                |
| Grupos tradicionais obtidos de<br>amostras que se classificam nos<br>grupos MCT discriminados nos<br>topos das colunas |                                |                   | USCS                                      | SP<br>SM        | MS<br>SC<br>ML                  | SM, CL<br>ML, MH  | MH<br>CH                                       | SP<br>SC                        | SC  | MH<br>ML<br>CH |
|  |                                |                   | AASHTO                                    | A - 2           | A - 4<br>A - 7                  | A - 4<br>A - 5<br>A - 7 - 5   | A - 4<br>A - 5<br>A - 7 - 5                    | A - 6<br>A - 7 - 5<br>A - 7 - 5 | A - 2   | A - 4          |

Gráfico da classificação MCT e dados diversos dos grupos de solos integrantes da mesma

Figura 2.5 - Gráfico da Classificação MCT e Dados Diversos dos Grupos de Solos (Nogami & Villibor, 1995).

### 2.3 – SOLOS NÃO SATURADOS / SUCCÃO NO SOLO

Quando os vazios num solo estão ocupados, em parte por ar e em parte por água, diz-se que o solo está não saturado. Quando o teor de umidade é baixo, o ar está presente em

condutos contínuos, enquanto a água se concentra principalmente ao redor dos contatos entre partículas. As interfaces entre estas duas fases estão na forma de meniscos dentro dos vazios do solo. Quando o teor de umidade é elevado, o ar pode estar ocluído no solo na forma de bolhas isoladas. Os fenômenos envolvidos na saturação geram uma pressão na água do solo, abaixo da pressão atmosférica. Esta pressão é chamada de sucção.

A sucção é normalmente dividida em dois componentes, o matricial (relacionado com a matriz do solo, isto é, a combinação do tipo de partículas e arranjo estrutural) e o osmótico (devido à composição química da água presente nos vazios do solo). A sucção total é a soma da sucção matricial (ou mátrica) e da sucção osmótica. Normalmente a sucção osmótica é inferida pela diferença entre a sucção total e a matricial (Marinho & Pinto, 1997).

A sucção matricial presente num solo não saturado é a diferença entre os valores de pressão de ar ( $u_a$ ) e pressão de água ( $u_w$ ). Segundo vários autores, a sucção matricial é o parâmetro mais importante para o estudo do comportamento mecânico dos solos não saturados. A componente osmótica é a sucção equivalente obtida através da medição da pressão parcial de vapor de água, em equilíbrio com uma solução de composição idêntica à da água intersticial (mas com a interface ar/água intersticial plana), em relação à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com água pura “livre” (interface ar/água plana) (Aitchison, 1965 *apud* Marinho & Pinto, 1997).

A sucção está relacionada com as propriedades da matriz deste solo (exemplo: o tamanho e forma dos vazios, o tamanho das partículas, a quantidade de água retida, etc). A sucção osmótica varia de acordo com as condições químicas e térmicas do solo. Para um solo granular e livre de sais, não existe a sucção osmótica e as sucções matricial e total são iguais.

Existem vários fatores que influem na sucção total de um solo não saturado (Campos *et al.*, 1992; Neto & Carvalho, 1995; etc). Entre estes podem ser citados:

- granulometria e mineralogia do solo: a relação entre a granulometria e a sucção do solo é refletida na curva característica. Os solos arenosos necessitam de baixas sucções para a dessaturação dos poros maiores e os solos argilosos, devido a uma maior capacidade de armazenamento d'água, necessitam de uma sucção mais elevada para obtenção de um mesmo decréscimo de umidade;
- estrutura do solo: o tamanho dos poros e a tensão superficial entre as partículas do solo e as moléculas da água influenciam no valor da sucção. Cruz (1996) cita que, para solos de semelhantes índices de vazios, o tipo de poro determinará as propriedades de condutividade hidráulica;

- trajetória de umedecimento e/ou secagem: estas trajetórias geram o ciclo de histerese na curva característica.

Segundo Ceratti *et al.* (1996) como os solos têm seus poros preenchidos parcialmente por água, devido às variações ambientais constantes nos países tropicais, a pressão de água nos mesmos será menor que a pressão atmosférica, portanto negativa. Logo, a secagem no solo resultaria em um aumento na pressão negativa até valores superiores a 10 MPa. Esta pressão negativa é definida como sucção ou energia livre da água e, apresenta-se como função da temperatura, umidade relativa, pressão de vapor dentre outros fatores.

Ainda segundo os autores, a quantidade de energia ou sucção requerida para remover água de um solo depende do tamanho do poro e da tensão superficial entre as partículas de solo e das moléculas de água. Assumindo-se que a tensão superficial seja constante, a sucção requerida para remover a água dependerá apenas da estrutura do solo. Em alguns casos, a estrutura do solo constitui-se de arranjos irregulares de partículas de solo com diferentes tamanhos de poros. Nos solos argilosos (poros menores) a sucção para iniciar a remoção d'água nos poros será maior que para os solos arenosos (poros maiores). Observa-se então que, a distribuição de tamanho de poro é um dado muito usado para avaliar algumas características comportamentais dos solos (Tuncer, 1988; Prapaharan *et al.*, 1991), podendo ser determinado através do porosímetro de intrusão de mercúrio, apenas nos estados, saturado e seco.

Edil & Motan (1979) verificaram que, o potencial mátrico do solo é afetado tanto pelo tamanho e o número de poros, quanto pelas forças de adsorção associadas às superfícies das partículas.

Utilizando ensaios de sucção controlada, encontra-se na literatura, relações lineares associando a resistência ao cisalhamento e a sucção, assim como, relação entre a coesão e a sucção. Tal fato ocorrendo devido ao comportamento mecânico do solo depender tanto do estado físico, tamanho e forma dos poros, quanto do físico-químico, interação mineral água, no sistema solo-água.

Além da relação resistência ao cisalhamento x sucção, também têm sido realizados trabalhos relacionados com a influência da sucção no módulo resiliente. Wood (1982), Phillip (1994), Phillip & Cameron (1995) *et al.*, *apud* Ceratti *et al.* (1996), dentre outros; comprovaram que, as variações ambientais (secagem e umedecimento) influenciam o comportamento mecânico de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade dos solos. Estas alterações resultam em variações de umidade no solo do subleito do pavimento e

produzem deformações irreversíveis e ou reversíveis nos materiais do pavimento. Podendo também afetar a caracterização da deformabilidade elástica dos materiais no ensaio de determinação do módulo de resiliência. Ou seja, as alterações ambientais provocam alterações no módulo de resiliência, além daquelas relacionadas ao estado de tensões.

Estudos realizados indicaram uma relação não linear entre o módulo de resiliência e teor de umidade, mostrando também que, um incremento no teor de umidade resulta em uma diminuição no módulo de resiliência (Li & Selig, 1994 e Jin *et al.*, 1994). Edil & Motan (1979) observaram, através de numerosos estudos em campo, que a performance do pavimento é controlada pela magnitude da deformação resiliente, ocasionada pela ciclagem – secagem, umedecimento. Esta deformação sendo responsável, por sua vez, pela ruptura por fadiga em superfícies de concreto asfáltico.

Pode-se destacar algumas conseqüências resultantes desta variação ambiental, tais como: saturação devido à inundação das camadas de solo que, resulta no desenvolvimento do processo de erosão da sub-base, trincas de contração em solos plásticos desenvolvidas em períodos extremamente secos. No caso do desenvolvimento de trincas em período chuvoso, o solo sofre saturação e, conseqüentemente diminui sua capacidade de resistência.

Segundo Walsh & Houston (1997) *apud* Pessoa (2004) em regiões onde os solos estão sempre cimentados, as mudanças no regime subterrâneo e superficial das águas, que se originam da urbanização, representam a fonte da grande maioria dos problemas geotécnicos. Observa-se então, a importância de se determinar a sucção nos solos não saturados, pois esta influi diretamente no comportamento mecânico dos materiais e, conseqüentemente, no dimensionamento e na vida útil dos pavimentos. Cabe ressaltar que nos estudos realizados pelos autores, a sucção representou o parâmetro de maior influência na resistência dos solos, e, a cimentação química apresentou-se como parâmetro de pouca influência.

Camapum de Carvalho & Leroueil (2000), também destacam a importância de se avaliar a influência da sucção no comportamento desses solos. Segundo os autores, a elevada porosidade dos solos do DF aliada à baixa capacidade de retenção de água dos minerais nele presentes faz com que as variações de teor de umidade em uma dada profundidade sejam importantes ao longo do ano. O interesse na determinação da sucção consiste basicamente em se determinar o impacto das variações de umidade (saturação ou redução de pressão negativa e da secagem) na resistência dos solos, já que em solos não saturados esta resistência é controlada pela tensão normal e a sucção matricial (Fredlund & Rahardjo, 1993).

### 2.3.1 - Fases em um Solo Não Saturado

Três diferentes tipos de solos não saturados, tomando como base a continuidade das fases de ar e água, são propostos por Wroth & Houlsby (1985). A Figura 2.6 apresenta as estruturas de solos compactados.

1. Fase de ar descontínua e fase de água contínua. Este tipo de estrutura se encontra nos solos não saturados que contêm alto grau de saturação. O ar se encontra em forma de bolhas discretas (Figura 2.6(a)).

2. Fases contínuas de ar e água. Este tipo de estrutura se encontra nos solos não saturados que se encontram com um grau intermediário de saturação e se apresentam em zona de transição da curva característica. Ocorre, por exemplo, em depósitos de solos naturais e em aterros compactados de grãos finos (siltes e argilas) (Figura 2.6(b)).

3. Fase de ar contínua e fase de água descontínua. Este tipo de estrutura se encontra em solos não saturados com baixo grau de saturação. Apresenta-se, por exemplo, em solos naturais próximos à superfície e em alguns aterros compactados (Figura 2.6(c)).

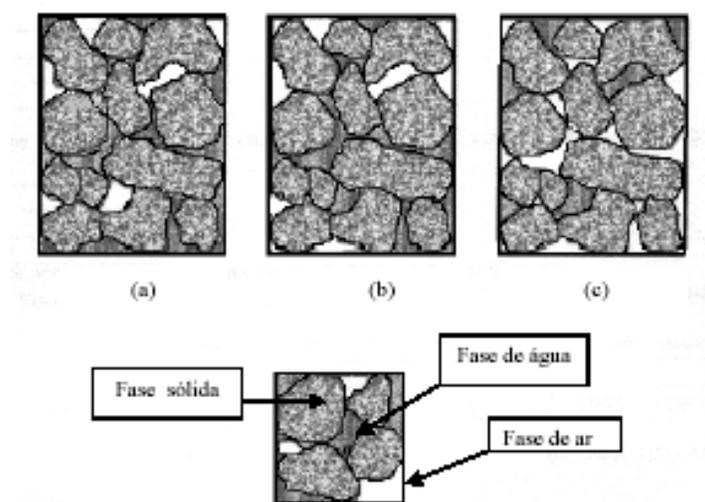


Figura 2.6 - Estruturas de Solos Compactados:  
a) Fase de água contínua e fase de ar descontínua  
b) Fases de ar e água descontínuas  
c) Fase de ar contínua e fase de água descontínua  
(Barrera, 2002 *apud* Martínez, 2003).

Anteriormente a esta proposição, todavia, Barden (1965) já tinha sugerido que os efeitos da variação no grau de saturação poderiam ser mais bem estudados, dividindo os intervalos do grau de saturação ( $S_r$ ) em um conjunto de cinco elementos. Sua classificação resulta numa

descrição compreensível de como o comportamento de um solo não saturado varia com  $S_r$  (Smith, 1998 *apud* Martínez, 2003).

(1) Extremamente seco ( $S_r < 5\%$ )

A fase ar é contínua através da massa de solo e alguma água está em forma altamente viscosa adsorvida firmemente ao esqueleto sólido. Como os vazios de ar estão interconectados, apenas ar será expelido com o adensamento do solo e, como o grau de saturação é muito pequeno, o valor da tensão efetiva,  $\sigma'$ , pode ser tomado como igual à tensão aplicada menos a pressão do ar ( $\sigma - u_a$ ). Todavia, a pressão do ar ( $u_a$ ) é geralmente a pressão atmosférica e, neste caso, pode ser suposta como zero, fazendo  $\sigma' = \sigma$ .

(2) Na condição seca (ramo seco) ( $S_r$  de 5% a 90%)

Quanto mais água é acrescentada a um solo mais o comportamento do solo torna-se afetado pela água livre que pela absorvida, numa transição gradual. Com o adensamento, embora o ar seja expulso, o valor de  $u_w$  raramente ficará positivo e o valor de sucção ( $u_a - u_w$ ) ainda é suficientemente alto, assegurando que pouca água flua através do solo.

(3) Na condição ótima ( $S_r = 90\%$ )

Para este valor, que é um estágio de transição para a saturação completa, o valor de ( $u_a - u_w$ ) pode cair para  $u_w$ . Se isto acontece, apenas a água pode drenar do solo.

(4) Na condição úmida em relação à ótima ( $90\% < S_r < 95\%$ )

O ar já não pode existir num estado livre, mas pode estar ocluso, isto é, ocorrer na forma de bolhas isoladas. Não existe meio de medir  $u_a$  e o ar remanescente está preso ao esqueleto, sendo incapaz de ser removido pelo fluxo de água. Todavia, se algum ar permanecer no solo na forma de bolhas, estas podem tornar o fluido do poro altamente compressível, apesar de terem pouco efeito sobre o valor de  $u_w$ .

(5) Na condição “saturada” ( $S_r > 95\%$ )

Para solos argilosos com grau de saturação relativamente alto, de cerca de 90%, o ar neste solo está ocluso. Pode-se então supor que este ar tem pouco efeito sobre a poropressão d'água. Em tais casos, o solo não saturado tende a se comportar como se fosse saturado e a tensão efetiva pode ser assumida como igual a  $\sigma - u_w$ . No entanto, tal observação não é válida para todos os solos, característica esta comprovada pelos estudos realizados na presente tese

de doutorado, onde se verificou graus de saturação iguais a 96% para a condição de compactação ótima sem que este material se comporte como solo saturado. Sendo assim, uma proposição mais coerente de grau de saturação, para os solos tropicais do Distrito Federal, seria vincular o grau de saturação ao percentual de argila presente nos solos.

### 2.3.2 - Métodos de Medição de Sucção

Existem diversos métodos diretos ou indiretos, de campo ou de laboratório, para medir as sucções total, osmótica e matricial. Com estes métodos relacionando a sucção com o teor de umidade ou com o grau de saturação do solo não saturado, obtém-se a curva característica do solo. Estes métodos podem ser divididos em dois grupos: métodos diretos e métodos indiretos. A placa de sucção, a centrífuga, o tensiômetro, o psicrômetro e o aparelho de membrana de pressão constituem os métodos diretos e, entre os métodos indiretos estão o dessecador de vazios, a balança de adsorção e o papel filtro. A Tabela 2.2 apresenta as várias técnicas de medição de sucção e os intervalos de aplicação de cada técnica.

Tabela 2.2 - Técnicas de Medição de Sucção (Marinho & Pinto, 1997).

| Técnica                   | Sucção matricial | Sucção osmótica | Sucção Total | Intervalo (kPa)     |
|---------------------------|------------------|-----------------|--------------|---------------------|
| Psicrômetro               |                  | x               | x            | 100 - 8000          |
| Papel filtro em contato   | x                |                 |              | 0 - 29000           |
| Papel filtros sem contato |                  |                 | x            | 400 - 30000         |
| Tensiômetro               | x                |                 | x            | 0 - 900<br>0 - 1000 |
| Tensiômetro osmótico      | x                |                 |              | 0 - 1500            |
| Translação de eixos       | x                |                 |              | 0 - 1500            |
| Condutividade térmica     | x                |                 |              | 0 - 400             |
| Condutividade elétrica    | x                | x               |              | 20 - 1500           |

Os detalhes de cada técnica encontram-se descritos em Marinho & Pinto (1997). Todavia, o método utilizado nesta tese foi à medição da sucção pelo papel filtro, descrito a seguir.

### 2.3.3 - Método do Papel Filtro

Marinho (1995) descreve o método do papel filtro, que consiste na utilização de um material poroso com a capacidade de absorver água e atingir um equilíbrio de sucção com a

amostra. A sucção obtida depende do tipo de transferência de água do solo para o papel, que pode resultar da capilaridade (correspondente à sucção matricial) ou através de vapor (correspondente à sucção osmótica).

Normalmente o papel filtro “quantitativo”, tipo 2 é empregado. Os mais usados sendo: Whatman n° 42 ou Schleicher & Schuell n° 589. Neste trabalho, foram obtidas as sucções, fazendo uso do papel filtro Whatman n°42, cuja umidade inicial no estado seco ao ar é aproximadamente 6%, permitindo que sejam determinadas sucções no solo não saturado de 0 até 29MPa (máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do mesmo).

A precisão do método está diretamente relacionada com o sistema de pesagem para obtenção de umidade do papel filtro. Uma variação na quarta casa decimal do grama pode levar à diferenças de 50kPa no valor da sucção; por este motivo, para sucções muito baixas o método pode se tornar impreciso. Portanto, devem ser tomados certos cuidados para uma adequada medição de sucção, que consistem basicamente em evitar-se perda significativa de umidade. Esta perda sendo mais rápida quanto mais alta se apresenta à umidade.

Observa-se então que, o papel filtro é um método indireto, onde a sucção é obtida através de uma curva de calibração, que relaciona sucção com a umidade do papel filtro.

De acordo com Marinho (1995), quanto ao papel filtro Whatman n° 42, Chandler *et al.* (1992) apresentam as Equações (2.2) e (2.3) representando as curvas de calibração (Figura 2.5).

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48*\log w)} \text{ para umidades do papel filtro } > 47 \% \quad (2.2)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,48-0,0622*w)} \text{ para umidades do papel filtro } < 47 \% \quad (2.3)$$

Ainda segundo Marinho (1995), a ASTM D5298-92 recomenda as Equações (2.4) e (2.5), segundo análises feitas por Greace *et al.* (1987), para o papel filtro Whatman n° 42.

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(2,412-0,0135*w)} \text{ para umidades do papel filtro } \geq 54\% \quad (2.4)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(5,327-0,0779*w)} \text{ para umidades do papel filtro } \leq 54\% \quad (2.5)$$

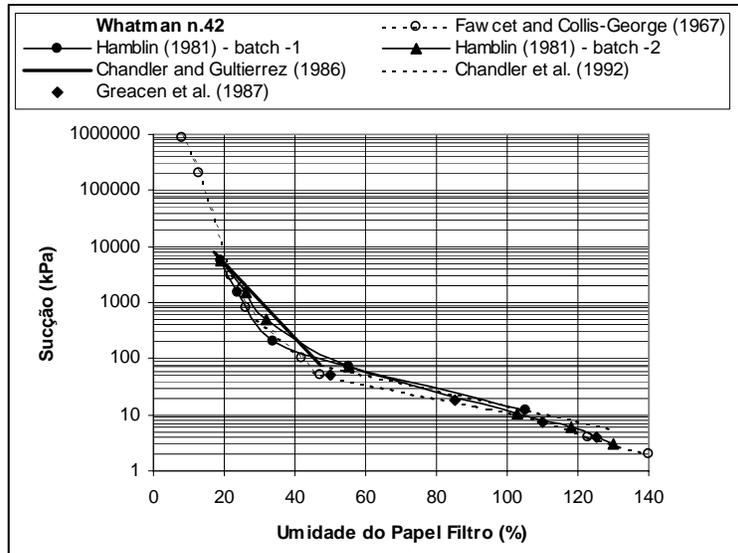


Figura 2.7 – Curvas de Calibração para o Papel Filtro Whatman n° 42 (Marinho, 1995).

De acordo com Marinho (1994), geralmente se utilizam às equações apresentadas por Chandler *et al.* (1992), quando se trata do papel filtro Whatman n° 42, pois nestas foram considerados um maior número de pontos.

O referido autor realizou testes onde o papel filtro Whatman n° 42 foi deixado equilibrar sobre diferentes soluções salinas e água pura, em ambiente fechado e protegido de variações de temperatura. Foi verificado aumento da umidade do papel com o tempo de equilíbrio considerado, assim como, observou-se a influência da distância entre o papel filtro e a fonte de vapor. Os resultados comprovaram que a curva de calibração apresentada por Chandler & Gutierrez (1986), pode ser utilizada para a obtenção da sucção total e matricial, desde que o tempo de equilíbrio (Tabela 2.3) seja adequado (Marinho, 1994).

Tabela 2.3 – Tempo de Equilíbrio para a Medição de Sucção Total (Marinho, 1994).

| Nível de Sucção Total (kPa) | Tempo de Equilíbrio sugerido                      |
|-----------------------------|---|
| 0 - 100                     | Não determinado, mas certamente maior que 30 dias |
| 100 - 250                   | 30 dias   |
| 250 - 1000                  | 15 dias   |
| 1000 - 30000                | 7 dias  |

É necessário ainda destacar que dependendo da forma em que ocorre o fluxo de água entre o papel filtro e a amostra de solo, pode-se obter uma sucção matricial (fluxo capilar) ou osmótica (fluxo de vapor).

Na sucção matricial ocorre fluxo capilar entre os poros da massa do solo e das fibras do papel sem que a água perca continuidade. Na sucção osmótica, as moléculas de água escapam da água dos poros vencendo as forças capilares do solo com diferentes concentrações de sais. Neste caso, o papel não é colocado em contato direto (Figura 2.8) sobre a amostra e o fluxo ocorre através do vapor.

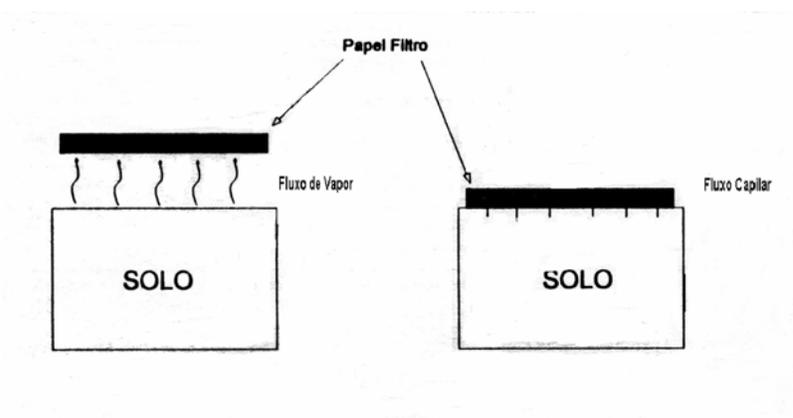


Figura 2.8 – Formas de Fluxo da Água (Marinho, 1995).

## 2.4 - CURVA CARACTERÍSTICA

A relação entre o teor de umidade ou o grau de saturação e a sucção matricial é definida como curva característica. Esta curva é uma propriedade do solo que determina a quantidade de água que um solo pode perder ou ganhar, através da tensão de sucção.

Barbour (1999) cita que Childs & Collis-George (1948) já consideravam que as informações contidas numa curva característica poderiam ser úteis na estimativa das propriedades dos solos não saturados. De fato, vários métodos têm sido propostos na literatura para prever variação de volume, tensão cisalhante de ruptura, condutividade hidráulica, difusão, adsorção, condutividade térmica e uma variedade de outras propriedades de solos não saturados, baseados em parte nas informações contidas nas curvas características. Fato este reafirmado por Fredlund (1996) que relata a possibilidade de correlacionar a curva característica com outras propriedades físicas, tais como: permeabilidade, resistência ao cisalhamento e módulo de resiliência.

Existe uma equação que mostra uma relação direta entre a sucção e a distribuição de poros e, há um estudo detalhado a respeito da influência da compactação na distribuição de poros (Watabe *et al.*, 2000 *apud* Camapum de Carvalho & Lerouil, 2000). Na literatura há várias equações propostas para representar a forma das curvas características dos solos, sendo que a grande maioria adota funções logarítmicas ou exponenciais.

Segundo Vanapalli *et al* (1999), as propriedades peculiares da curva característica dependem de vários fatores tais como: estrutura e agregação, teor de umidade inicial, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, história de tensões e método de compactação.

Dos fatores citados, a história de tensões e o teor de umidade inicial, aparentemente, têm a maior influência sobre a estrutura e agregação que dominam a natureza da curva característica para solos de granulação fina. Amostras de um solo particular, apesar de terem a mesma estrutura e mineralogia, podem exibir diferentes curvas características, se forem preparadas a diferentes teores de umidade inicial e se possuírem diferentes histórias de tensões. Como resultado, o comportamento de engenharia de tais solos também será diferente. Os dois pontos principais das curvas características são os valores das sucções matriciais correspondentes à entrada de ar e ao início do estágio residual de dessaturação (Figura 2.9).

a) Valor de entrada de ar (V.E.A.):

O valor de entrada de ar representa a sucção matricial necessária para causar a dessaturação dos poros maiores do solo não saturado. Este é obtido pela extensão da constante de declividade da curva característica até interceptar a linha de saturação de 100%. O correspondente valor de sucção matricial é tomado como o valor de sucção de entrada de ar do solo.

b) Estágios identificáveis de dessaturação

De acordo com Vanapalli (1994) *apud* Martínez (2003), existem três estágios identificáveis de dessaturação: o início da zona de dessaturação, o estágio transicional (i.e. primário e secundário) e o estágio residual de dessaturação.

No início da zona de dessaturação, quase todos os poros do solo estão preenchidos com água, começando a dessaturar no valor de entrada de ar (início do estágio de transição). Neste estágio, o fluxo de água ocorre na fase líquida. À medida que a sucção aplicada aumenta, o grau de saturação do solo diminui rapidamente. A conectividade da água nos vazios ou poros continua a diminuir com o aumento do valor da sucção. Eventualmente, um aumento

acentuado no valor da sucção conduz a variações relativamente pequenas no grau de saturação.

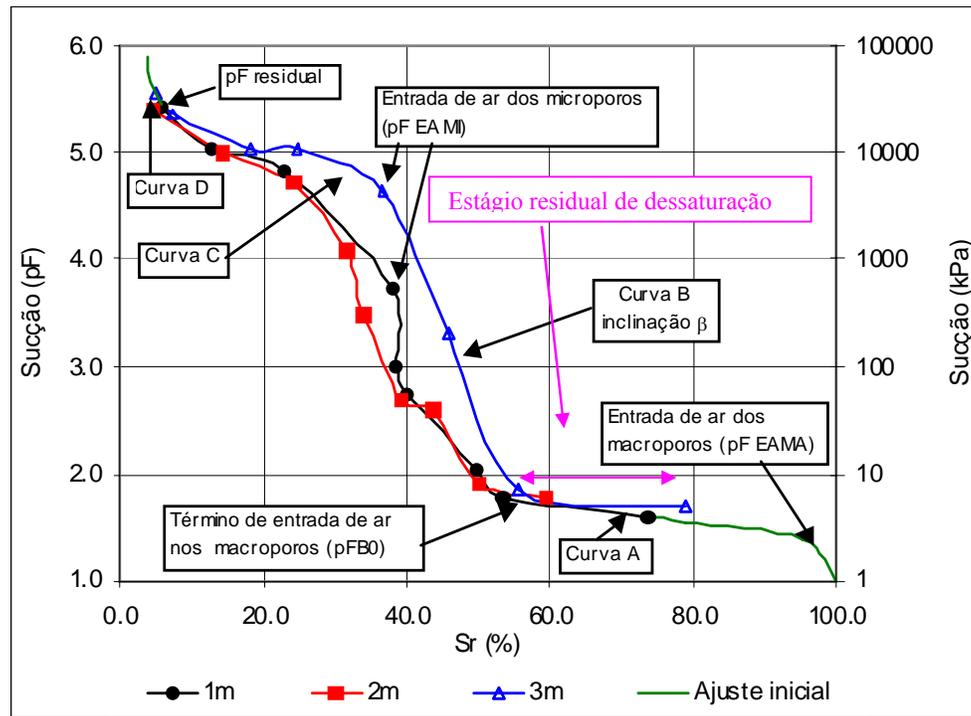


Figura 2.9 - Definição de Variáveis associadas com a Curva Característica do solo. Amostras Indeformadas – Trajetória de Umedecimento. modificado - Guimarães, (2002a).

O estágio residual de saturação pode ser considerado como o grau de saturação em que a fase líquida começa a ficar descontínua. Conseqüentemente, este representa o grau de saturação em que se torna muito difícil remover água do corpo de prova por drenagem. O ponto em que este estado é alcançado não é claramente definido. Os valores relativamente baixos de sucção, associados com remoção de água dos macroporos, são significativamente diferentes das sucções requeridas para remover água de poros microscópicos (mesoporos e microporos) entre as partículas, dentro de agregados de argila. Como resultado, a macroestrutura controla a dessaturação inicial das amostras argilosas compactadas no ramo seco da curva de compactação. Por outro lado, para amostras de solo argilosos compactados nas condições úmidas (ramo úmido), geralmente os macroporos não estão interconectados, de forma que a microestrutura vem a controlar a dessaturação inicial (Vanapalli *et al*, 1999, Barbour, 1999).

Para solos compactados no ramo seco, a estrutura do solo é função do teor de umidade de compactação e impõe o valor de entrada de ar. Segundo Vanapalli *et al* (1999), sob elevados valores de sucção (20000kPa a 1000000kPa), a curva característica aparenta ser aproximadamente a mesma, para amostras ensaiadas sob diferentes teores iniciais de compactação, indicando que, para altos intervalos de sucção, a estrutura do solo não tem muita influência sobre o comportamento da curva característica.

Barbour (1999) apresenta uma coletânea de curvas características onde se podem observar as influências dos seguintes fatores no comportamento das curvas características: textura do solo, tensão de pré-adensamento e condição de compactação do solo (Figuras 2.10 (a), (b), (c) respectivamente). Observa-se da Figura 2.10(a) que, a diminuição no tamanho do grão conduz a um aumento no valor de entrada de ar e a uma suavização da curva característica. Solos mais finos necessitarão de maior sucção para o início da dessaturação, e para estes solos observa-se uma menor declividade da relação  $(u_a - u_w) \times S_r$  no estágio de transição (primária e secundária).

Quanto mais fina a granulometria do material, maior a dificuldade para a determinação do estágio residual de dessaturação. Os solos de granulometria mais grosseira (a areia e o silte Botkin) apresentam valor de entrada de ar menor e um bem definido início do estágio residual de dessaturação. O autor afirma ainda que a elevada retenção d'água pela amostra de argila Regina é justificável pelo maior percentual de argilominerais expansivos.

A Figura 2.10(b) mostra que as diferentes tensões de pré-adensamento a que foi submetido o silte conduzem a diferentes valores de entrada de ar, ou seja, para tensões de pré-adensamento mais elevadas (200kPa e 50kPa) os valores de entrada de ar são maiores; o silte que foi pré-adensado numa menor tensão apresentou o menor valor de entrada de ar. Todavia, para sucções mais elevadas o comportamento entre as três curvas características torna-se semelhante e, no estágio residual apresentam praticamente à mesma relação de dessaturação. Lapierre *et al* (1990) justificam afirmando que, para altas sucções, os poros não são afetados pelo adensamento.

Na Figura 2.10(c), observa-se que a compactação de um solo argiloso no ramo seco conduz a um valor de entrada de ar mais baixo que para o mesmo solo compactado no ramo úmido. Segundo Benson e Daniel (1990) *apud* Martínez (2003) isto é ocasionado pelo maior tamanho dos macroporos gerados pela estrutura floclada da amostra. Como comentado anteriormente, a macroestrutura governa a dessaturação inicial; desta forma, para sucções mais elevadas à estrutura inicial imposta na compactação não influi no estágio residual de dessaturação referente às três curvas.

c) Histerese da curva característica:

Vários estudos realizados com a curva característica de solos não saturados mostram formas distintas conforme sejam seguidas às trajetórias de secagem ou de umedecimento da amostra de solo. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), uma distribuição não uniforme no tamanho de poros pode resultar em histerese na curva característica. Para uma dada sucção matricial, os teores de umidade durante as trajetórias de umedecimento e dessaturação são diferentes. O ângulo de contato numa interface água/ar em avanço durante a trajetória de umedecimento, é diferente do ângulo numa interface em retrocesso, durante a trajetória de dessaturação. Os fatores acima, bem como a presença de ar retido no solo, são consideradas as principais causas da histerese numa curva característica.

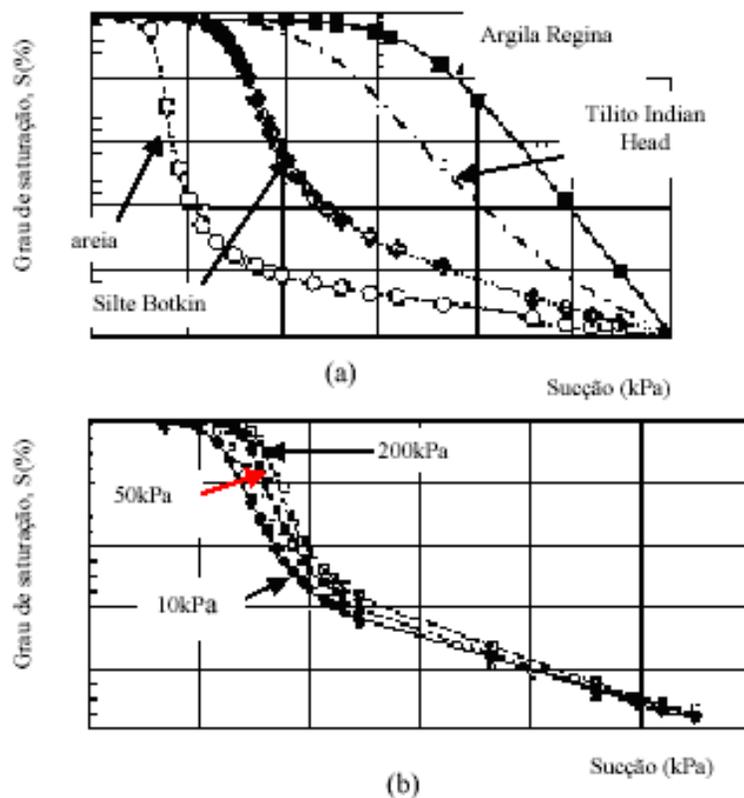


Figura 2.10 – Curvas Características  
a) Influência de textura do solo (Vanapalli, 1994),  
b) Influência da consolidação (Huang, 1994),

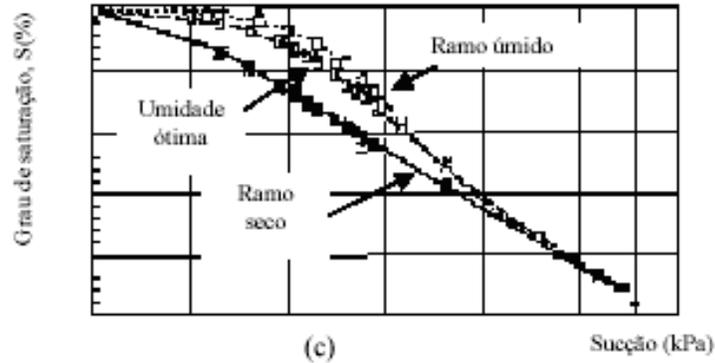


Figura 2.10 – Curvas Características – Continuação.  
 (c) Influência da compactação (Vanapalli, 1994).  
 Barbour, (1999).

#### 2.4.1 - Curva Característica Transformada

Visando integrar os aspectos físico e químico, Camapum de Carvalho & Lerouil (2000), desenvolveram um método que simplifica o estudo e a análise do comportamento dos solos não saturados a partir da definição da curva característica do solo transformada em relação ao índice de vazios.

Para um dado solo têm-se curvas características ( $pF \times S_r$ ) variando com o índice de vazios; pois quanto menor o índice de vazios, maior será a sucção para um mesmo grau de saturação. Portanto, ao solicitar-se em solo ocorre redução de índice de vazios e, conseqüente mudança de curva característica. Sendo assim, a transformação da curva característica é realizada multiplicando-se a sucção ( $pF$ ) pelo índice de vazios ( $e$ ), este produto gerando uma curva característica única, representativa de diferentes índices de vazios para a mesma distribuição de poros (Figura 2.11).

O modelo proposto por Camapum de Carvalho & Leroueil (2000) é importante, do ponto de vista prático, pois se conhecendo a curva característica de um solo, determina-se a sua sucção para índices de vazios diferentes, sem que haja a necessidade de se medir ou acompanhar as variações de sucção no solo. No entanto, deve-se observar que, a aplicação deste modelo torna-se menos precisa à medida que se afasta da distribuição de poros inicial.

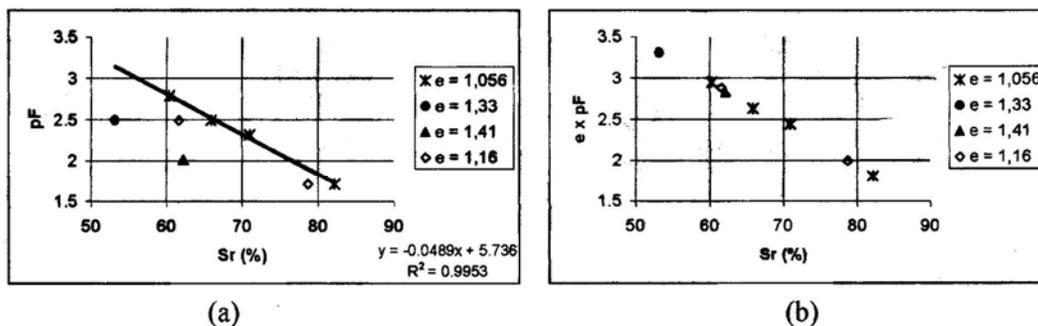


Figura 2.11 - Curva Característica e Curva Característica Transformada  
Camapum de Carvalho & Pereira, (2001).

As curvas características podem ser afetadas por vários fatores, como: as propriedades químicas e mineralógicas, o índice de vazios e a distribuição de poros. No entanto, diferenças nas propriedades químicas e mineralógicas diferenciam apenas curvas características transformadas ou não, de dois solos distintos, não interferindo em relação ao mesmo solo. Em se tratando da distribuição de poros e do índice de vazios, por refletirem o estado do solo, o comportamento é inverso. Embora a curva característica transformada independa do índice de vazios, ela não contempla diferenças na distribuição de poros.

É importante ressaltar que, o fato do  $epF$  variar com a distribuição de poros, não invalida a sua aplicação prática, pois em campo, trabalha-se com faixas específicas de umidade e peso específico, o que permite, na maioria dos casos, limitar o número de curvas características transformadas representativas para cada obra a uma ou no máximo duas.

Baseando-se no mesmo princípio utilizado no desenvolvimento do modelo de transformação da curva característica, pode-se analisar o comportamento mecânico de um solo considerando conjuntamente os parâmetros índice de vazios e a sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) ou (pF).

Fisicamente a sucção e o comportamento mecânico de um solo não saturado dependem do teor de umidade ( $w$ ) e do índice de vazios ( $e$ ).

Camapum de Carvalho & Pereira (2001) utilizando resultados de Machado e Vilar (1998), observaram a aplicabilidade do modelo de normalização, no sentido de generalização quanto ao comportamento dos solos. A Figura 2.12 mostra as curvas características e os resultados de coesão obtidos por Machado & Vilar, conjuntamente a aplicação da normalização.

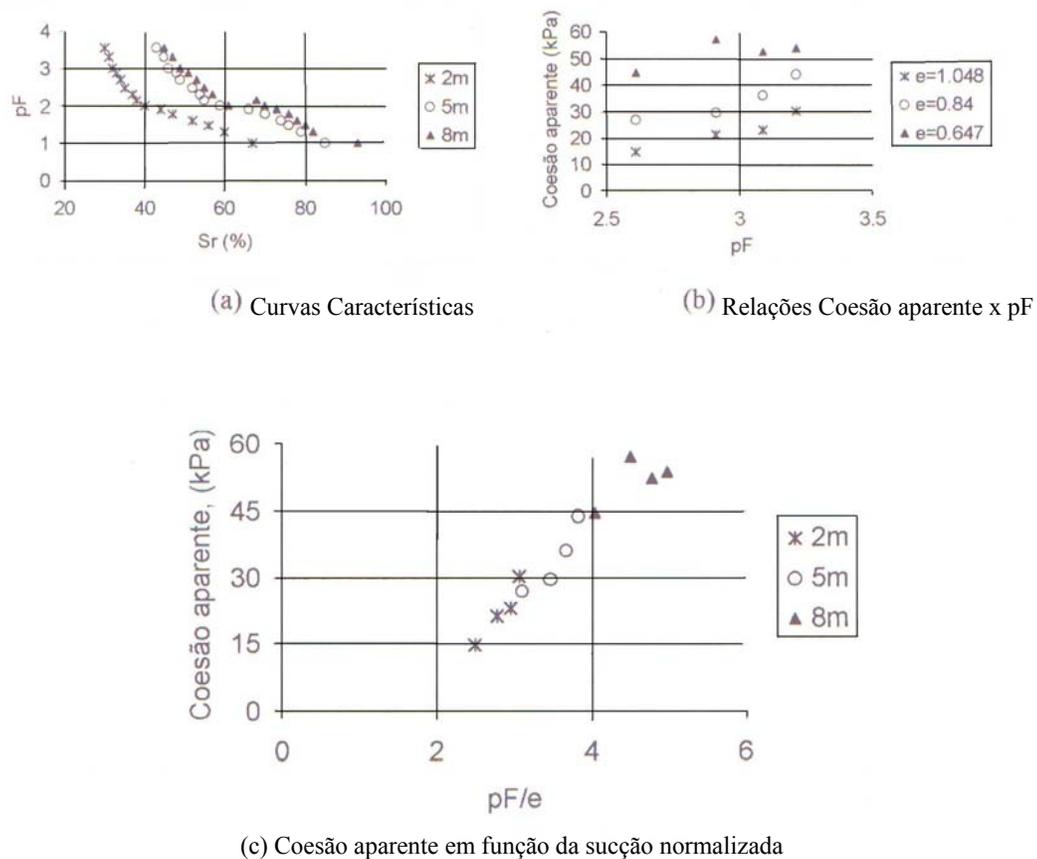


Figura 2.12 - Estudo do Comportamento Mecânico dos Solos Camapum de Carvalho & Pereira, (2001).

## 2.5 - SOLOS COMPACTADOS

O processo de compactação é uma técnica que visa à redução do índice de vazios através da expulsão de ar dos seus poros. Tem por objetivo a obtenção de um material que tenha um comportamento adequado para a aplicação a que se destina.

Os solos não saturados formados pelo processo de compactação são muito heterogêneos, com grupos de partículas que formam agregados. Os pequenos vazios dentro dos agregados estão geralmente cheios de água, de tal maneira que cada agregado individual consiste em um solo saturado. Os vazios interagregados estão cheios de ar ou com uma mistura de ar e água, de tal maneira que o solo está não saturado. De acordo com Martínez (2003), a poropressão negativa que se desenvolve durante a compactação gera um acréscimo de resistência ao cisalhamento, especialmente em solos finos compactados.

A compactação gera no solo deformações permanentes que modificam suas propriedades originais causando entre outros, os seguintes efeitos: densificação do solo, aumento da resistência ao cisalhamento, redução da compressibilidade, redução da condutividade hidráulica, redução da erodibilidade. Estes são alguns dos efeitos importantes, porém a compactação também altera a estrutura do solo e modifica a anisotropia de suas propriedades mecânicas (Morel, 1980; Balmaceda, 1991, *apud* Martínez, 2003). Segundo Fredlund (1997), os fatores como o teor de umidade de compactação, a energia de compactação e o método de compactação empregado devem ser controlados, pois solos compactados em teores de umidades iniciais diferentes e/ou densidades diferentes apresentam comportamentos diferenciados.

A secagem prévia dos solos tropicais a partir de seu teor de umidade *in situ* pode modificar as propriedades determinadas com ensaios de caracterização e compactação. Conseqüentemente, as amostras de solo têm que ser preparadas e ensaiadas com grande cuidado. A influência dos procedimentos de preparação das amostras e de ensaios de laboratório pode ser significativa.

As diferenças entre as densidades obtidas em ensaios de laboratório e aquelas medidas após a compactação em campo podem ser maiores para solos tropicais residuais que para solos sedimentares. A energia aplicada pela compactação no campo pode não ser suficiente para produzir uma ruptura estrutural completa do solo, a qual é obtida com maior facilidade em ensaios de laboratório.

A compactação freqüentemente resulta numa progressiva quebra das partículas. Neste caso, é imperativo não reutilizar solo em cada ponto da curva de compactação, caso contrário, as características de compactação do solo são modificadas progressivamente com o avanço do ensaio e, desta forma, os resultados podem ser enganosos.

### **2.5.1 - Estrutura dos Solos Compactados**

Nesta tese, o termo estrutura se referirá à distribuição e orientação do conjunto das partículas sólidas do solo, incluindo os aspectos relacionados com o arranjo das partículas, agregados de partículas e vazios do solo. A formação de um determinado tipo de estrutura é determinada em função do tipo de solo, teor de umidade, intensidade e forma de aplicação da energia de compactação, sendo a estrutura um dos fatores de maior importância na determinação do comportamento de um solo (Mitchell & Sitar, 1982).

A estrutura de um solo deve ser analisada em dois níveis de escala, o microestrutural e o macroestrutural. O nível microestrutural diz respeito a associações de partículas dentro do solo e o nível macroestrutural diz respeito a arranjos de agregados dentro da massa de solo. Nos solos argilosos compactados estão presentes os dois níveis de estrutura. Analogamente, segundo Mitchell (1993) *apud* Martínez (2003), a microestrutura do solo é descrita como a associação elementar de partículas dentro do solo, considerando o arranjo dos agregados do solo como a macroestrutura.

O fenômeno de agregação de partículas é corrente nos solos argilosos e tem sido demonstrado por vários autores. Porém, muitas vezes não se consideram os aspectos relativos à porosimetria. Tipicamente, os macros e microníveis da estrutura estão presentes nos solos argilosos naturais e compactados. A macroestrutura resultante de amostras preparadas a diferentes teores iniciais de compactação é diferente, apesar de sua mineralogia, textura e método de preparação idêntica. Queiroz de Carvalho & Simmons (1997) comentam que o arranjo estrutural, junto com a mineralogia do solo, determina o comportamento de engenharia. O aspecto mais relevante da estrutura no comportamento de engenharia é o macroestrutural (que pode ser observado sem microscópio).

Nos solos não saturados, a estrutura é especialmente importante devido à influência na interação das três fases constituintes do solo e no fenômeno de transferência de sucção. Neste sentido, o desenvolvimento da dupla camada iônica em solos argilosos e da sucção no solo são dois aspectos de fundamental importância para seu entendimento.

Alonso *et al* (1987) comentam que na atualidade considera-se a estrutura interna do solo, de forma simplificada, tendo em conta os elementos: partículas elementares e agregados de partículas e acrescentam os elementos: poros de ar e de água. A partir destes elementos, pode-se estabelecer três estruturas fundamentais que simplificam o conjunto de todas as estruturas possíveis (Figura 2.13). Quando as partículas elementares estão distribuídas de forma homogênea, considera-se uma estrutura do tipo matricial com grãos de areia rodeados de partículas argilosas elementares criando uma matriz. Às vezes, as partículas elementares estão agrupadas como se fosse um grão de tamanho maior. Neste caso, a microestrutura é formada por agregados. Os autores mostram que uma estrutura de grãos de areia pode possuir conectores de argila entre os grãos, ou contatos diretos, sem partículas de argila.

Os solos compactados no ramo úmido da curva de compactação correspondem à estrutura do tipo matricial. Por outro lado, os solos compactados no ramo seco, ou que tenham tendência ao colapso, costumam apresentar microestrutura de agregados ou com conectores de argila.

No que se refere à sucção matricial, a composição mineralógica das partículas afeta a sua componente de adsorção e a geometria interna, a sua componente capilar. Isto gera um estado de tensões que incrementa as tensões interpartículas, enrijecendo a estrutura do solo e deixando-a mais resistente. No caso de solos com mesmo índice de vazios, a distância entre partículas tem uma maior variação nas estruturas floculadas que nas dispersas. Como consequência, em processos de secagem, os primeiros têm maior sucção capilar (Romo *et al*, 1979 *apud* Martínez, 2003).

Em relação aos solos granulares, a estrutura é simples, com partículas de forma arredondada ou angulosa, cujo principal constituinte é o mineral quartzo, podendo ainda ocorrer à presença de mica e feldspato. As partículas arenosas podem ser denominadas de “material inerte”, ou seja, material onde predominam esforços de natureza gravitacional, gerando um arranjo em que as partículas se apóiam diretamente umas sobre as outras. A compactação de solos arenosos é apenas um processo de densificação do material.

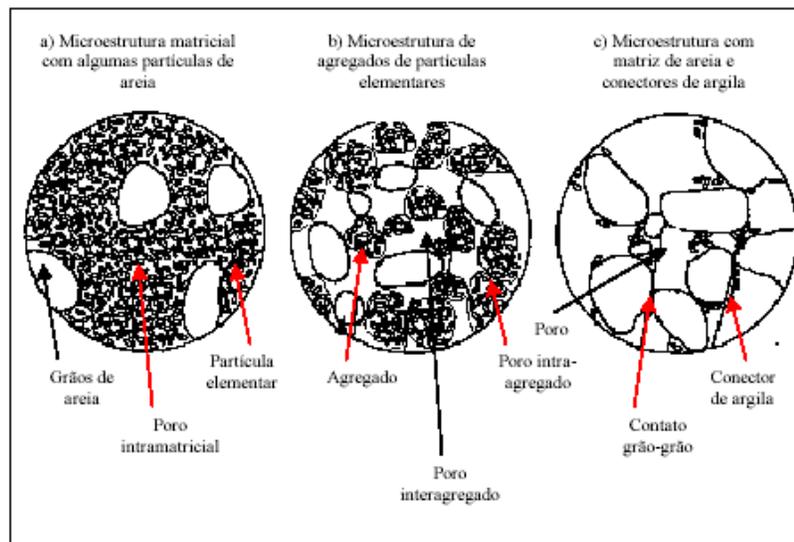


Figura 2.11. Tipos de estrutura do solo (Alonso *et al*, 1987).

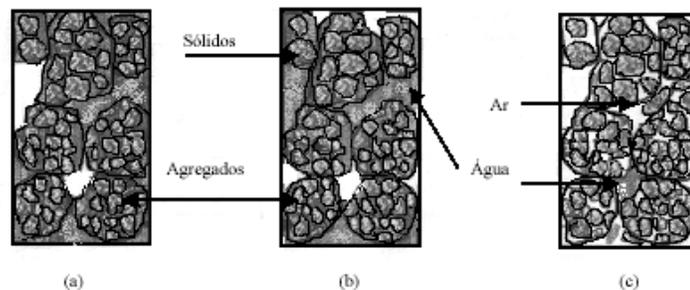


Figura 2.13 - Estruturas de Solos Compactados. a) Água contínua e ar descontínuo; b) Ar e água descontínuos e c) Ar contínuo e água descontínua (Alonso *et al.*, 1987).

Para os solos argilosos compactados, vários fatores interferem na sua formação estrutural, citando-se a composição mineralógica, o teor de umidade, as forças internas entre partículas e os esforços externos. A energia de compactação em conjunto com o teor de umidade empregado é um dos determinantes do tipo de estrutura. O teor de umidade influencia no desenvolvimento de forças de repulsão responsáveis pela dupla camada iônica.

Os efeitos da estrutura nos solos compactados são evidenciados pelos resultados de ensaios de condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica é tanto menor quanto mais compacto for o solo para o mesmo teor de umidade.

O teor de umidade de compactação proporciona o aparecimento de dois tipos de estruturas: a estrutura é floclada, quando o material for compactado no ramo seco da curva de compactação e dispersa, quando compactado no ramo úmido. Na estrutura floclada, as partículas ficam em contato face-aresta. Na estrutura dispersa, as duplas camadas difusas são formadas e as partículas tendem a se dispersar, tomando uma orientação paralela entre si. Os solos com estrutura floclada apresentam maior contração, maior expansividade, maior condutividade hidráulica e maior resistência, quando submetidos a pequenas deformações de cisalhamento, que os solos de estrutura paralela dispersa (Jucá, 1990 *apud* Martínez, 2003). Para solos compactados no teor de umidade ótimo, com a energia de compactação Proctor Normal, tem-se uma estrutura intermediária entre estes dois tipos.

## **2.6 – PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO**

Segundo Santana & Gontijo (1987), pavimento de baixo custo é aquele em que se maximiza o uso de materiais locais, visando um custo mínimo, segundo especificações consagradas pela experiência regional em detrimento de especificações ortodoxas. A construção de pavimentos com a otimização do uso de materiais locais proporciona a redução de custos favorecendo a viabilidade da obra.

Para Villibor *et al.* (2000), pavimento de baixo custo é caracterizado por utilizar base de solos lateríticos “*in natura*” ou em misturas cujos custos de execução são substancialmente menores que os das bases convencionais, constituídas quase sempre de solo-cimento, brita graduada com ou sem cimento ou macadame hidráulico; utilizar revestimento betuminoso do tipo tratamento superficial, com espessura de, no máximo, cerca de 3,0 cm e freqüentemente, da ordem de 1,5 cm; abranger um tráfego dos tipos muito leve, leve e médio, com VMD máximo inicial da ordem de 1000 veículos, com cerca de 20% a 35% de caminhões e ônibus.

Ainda segundo os autores, os pavimentos de baixo custo devem ser entendidos como aqueles que, durante sua vida de projeto, tenham um custo global, ou seja, custo de construção, conservação e operação, menor quando comparados aos pavimentos tradicionais.

### **2.6.1 – Pavimentação com Argilas Lateríticas**

Segundo Villibor *et al.* (1995), a idéia de se utilizar argilas em bases de pavimento baseia-se na elevada capacidade de suporte destas quando compactadas, submetidas ou não à secagem. Os autores citam que a primeira pista experimental executada com argila laterítica foi construída no início da década de cinquenta, num dos acessos à cidade de Campinas (SP). Nesse trecho, a argila foi envelopada com pintura betuminosa; trecho este desativado duas décadas depois, tendo apresentado aspecto similar a trechos contíguos executados com base de macadame hidráulico.

Villibor *et al.* (2000) apontam as seguintes características para uso de base e sub-base de pavimentos:

- a) Granulometria: solo argiloso nas diferentes classificações, com percentagem retida na peneira 0,075mm inferior a 30;
- b) Limites de Atterberg: o  $w_L$  em torno de 40% a 50% e o IP entre 10% a 20%;
- c) Compactação: as curvas de compactação apresentando picos acentuados e ramo seco inclinado. A densidade aparente seca sendo relativamente elevada para as argilas;
- d) Capacidade de Suporte: os valores de CBR (ou ISC) são relativamente elevados para as argilas. A perda de suporte por embebição em água por 4 dias é relativamente pequena nas condições próximas à ótima de compactação;
- e) Contração / Expansão: apresentam expansão praticamente desprezível quando compactada nas condições ótimas e, em seguida, imersa totalmente em água. A contração por secagem de corpos de prova, nas mesmas condições, é geralmente elevada;
- f) Módulo de Resiliência: quando compactadas nas condições ótimas da energia normal ou intermediária, apresentam características bilineares de argilas e, ainda, apresentam considerável dependência da pressão de confinamento.

Ainda segundo os autores, o uso de argila lateríticas em bases apresenta vários problemas, como:

\*contração elevada por perda de umidade, resultando em trincas de grandes aberturas (muitas vezes superiores a 1mm),

\*cravação da pedra em caso de tratamento superficial delgado, resultando em exsudação de material betuminoso,

\*módulos de resiliência relativamente baixos para elevadas tensões de confinamento e tensões desvio, elevada deformação permanente nessas condições.

### **2.6.2 – Pavimentação com Solo Arenoso Fino Laterítico**

Segundo Villibor *et al.* (1996) o material usado para a pavimentação é caracterizado pela natureza laterítica de seus componentes que passam na peneira 0,075mm e por uma granulometria bastante fina, passando às vezes quase que integralmente na peneira de 0,42mm. Este tipo de base é usada, sobretudo para tráfego leve a médio, com uso de revestimento betuminoso delgado (inferior a 3,0cm).

Para que um solo arenoso possa ser considerado apropriado para base deve ter, na densidade máxima da energia intermediária do mini-Proctor, as seguintes características:

- \* Mini-CBR, sem imersão  $\geq 40\%$
- \* Perda de suporte por imersão  $\leq 50\%$
- \* Expansão, sem sobrecarga padrão  $\leq 0,3\%$
- \* Contração: 0,1 a 0,5%
- \* Coeficiente de sorção:  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  cm/min<sup>1/2</sup>

### **2.7 – ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS**

A melhoria das propriedades físicas dos solos e a estabilização das propriedades favoráveis podem ser atingidas de várias formas. Esses métodos podem ser classificados, segundo Kezdi (1979) *apud* Nunez (1991), em três categorias:

- a) Métodos mecânicos que asseguram ao solo estabilidade sem a mistura de aditivos. Assim, as propriedades podem ser melhoradas por compactação, drenagem e/ou pela mistura de diferentes tipos de solos.
- b) Métodos físicos: reações físicas que conduzem à estabilização incluem: de temperatura, a hidratação, evaporação e adsorção.
- c) Métodos químicos: as reações químicas que proporcionam a estabilização do solo são: a troca de íons, a precipitação, a polimerização e a oxidação.

Dos pontos de vista técnico e econômico, vários dos métodos acima podem ser adaptados para solucionar um problema. Em relação ao solo, os seguintes fatores devem ser considerados de forma a selecionar o melhor método: propriedades do solo no estado natural, propriedades desejadas para o solo estabilizado e efeitos no solo após a estabilização. Nesta última categoria o papel mais importante é desempenhado pelo caráter, magnitude e frequência das solicitações e pelos efeitos meteorológicos, tais como a secagem, umedecimento, congelamento, lixiviação, etc (Nunez, 1991).

Os solos argilosos são considerados na Engenharia Rodoviária como materiais problemáticos, tanto no que concerne a trabalhabilidade, quanto ao comportamento. Isto ocorre devido as suas características de expansão, contração e plasticidade, que se apresentam frequentemente elevadas, além de sua grande sensibilidade às variações de umidade. A estabilização destes materiais possibilita utilizar solos locais, dispensando assim, os custos provenientes de distâncias de transporte elevadas. Vogt (1967) *apud* Balbo (1996), define estabilização de um solo como “uma modificação de suas propriedades geotécnicas por adição de outro material, (seja ele composto por um ligante ou fração granulométrica) que deverá ser intimamente incorporado ao solo, e uma subsequente compactação da mistura”. Tal definição é apropriada quando se consideram dois aspectos: a presença de um ligante ou correção granulométrica e a necessidade de compactação da mistura. No entanto, esta tese enfocará apenas a estabilização química do solo com diferentes teores de cal cálcica hidratada, uma vez que de acordo com Ormsby & Kinter (1973) *apud* Nunez (1991) a adição de cal cálcica dá maiores resistências do que a dolomítica para os solos ricos em caulinita.

As soluções para a estabilização química de solos para fins rodoviários são bastante discutidas na literatura. Têm-se estabelecidos princípios teóricos que procuram explicar os respectivos mecanismos de atuação dos agentes estabilizantes.

A análise do comportamento dos solos tropicais estabilizados requer, no entanto, uma análise mais detalhada dos aspectos químicos e mineralógicos e a consideração do efeito da sucção no comportamento da mistura.

## **2.7.1 - Estabilização do Solo com Cal**

### **2.7.1.1 - Introdução**

A estabilização solo-cal em estradas pode ter vários objetivos, tais como: modificar o solo pela cal, com vistas a acelerar o processo construtivo; melhoria do subleito; melhoria da

resistência e durabilidade dos solos de graduação fina, para aplicação em camadas de pavimentos rodoviários (Bueno *et al.*, 1995 *apud* Rezende, 2003).

### **2.7.1.2 - Mecanismo de Estabilização Solo-Cal**

Segundo Nóbrega (1991), as alterações hídricas e mecânicas promovidas pela cal no solo resultam dos seguintes tipos de reação da cal em ocasiões distintas: troca catiônica, ação pozolânica e carbonatação.

A Troca Iônica reflete uma ação imediata que promove após alguns instantes de contato da cal com o solo, mudanças nas propriedades físicas da mistura. A literatura geralmente considera que são alterados:

- a granulometria, pela floculação das partículas originais;
- os limites de Atterberg, cuja alteração mais notável se relaciona ao limite de plasticidade, que normalmente aumenta;
- na compactação, para uma mesma energia, ocorre diminuição do valor da densidade máxima seca e aumento do valor da umidade ótima;
- a expansão e contração, que sofrem uma redução de valores, ou seja, uma menor variação volumétrica;
- acréscimo na capacidade de suporte.

Segundo Fossberg & Greg (1963) *apud* Guimarães (2002), o fenômeno das trocas das bases ocorre com os argilominerais. Essa reação leva à floculação das partículas argilosas, causando o aumento no ângulo de atrito da massa de solo. São consideradas como origem do fenômeno de “capacidade de troca catiônica”: a ruptura das ligações iônicas nas arestas das unidades estruturais sílica-alumina, liberando cargas não compensadas; a substituição no interior da estrutura molecular do cátion alumínio (trivalente) dos tetraedros por silício (tetraivalente) ou do alumínio (trivalente) dos octaedros por íons de valência menor, particularmente o magnésio; a substituição do hidrogênio das hidroxilas externas por cátion permutável. Na caulinita e haloisita os cátions trocáveis são geralmente resultantes da quebra das unidades estruturais, o que rompe o equilíbrio original. Na montmorilonita e na vermiculita os cátions trocáveis, na maioria das vezes situam-se nas superfícies basais, ocorrendo à substituição dos íons alumínio ou silício do interior das estruturas.

É importante ressaltar ainda que, a quantidade de cátions trocáveis varia com o tipo de mineral argiloso, com a granulometria, com as concentrações, com a posição estrutural e

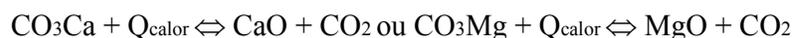
natureza dos cátions, com a espécie de ânion ao qual se acham ligados os cátions nas soluções percolantes e com a temperatura.

Eades e Grim (1960) *apud* Nunez (1991), ao observarem os resultados das reações entre hidróxido de cálcio e diversos argilominerais, notaram que: a) a caulinita e a cal reagem facilmente; b) a illita e a montmorilonita exigem maior teor de cal para início das reações; c) o difratograma de raios-X de misturas caulinita-cal mostrou a formação de silicato hidratado de cálcio em torno de um núcleo argilomineral, sendo que o ataque da cal a caulinita inicia pelas arestas; d) ao passo que a adição da cal proporciona ganhos imediatos de resistência a caulinita, para a illita e a montmorilonita esses ganhos somente acontecem após a saturação das camadas com íons cálcio e a destruição do argilomineral. Concluíram, portanto que, como o aumento da compressão simples é acompanhado de mudanças estruturais, ela é permanente.

A ação pozolânica ocorre a longo prazo e, se fundamenta no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. Segundo Nóbrega (1991), um material com características pozolânicas é aquele que em combinação com a cal e em presença da água, sob condições de temperatura ambiente, produz compostos estáveis com propriedades ligantes.

De acordo com Eades e Grim (1962) *apud* Guimarães (2002b), a reação pozolânica é lenta e só se completa alguns anos depois, requer temperatura acima de 21°C e o mínimo de algumas semanas para sua ocorrência. Em temperaturas maiores, a reação pode ser acelerada, ocasionando um possível ataque da sílica (quartzo) granular presente no solo. Além da temperatura, do grau de cristalinidade dos minerais e do teor de água existente no sistema, o tipo de argila, as condições climáticas e a compactação imediata aparecem como fatores que influenciam na química cal/solo.

A Carbonatação de origem diferente das anteriores, também é de ação imediata. Trata-se da combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar absorvidas e retiradas por ocasião da realização da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução do sol-cal. A reação tende a refazer o carbonato original, visto que a decomposição pelo calor, é uma reação reversível. Tem-se então:



Desse fato resulta a ação cimentante da cal, pois ela faz aparecer um novo corpo sólido, que se entrelaça com os demais do solo e, compacta o sistema. Com o aparecimento do carbonato, “que é um cimento fraco” surgem grãos de dimensões bem maiores, em face da

diferença das estruturas cristalinas unitárias entre a do carbonato e a do primitivo hidróxido de cálcio. Esta reação complementa as ações da troca iônica e da ação pozolânica.

### **2.7.1.3 - Solos apropriados para a Estabilização com Cal**

No emprego das misturas solo-cal considera-se, de modo geral, os solos de granulometria fina, onde a cal possa ser utilizada como um agente estabilizador. A ação da cal nestes solos está ligada a fenômenos de trocas catiônicas, responsáveis por efeitos de floculação, e das reações pozolânicas, responsáveis pelos efeitos de cimentação (Lima & Bueno, 1995). É de consenso entre os pesquisadores (Guimarães, 1971; Queiroz de Carvalho 1988; Cavalieri, 1998) que a troca catiônica provoca, em geral, mudanças na plasticidade do solo e pode dar origem, também, a pequenos aumentos na resistência mecânica das misturas solo-cal, enquanto que as reações pozolânicas, quando ocorrem resultam em consideráveis ganhos de resistência mecânica.

Segundo Nunez (1991) é importante conhecer os mecanismos de reação da mistura solo-cal, neste sentido merece destaque à definição de Thompson (1966) sobre a denominação de solos reativos. O autor destaca que solos reativos são aqueles que ao reagirem com a cal sofrem substancial ganho de resistência, qual seja,  $345 \text{ kN/m}^2$  após 28 dias de cura à temperatura de  $22,8^\circ\text{C}$ . Solos que apresentam limitada reatividade pozolânica, ou seja, ganho de resistência inferior a  $345 \text{ kN/m}^2$ , são chamados não reativos.

Para Moore & Jones (1971) a reatividade de um solo à cal é pouco correlacionada a superfície específica do solo, e menos ainda com a disponibilidade de sílica e/ou alumina dissolvida. Constataram, entretanto, que a reatividade à cal parece ser fortemente inibida pela presença de ferro pulverizado, distribuído de forma homogênea através da massa do solo; uma condição típica de perfis bem drenados.

Resultados diferentes foram apresentados por Harty & Thompson (1973). Esses pesquisadores desenvolveram estudos, visando identificar as propriedades de solos tropicais e subtropicais que afetem a velocidade de reação e o máximo potencial de reação da cal e do solo. Os autores adotaram ainda o sistema americano de classificação de solos (“Soil Taxonomy”), dividindo-os em oxissolos e ultissolos; designações definidas por Fontes & Fontes (1982) *apud* Harty & Thompson (1973) da forma a seguir apresentada. “Os oxissolos apresentam um horizonte óxido, caracterizado por concentração relativa de óxidos livres, argilas pouco ativas e virtual ausência de minerais de fácil intemperização. Os ultissolos possuem um horizonte argílico e suficiente grau de lixiviação e alteração para produzir baixa

saturação de bases em todo o solo”. Finalmente como parâmetro de reatividade foi adotado o critério de Thompson (1966).

As principais conclusões formadas foram as seguintes: a) nenhuma propriedade do solo é suficiente, por si só, para prever com precisão a reatividade de solos intemperizados, tropicais ou subtropicais, à cal; sendo necessário pelo menos duas propriedades; b) a quantidade de sílica ou alumina necessária para a ocorrência de reações pozolânicas parece ser relativamente pequena; c) o tipo de processo de intemperismo que predominou num perfil de solo influencia significativamente o potencial de reatividade do solo à cal; d) para os ultissolos, o pH do solo é um índice confiável tanto de intemperismo quanto de reatividade à cal. De forma semelhante, a CTC e a porcentagem de saturação de bases são indicadores confiáveis de reatividade à cal nos ultissolos; e) para os oxissolos, a relação sílica/sesquióxidos e, em menor extensão, a relação sílica/alumina, são excelentes indicadores de intemperismo e de reatividade à cal; f) a drenagem do solo, o teor de ferro removível, a presença de carbonatos livres e de sulfatos não são de valor como índices de reatividade à cal em solos intemperizados, tropicais e subtropicais; g) os teores de cal para maximizar resistências de solos, nas regiões tropicais e subtropicais, são maiores do que em regiões de clima temperado.

Também Brandl (1981) afirmou que a quantidade de sílica removível pode ser um critério prático para avaliar a reatividade do solo à cal. Outros critérios, tais como classificação, a textura e a plasticidade, já foram indicados como critérios práticos para avaliar a reatividade do solo à cal.

Finalmente cabe destacar o trabalho de Queiroz de Carvalho & Cabrera (1979), que descreveram um método simples para avaliar a reatividade de solos vermelhos tropicais à estabilização com cal. O método consiste em calcular a diferença de capacidade catiônica (DCTC), que é definida como sendo a diferença entre a CTC medida num meio alcalino (pH=10) e a CTC medida num meio neutro (pH=7). Ainda segundo os autores, a DCTC é altamente correlacionada com o critério de Thompson (1966) e serve de base para a classificação de solos proposta pelos autores. Assim, os solos com DCTC inferior a 1,0 miliequivalentes/100g são ditos não reativos; os que apresentam DCTC maior ou igual a 1 e menor do que 1,5 meq/100g são reativos e próprios para sub-bases e subleitos, e os com DCTC não inferior a 1,5 meq/100g são altamente reativos e próprios para bases.

#### **2.7.1.4 - Alteração nas Propriedades Mecânicas dos Solos devido à Adição da Cal**

A estabilização com a cal tem um caráter químico, por isso o conhecimento da natureza da fração argila passa a ter uma grande importância. Esses constituintes são responsáveis por vários aspectos do comportamento hídrico-mecânico do solo (plasticidade, expansão, contração, etc) e pela reatividade com o agente estabilizador. Não há um perfeito e completo conhecimento sobre as modificações provocadas pela adição de cal no solo argiloso tropical brasileiro. Faltam estudos e pesquisas específicas de petrografia, de análise térmica diferencial, de microscopia eletrônica de varredura, de difratometria de raios-X e análises químicas e físicas, do solo natural e tratado.

Rezende (2003), ao analisar o comportamento de dois solos tropicais finos do Distrito Federal, concluiu serem as análises químicas, mineralógicas e estruturais fundamentais para se entender o comportamento desses solos. Ainda segundo a autora, a flocculação ou a deflocculação de um solo tropical por adição de cal depende de sua composição química, sendo as propriedades e comportamento do solo estabilizado por ela afetados.

É importante se destacar que há um consenso entre os pesquisadores ao afirmarem que, de um modo geral, a cal afeta favoravelmente certas propriedades dos solos com presença de argilas, o que se reflete em variações de certas características físicas. São elas:

##### a) Granulometria:

A principal consequência da adição de cal ao solo de natureza físico-química é a aglomeração e a flocculação por troca iônica, processada nas argilas reativas, produzindo um solo mais grosseiro, mais permeável e mais friável. Em geral, a influência da cal na granulometria é tanto maior quanto mais fino e argiloso é o solo inicialmente, pois mais destacada é a alteração textural com a agregação e flocculação das partículas.

##### b) Alteração nos Limites de Atterberg:

A cal quando misturada ao solo modifica o seu estado de plasticidade, variando o limite de plasticidade para alguns minerais argilosos (caso das halositas e montmorilonitas), devido à composição do cátion trocável, a presença de outros minerais não argilosos, às variações relativas à estrutura e à composição no interior das estruturas argilosas. Portanto, as montmorilonitas contendo sódio e cálcio, mostram índices conforme a abundância desses íons.

Nos minerais compostos de argilas, (excluindo-se a montmorilonita), outros fatores, tais como a presença de minerais não argilosos, ocasionam maiores variações nos limites de plasticidade do que a composição dos cátions trocáveis. Cita-se, por exemplo, que, a adição de cal, em argilas com ou sem cátions trocáveis, aumenta o índice de plasticidade, tornando o solo portador de minerais sujeitos às variações do limite de plasticidade. No entanto, segundo Hilt & Davidson (1960) *apud* Nunez (1991) existe um teor de cal a ser incorporado nos solos, até o qual a sua adição contribui para a melhoria na trabalhabilidade do solo, sem produzir aumento de resistência. Esse teor, denominado “lime fixation point” (LFP), seria o ótimo para a modificação da plasticidade. Para teores de cal superiores ao LFP, o solo ganha resistência, sem ter o IP e a trabalhabilidade afetados.

Quanto ao limite de liquidez dos solos de mesma fração argilosa pode este variar entre largos limites. Em escala decrescente de  $w_L$ , Grim (1966) *apud* Guimarães (1971) alinha os minerais argilosos na seguinte ordem: montmorilonita (sódica ou lítica), atapulgita, montmorilonita (cálcica ou potássica), illita, caulinita (com cristalização incipiente ou fraca), haloisita  $4H_2O$ , haloisita  $2H_2O$  e caulinita bem cristalizada. Tal como o limite de plasticidade, a adição de cal ao solo eleva o limite de liquidez.

O índice de plasticidade é decorrente das mudanças anteriormente citadas. Também varia entre largos limites. Grim (1966) *apud* Guimarães (1971) coloca as argilas na seguinte ordem decrescente em relação ao índice de plasticidade: montmorilonita, atapulgita, illita, caulinita (incipiente ou fracamente cristalizada), haloisita  $2H_2O$ , caulinita bem cristalizada e haloisita  $4H_2O$ . A adição de cal aos solos argilosos faz decrescer o grau de plasticidade do solo, reduzindo, portanto, os defeitos para construção que os solos argilosos apresentam. É importante ainda ressaltar que, dentro do conceito de “lime fixation point” foram estudados por Pietsch e Davidson (1962) *apud* Nunez (1991), 20 solos do estado de Iowa e, verificado que a adição da cal até um teor igual ao LFP aumentava o IP dos mesmos.

Mateos (1964) *apud* Nunez (1991) observou que solos argilosos e siltosos tratados com cal melhoram quanto à plasticidade e a contração e adquirem aparência de friáveis.

Brandl (1981), ao analisar o comportamento dos limites de atterberg de solos estabilizados, afirmou que a transformação estrutural e a floculação começam imediatamente após a adição de cal. Quanto à fração coloidal do solo, ou seja, quanto maior a atividade da argila, tanto maior o decréscimo do LL. Brandl (1981) verificou que o LL e o LP de misturas de solo e cal aumentam com o tempo.

c) Alterações nas mudanças de volume:

A adição da cal aos solos causa redução brusca da expansão. As argilas transmitem ao volume dos solos uma importante instabilidade nos ciclos climáticos, das chuvas e das secas, o que atinge toda a espessura de suas camadas, devido à facilidade com que a água se movimenta nos poros do solo, pela força da gravidade e da capilaridade. Mielenz & King (1955) *apud* Guimarães (1971), comentam que a expansão é determinada por vários fatores, dos quais se destacam a percentagem de argila presente, seus íons trocáveis, teor de eletrólito da fase líquida, a dispersão granulométrica dos grãos do solo, a distribuição e tamanho dos poros, a estrutura interna do solo, a quantidade de água circulante e a carga estática ou variável existente sobre o solo. Ainda segundo estes autores a expressão da expansão, dos vários tipos de argila obedecem à seguinte ordem decrescente, apesar de existirem, é certo, outros argilominerais expansivos, como é o caso da vermiculita e da clorita expansivas: montmorilonita, illita, haloisita e caulinita. Esta ordem se apresenta como função de dois mecanismos: o alargamento dos filmes capilares intercristais e a expansão da estrutura mineral. O fenômeno inverso, a contração devido à secagem do solo pode reduzir de modo significativo os vazios do solo, diminuindo a percolação da água livre. O menor diâmetro dos canalículos gera, no entanto, um maior avanço de frentes capilares de umedecimento. Nos solos tropicais intemperizados, tanto a escassez de argilominerais expansivos como a estrutura cimentada por óxidos ou hidróxidos de ferro e alumínio limita o fenômeno de expansão e retração.

Segundo Guimarães (1971), a cal tende pela flocculação das partículas, a reduzir as mudanças de volume apresentadas pelos solos. Por outro lado, a cal tem maior influência nos solos que apresentam mudanças rápidas de volume de água. No entanto, de acordo com Rezende (2003), a cal pode atuar como agente desagregador em alguns solos tropicais. A autora concorda com tal afirmação acrescentando-se ainda que tal comportamento depende, do teor de cal, da umidade e energia de compactação usada.

d) Alteração na Acidez do Solo:

Quando a água circula pelos espaços intersuperficiais das partículas das misturas solo-cal, esta se enriquece gradualmente dos íons aí presentes, redistribuindo-os e, devido à adsorção, permanece retida, envolvendo as partículas minerais.

No complexo água-colóide-mineral do solo podem existir adsorvidos diferentes quantidades de cátions, isto é,  $H^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ , entre outros. A soma total desses cátions adsorvidos pode atingir o máximo permitido pela capacidade de troca de cátions.

Quanto maior a quantidade de bases presentes, menor é a quantidade de hidrogênio adsorvido pelos colóides do solo. Havendo menor quantidade de hidrogênio adsorvido, menor será a quantidade de hidrogênio que passa para as soluções circulantes no solo, portanto menor será a acidez medida nas soluções do solo. Esta característica é representada pelo pH. Qualquer que seja a reação inicial do solo, processando-se a circulação de água, há a uma tendência natural a acidificações, visto que as bases, geralmente mais solúveis, são removidas e o hidrogênio toma seus lugares nas estruturas cristalinas ou nas micelas de natureza coloidal. Quanto mais úmido e quente o clima, mais rápido é o processo de acidificação natural do solo. O cátion  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ , que se encontra normalmente nos solos nesse tipo de clima, tende a ser substituído rapidamente pelo íon  $\text{H}^+$  proveniente do ácido carbônico que é extremamente ativo e resultante da dissolução do  $\text{CO}_2$  atmosférico pelas águas de chuvas e pelas que circulam na superfície, encaminhadas ao solo por infiltração. Inversamente, quando se incorpora cal ao solo é permitida a substituição do  $\text{H}^+$  pelos cátions  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ , modificando-se gradativamente o pH de ácido para alcalino e, portanto, seus comportamentos físicos, físico-químicos e químicos (Guimarães, 1971). Nos solos tropicais ocorre ainda, conforme mostrado por Rezende (2003), a substituição do cátion  $\text{Al}^{3+}$ .

#### e) Alteração na Resistência:

Guimarães (1971) cita como principais fatores que afetam a resistência da mistura sol-cal: o teor de cal, o tipo de solo, a densidade, o tempo de cura e a qualidade da cal. Boynton (1966), Dantas (1970) & Pinto (1964) *apud* Guimarães (1971) mostram a melhoria das resistências dos solos com as adições de cal qualquer que seja o método utilizado para as avaliações, no entanto, é mais usada a resistência à compressão simples. Pinto (1985) afirma que a resistência, de maneira geral, cresce com a percentagem de cal, havendo uma tendência deste ser pequeno após certo teor do aditivo, entretanto, tal fato depende do tempo de cura.

##### e.1) Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O índice de suporte é o valor de resistência usado para o dimensionamento dos pavimentos, portanto é parâmetro essencial a ser determinado para as misturas solo-cal. De acordo com Mateos (1964) *apud* Nunez (1991), o índice de suporte califórnia (ISC) de um solo fino aumenta instantaneamente com a adição de cal, e continua aumentando com o tempo de cura, se o teor de cal for superior ao LFP. No entanto Thompson (1975) afirmou que, o ISC não é apropriado para caracterizar a resistência de solos estabilizados com cal. Os valores de ISC para muitas misturas curadas de solo e cal

podem ser superiores a 100. Nesses casos é notório que o resultado do ensaio é de escasso significado prático. Mas, se as reações pozolânicas não tiverem se desenvolvido, como no caso de amostras não curadas, o ISC pode servir como um indicador geral de resistência.

#### e.2) Resistência à Compressão Simples (RCS)

De acordo com Pietsch & Davidson (1962) *apud* Guimarães (1971), as curvas das resistências à compressão simples, após 28 dias de cura, mostram conforme o tipo e a qualidade do solo um dos aspectos seguintes: a) a resistência aumenta gradativamente com a adição da cal, até um pico, com leve decréscimo nessa ascensão antes de atingi-lo. Após o pico, a resistência diminui com os acréscimos adicionais de cal; b) a resistência aumenta, permanece constante ou diminui levemente, com as primeiras adições de cal, até um certo ponto; após esse ponto aumenta bruscamente com novas adições de cal até o pico; após o qual permanece constante ou aumenta, ou diminui ligeiramente com outras adições de cal; c) a curva de resistência comporta-se como a anterior, inicialmente, porém, cresce continua e lentamente com as adições posteriores de cal; d) a resistência mostra aumento insignificante e indiferente à quantidade de cal adicionada.

Akoto & Singh (1986), ao estabilizarem laterita com cal, observaram que o aumento da RCS com o teor de cal não é linear e que as aplicações de tensões repetidas de tração e compressão aumenta a RCS residual. Os autores notaram ainda que quando as tensões de tração são elevadas às amostras de laterita tratada com cal se deformam notavelmente antes de romperem e que, o módulo resiliente aumenta com o teor de cal e com o tempo de cura e diminui com o nível de tensões e a umidade de moldagem.

O aumento da RCS de misturas solo-cal, com o aumento da energia de compactação, foi observado por Mateos (1964) *apud* Nunez (1991). Esse pesquisador também afirmou que a resistência dessas misturas é fortemente influenciada pela temperatura de cura, recomendando a construção de camadas de pavimentos estabilizadas com cal no início do verão.

Brandl (1981), analisando os efeitos da adição de cal na resistência, observou que a RCS aumenta linearmente com o logaritmo do tempo a partir do sétimo dia de cura e, que a relação permanece válida para tempos de cura de até 2 anos.

### e.3) Módulo Resiliente (MR)

Robnett & Thompson (1976) relataram melhorias no comportamento resiliente de solos com a adição de cal, mesmo para teores de umidade acima do ótimo. Salientaram, entretanto, a grande influência de elevados teores de umidade e grau de saturação nesse comportamento. Observaram igualmente, aumento do módulo resiliente com o aumento do tempo de cura. Já Svenson (1981), ao estabilizar um solo arenoso com cal, constatou que: a) o módulo resiliente é tanto maior quanto maiores os níveis da tensão desvio aplicada; b) o acréscimo do módulo resiliente com o tempo de cura não é muito significativo e nem sempre é verificado; c) o módulo resiliente aumenta com a tensão de confinamento e; d) o acréscimo de cal nem sempre conduz a um aumento do módulo resiliente.

### f) Densidade e Umidade Ótima:

A compactação da mistura solo-cal produz em geral, devido à atuação da cal na textura do solo, uma resultante de peso específico aparente diferente do correspondente ao solo natural. Segundo Dawson (1956) *apud* Guimarães (1971) a cal tende a afogar o solo, e por isso, reduzir a densidade a seco e o teor ótimo de umidade, resultando para condições idênticas de compactação essa diminuição alcançar valores de até 5%. Rezende (2003) mostra, no entanto que, tal redução nem sempre ocorre, o que também foi verificado pela autora. Herrin & Mitchell (1961) *apud* Nunez (1991) afirmaram que a mudança no peso específico aparente seco de um solo, pela adição de cal, não pode aparentemente, ser correlacionado com o tipo de solo, o seu IP ou seu peso específico aparente seco sem estabilizante. Mateos (1964) *apud* Nunez (1991) destaca ainda que para solos ricos em motmorilonita a adição de cal distorce a curva de compactação.

Experimentos realizados na Universidade de Iowa (USA), demonstraram que a resistência aumenta à medida que a densidade diminui na mistura solo-cal, porque há formação de novos compostos que tem propriedades físicas e químicas inteiramente diferentes das originais, proporcionando maior resistência que o solo não tratado, ainda que este se encontre mais densificado (Guimarães, 1971).

### g) Tempo de Cura, Umidade e Coesão:

Diversos autores afirmam que a resistência da mistura solo-cal aumenta com o tempo, por forças das reações químicas e físico-químicas. Em geral, a resistência do solo estabilizado aumenta rapidamente no período inicial, no entanto, à medida que a cura progride, a

velocidade de aumento torna-se cada vez menor. Este acréscimo lento é resultante das reações pozolânicas, que fazem com que, a resistência aumente, mesmo após alguns anos de idade. Vale ressaltar que, no campo e no laboratório, a resistência alcançada é, também, função das condições de umidade e de temperatura.

Em relação à durabilidade da mistura solo-cal, comumente esta é função da duração do tempo de cura, ou seja, a durabilidade cresce com o tempo de cura, sem as perturbações do tráfego e rolamento (Guimarães, 1971).

#### h) Retenção de Água:

Castro (1969) *apud* Guimarães (1971) estudou o efeito da cal nas propriedades de retenção de água nos solos, a partir da análise das curvas de sucção e observou que a variação da capacidade de retenção de água devido à adição de cal, aparentemente encontra-se relacionado à natureza da fração argilosa. Ainda verificou que as amostras com alta percentagem de caulinita mostraram apreciável aumento da capacidade de retenção de água, enquanto que amostras com predominância de illita, apresentaram diminuição nesta capacidade. Em relação a solos com predominância de argila montmorilonita, a cal cálcica fez diminuir a capacidade de retenção de água, enquanto que para a cal dolomítica não se observou nenhuma influência em termos de capacidade de retenção de água. Também, em amostras com a presença de mais de um tipo de argilomineral, possivelmente devido ao equilíbrio de tendências contrárias, não ocorreu efeito significativo devido à adição da cal ao solo.

Conforme Boyntn (1970) *apud* Guimarães (1971), as camadas estabilizadas com cal formam barreira resistente à água, uma vez que impedem a penetração da água, quer por gravidade (de cima para baixo) quer por capilaridade (de baixo para cima). Sendo assim, após o endurecimento da camada tratada com a cal, não ocorre perda de integridade ou amolecimento.

#### i) Compactação:

Mitchele & Hooper (1961), Andrews (1967) e Dantas (1970), *apud* Guimarães (1971), mostraram que igual compactação imediatamente e 24 horas após a mistura ocorreu diminuição da densidade e da resistência. No entanto, não há consenso entre os pesquisadores, quanto à cura e compactação, principalmente em relação à ordem de realização destas. Segundo Chauvel & Nóbrega (1980) deveria ocorrer um período de cura antes da compactação, recomendando ou não uma pré-compactação leve durante esse tempo. Todavia,

Mateos & Davidson (1963) e Lê Roux (1969) *apud* Chauvel & Nóbrega (1980), fazem restrições a essa prática, indicando que a cura deveria se processar no material já compactado. A partir de estudos das características da compactação solo-cal e da influência dos fatores que interferem na mesma (o teor de umidade, a temperatura, a energia de compactação, o efeito do tempo de espera entre a mistura e a compactação), Mateos & Davidson (1963) *apud* Chauvel & Nóbrega (1980), concluíram que a compactação deve ser feita logo após a mistura para que não ocorra perda nos valores de resistência, devido a carbonatação. Guimarães (1971) acrescenta que a eficiência da cal como estabilizador de solo depende da intensidade das reações relacionadas com a mineralogia do solo, do método de construção e da qualidade da cal utilizada.

Quanto ao comportamento de estruturas de pavimento executadas com cal, Eades *et al.* (1962) *apud* Nunez (1991) avaliaram a formação de novos minerais em subleitos estabilizados de pavimentos com três anos de idade. Através de difratogramas de raios-X observaram a formação de novos produtos (carbonatos e silicato hidratado de cálcio), semelhantes aos formados no concreto, o que garante, por analogia, a permanência da estabilização com cal. Exames microscópicos apontaram para a formação de um material cimentante em volta dos grãos maiores (quartzo, feldspato e mica). Os autores concluíram que a resistência desenvolvida pela mistura depende da quantidade da cal disponível. Quanto maior for a percentagem de finos no solo, tanto maior será a quantidade de íons cálcio necessários para que, além de satisfazer a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, haja cal disponível para as reações cimentantes que proporcionam resistência a mistura.

## **2.8 – ANÁLISES MICROSCÓPICAS**

A microscopia é uma técnica de investigação que se constitui em ferramenta útil nos estudos geotécnicos. As três principais técnicas utilizadas são as microscopias ótica, eletrônica de varredura (MEV) e de transmissão. Para se avaliar a estrutura são utilizadas as duas primeiras sendo que a microscopia de varredura permite a visualização tridimensional do solo.

No caso dos solos compactados ou estabilizados a análise por MEV é importante, pois permite comparar como evoluiu a estrutura do solo frente a esses agentes.

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um equipamento científico que usa um feixe de elétrons de alta energia para análise em detalhe. Na década de 30, com a necessidade de se ter informações em detalhes dos materiais estudados, começaram os primeiros estudos para a construção do MEV. Na época se dispunha apenas de microscópios óticos, os quais

apresentam resolução menor e poder de aumento entre 500 a 1000x. O MEV funciona como os microscópios óticos, exceto que o primeiro usa feixes de elétrons e o segundo usa luz para formar a imagem.

Os passos básicos que envolvem o MEV são:

- Uma corrente de elétrons é formada por uma fonte de elétrons e acelerada em direção à amostra, usando um potencial elétrico positivo.
- Esta corrente é confinada e focalizada, usando aberturas de metal e lentes magnéticas, a um feixe monocromático fino e condensado (não entendi esse item, reveja o original pra ver se é isso mesmo).
- Este feixe é focalizado sobre a amostra usando uma lente magnética.
- Interações ocorrem dentro da amostra irradiada, afetando o feixe de elétrons. Estas interações e efeitos são detectados e transformados em uma imagem.
- No caso de amostras de solo, para que se obtenham boas imagens, é necessário que elas sejam metalizadas.

Análise por MEV pode abranger diversos materiais: metais, polímeros, concretos, argamassas, pastas de cimento, rochas, solos e outros.

A Técnica permite trabalhar com amostras espessas, alta resolução (30Å), grande profundidade de foco e imagens tridimensionais.

Os principais detectores usados no MEV são:

- Elétrons secundários (SE):

Formação de imagens; e Informações topológicas - morfologia dos produtos.

- Elétrons retroespalhados (BSE):

Diferentes fases presentes através de tons de cinza; e Informações sobre o nº atômico médio das fases.

- Raios X

Identificar e quantificar elementos químicos presentes na amostra.

Para se fazer análises no MEV tem-se que ter noção do objetivo do trabalho, por exemplo, para se ter informações sobre diferentes fases e nº atômico médio das fases o melhor é utilizar amostras polidas e dar destaque aos elétrons retroespalhados e, se for para ter informação sobre morfologia, o melhor são amostras em fratura e usar o detector de elétrons secundários.

A MEV pode realizar análises químicas de um volume mínimo de material, na ordem de  $1 \mu\text{m}^3$ , permitindo a identificação dos elementos químicos presentes em uma determinada região de interesse da amostra. Esta microanálise (RX) compreende:

- Espectrometria por Energia Dispersiva de Raios-X - EDS - análise simultânea e rápida (qualitativa e semi-quantitativa)
- Espectrometria por Dispersão de Comprimento de Onda de Raios-X - WDS - análise demorada e mais precisa (quantitativa)

As amostras que vão ser analisadas no MEV podem ser polidas ou superfície de fratura (um pequeno fragmento). Amostras condutoras não necessitam de preparação prévia e as amostras não condutoras precisam de recobrimento da superfície com material condutor como ouro ou carbono. O fragmento de material é colado no suporte com tinta prata.

### 3 - MATERIAIS E METÓDOS

O presente capítulo apresenta os critérios de escolha dos solos estudados nesta Tese, suas localizações e as descrições de campo.

#### 3.1 – CRITÉRIO DE ESCOLHA DOS SOLOS

Os solos lateríticos da região do Distrito Federal foram o alvo deste estudo. No intuito de verificar sua aplicabilidade como materiais de construção rodoviária, foram estudadas suas propriedades *in natura* (Cardoso, 2002) e compactados (pela autora). Cabe ressaltar que os materiais aqui estudados já foram objeto de avaliações anteriores por Cardoso (2002) e Rezende (2003). Descreve-se a seguir os temas de avaliações já realizadas.

Cardoso (2002) optou pela escolha dos materiais estudados, pois, teve como objetivo a análise dos principais horizontes de solos encontrados no Distrito Federal e, ao mesmo tempo, devido à grande diversidade de propriedades químicas, mineralógicas, físicas e estruturais visando à realização de correlações entre elas. O autor apresentou um estudo embasado na estrutura original do solo, considerando seu processo de formação, composição química, mineralógica e propriedades físicas, além de análises micro-estruturais e quantificação da resistência ao cisalhamento para tensões de 25, 50, 100 e 200 kPa. Como já citado, de modo a dar continuidade ao estudo destes materiais, optou-se pela análise sob a ótica de seu aproveitamento em obras rodoviárias, como material de base e/ou sub-base de pavimentos.

Os horizontes selecionados, segundo classificação de Cardoso (2002), foram:

- ⇒ Horizonte B latossólico dos Latossolos Vermelhos de textura argilosa e de textura média;
- ⇒ Horizonte B latossólico dos Latossolos Vermelho-Amarelos de textura argilosa e de textura média;
- ⇒ Horizonte B textural do Solo Podzólico Vermelho-Amarelo;
- ⇒ Saprólito fino da ardósia (Unidade A do Grupo Paranoá);
- ⇒ Zona Mosqueada do metarritmito arenoso (Unidade R<sub>3</sub> do Grupo Paranoá);
- ⇒ Zona Mosqueada do quartzito (Unidade Q<sub>3</sub> do Grupo Paranoá);
- ⇒ Saprólito fino do quartzito (Unidade Q<sub>3</sub> do Grupo Paranoá);
- ⇒ Zona Mosqueada do metarritmito argiloso (Unidade R<sub>4</sub> do Grupo Paranoá);
- ⇒ Saprólito fino do sericita filito do Grupo Canastra;
- ⇒ Saprólito fino do quartzo-muscovita xisto do Grupo Araxá; e

⇒ Saprólito fino do metargilito do Grupo Bambuí.

Foram também avaliados os solos utilizados na compactação de camadas de base e sub-base das rodovias BR-205 oeste e do trecho entre a DF-440 e DF-001, já estudados por Rezende (2003). A autora efetuou análises laboratoriais (caracterização, compactação, expansão, determinação da resistência do solo natural compactado e do solo estabilizado e obtenção de curvas características para os teores de umidade equivalente à ótima) e, ainda ensaios em campo, durante e após a execução dos referidos trechos de rodovias. Sendo assim, visando um estudo sob a ótica de resistência considerando a não saturação e, avaliação em termos de mini-CBR, deu-se prosseguimento a análise destes materiais. Paralelamente aos ensaios realizados em laboratório foram realizados ensaios em campo visando à verificação da evolução ou desgaste, quanto à capacidade de suporte e, defeitos superficiais dos trechos experimentais.

### **3.1.1 - Solos Estudados**

Cardoso (2002) selecionou 13 pontos de amostragem, sendo que junto ao horizonte B latossólico do latossolo vermelho de textura argilosa houve a coleta em dois sub-horizontes, perfazendo um total de 14 amostras naturais. Destes pontos, foram utilizados para este trabalho, 11 pontos sendo apenas 1 sub-horizonte do horizonte B latossólico. Quanto aos solos estudados por Rezende (2003), o material solto foi coletado as margens dos dois trechos rodoviários experimentais já em atividade. A Tabela 3.1 apresenta a localização de todos os pontos em coordenadas geodésicas, cabendo observar que, se não retirados nos pontos exatos determinados pelos autores, foram bastante próximos (menos de 1m de distância). Cabe ainda ressaltar que, visando a similaridade de nomenclatura foi usada a nomenclatura estabelecida por Cardoso (2002). O autor adotou uma identificação em números arábicos crescente de acordo com a data de identificação do horizonte em campo. Quanto aos solos estudados por Rezende (2003) foi adotada sigla similar às usadas por Cardoso e, numeração distinta. Na Tabela 3.2 apresentam-se as siglas adotadas, que significam o tipo de horizonte descrito.

Na Tabela 3.3 são apresentadas às respectivas profundidades de coleta para cada tipo de solo estudado e, na Tabela 3.4 aspectos descritivos observados em campo quando da coleta das amostras de solos. Estes aspectos foram observados de forma a corroborar com o levantamento feito por Cardoso (2002), individualizando assim os horizontes de

intemperismo. O critério utilizado foi similar ao do autor, observando a olho nu e/ou com lupa de bolso, parâmetros como cor, estrutura, granulometria, vazios, presença de raízes, etc.

Tabela 3.1 - Coordenadas Geodésicas das Amostras Coletadas

| Solos | Geodésicas      | Solos | Geodésicas      | Solos | Geodésicas    |
|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|---------------|
| HB7   | 15° 44' 29" S   | ZM3   | 15° 40' 24" S   | SF13  | 16° 00' 54" S |
|       | 47° 35' 39,5" W |       | 48° 06' 02" W   |       | 48° 08' 25" W |
| HB9   | 15° 50' 18" S   | ZM5   | 15° 40' 22" S   |       |               |
|       | 47° 33' 46" W   |       | 47° 51' 11" W   |       |               |
| HB10  | 15° 35' 44,8" S | ZM6   | 15° 37' 56" S   |       |               |
|       | 47° 38' 24" W   |       | 47° 51' 17" W   |       |               |
| HB11  | 15° 37' 56" S   | SF1   | 15° 51' 34,2" S |       |               |
|       | 47° 44' 12,2" W |       | 47° 31' 53" W   |       |               |
| HB12  | 15° 56' 30" S   | SF2   | 15° 56' 30" S   |       |               |
|       | 48° 08' 36" W   |       | 47° 46' 32,2" W |       |               |
| HBR1  | 15° 32' 22" S   | SF4   | 15° 45' 20" S   |       |               |
|       | 47° 52' 27" W   |       | 47° 48' 50,4" W |       |               |
| HBR2  | 15° 41' 30" S   | SF8   | 15° 44' 41" S   |       |               |
|       | 47° 50' 00" W   |       | 47° 34' 08" W   |       |               |

Tabela 3.2 - Os Tipos de Horizontes e as Siglas que os Denominam modificado – Cardoso, (2002).

| Horizontes                                | Siglas |
|---|--------|
| Horizonte <u>B</u>                        | HB     |
| Horizonte <u>B</u> (estudado por Rezende) | HBR    |
| Zona Mosqueada                            | ZM     |
| Saprólito Fino                            | SF     |

É importante destacar que os solos denominados ZM5 e SF1, destacados na Tabela 3.3 não foram submetidos à totalidade da campanha de ensaios proposta a seguir na metodologia. No entanto, passaram por todos os ensaios de caracterização, sendo assim, optou-se pela apresentação de seus dados.

Tendo por finalidade uma melhor visualização da distribuição dos materiais na região do DF, as Figuras 3.1, 3.2 e 3.4 mostram as localizações dos pontos de coleta nos mapas rodoviário, geológico e pedológico do DF.

Tabela 3.3 - Tipos de Solos Tropicais a Serem Estudados

| Tipo de Solo  | Denominação | Profundidade de Coleta |
|---|-------------|------------------------|
| Horizonte B do Latossolo vermelho-amarelo de textura argilosa | HB7         | 105 a 135 cm           |
| Horizonte B do Latossolo vermelho de textura argilosa         | HB9b        | 85 a 115 cm            |
| Horizonte B do Latossolo vermelho de textura média            | HB10        | 40 a 70 cm             |
| Horizonte B do Latossolo vermelho-amarelo de textura média    | HB11        | 100 a 130 cm           |
| Horizonte B Solo podzólico vermelho- amarelo                  | HB12        | 40 a 70 cm             |
| Horizonte B Latossolo Cinza de textura argilosa               | HBR1        | 70 a 100 cm            |
| Horizonte B do Latossolo vermelho de textura argilosa         | HBR2        | 70 a 100 cm            |
| Zona mosqueada do quartzito                                   | ZM3         | 100 a 130 cm           |
| Zona mosqueada do metarritmito arenoso *                      | ZM5         | 50 a 80 cm             |
| Zona mosqueada do metarritmito argiloso                       | ZM6         | 100 a 130 cm           |
| Saprólito fino do metargilito do Grupo Bambuí *               | SF1         | 100 a 130 cm           |
| Saprólito fino do sericita filito do Grupo Canastra           | SF2         | 30 a 60 cm             |
| Saprólito fino da Ardósia                                     | SF4         | 100 a 130 cm           |
| Saprólito fino do quartzito                                   | SF8         | 80 a 110 cm            |
| Saprólito fino do quartzo-muscovita xisto do Grupo Araxá      | SF13        | 20 a 50 cm             |

Tabela 3.4 - Descrição de Campo dos Materiais Coletados.

| Denominação | Descrição de Campo   |
|-------------|--|
| <b>HB7</b>  | Cor bruno-amarelada e textura argilosa.<br>Visualmente homogêneo e isotrópico, sem descontinuidades.<br>Poucas raízes  |
| <b>HB9b</b> | Cor vermelha-escura e textura argilosa<br>Visualmente homogêneo e isotrópico, sem descontinuidades.<br>Inexistência de raízes.                                       |
| <b>HB10</b> | Cor vermelha escura e textura silto-arenosa<br>Visualmente é homogêneo e isotrópico, sem descontinuidades<br>Raízes em pequenas quantidades                          |
| <b>HB11</b> | Cor vermelha-amarelada e textura argilo-arenosa<br>Visualmente homogêneo e isotrópico, sem descontinuidades<br>Raízes em pequenas quantidades                        |
| <b>HB12</b> | Cor amarela-avermelhada e textura silto-argilosa<br>Visualmente homogêneo e isotrópico, sem descontinuidades   |
| <b>HBR1</b> | Solo argiloso de Cor cinza-escura<br>Visualmente homogêneo e isotrópico, sem descontinuidades<br>Poucas raízes   |
| <b>HBR2</b> | Solo argiloso, de Cor vermelha-escura<br>Visualmente homogêneo e isotrópico, sem descontinuidades<br>Inexistência de raízes  |
| <b>ZM3</b>  | Cores variegadas com uma matriz branca, amarela-avermelhada até vermelha<br>Textura dominante arenosa<br>Heterogêneo, com descontinuidades<br>Inexistência de raízes |
| <b>ZM5</b>  | Cores variegadas com uma matriz branca, amarela-avermelhada até vermelha<br>Textura dominante arenosa<br>Heterogêneo, com descontinuidades<br>Inexistência de raízes |
| <b>ZM6</b>  | Cores variegadas com uma matriz branca passando, às vezes, a amarela-avermelhada<br>Textura siltosa<br>Heterogêneo e Anisótropo<br>Inexistência de raízes            |

Tabela 3.4 - Descrição de Campo dos Materiais Coletados – Continuação.

| <b>Denominação</b> | <b>Descrição de Campo</b>  |
|--------------------|--|
| <b>SF1</b>         | Cor da matriz predominante cinza a vermelha e Textura Siltosa<br>Heterogêneo, com descontinuidades<br>Inexistência de raízes                 |
| <b>SF2</b>         | Cor da matriz predominante cinza a bruna levemente amarelada e Textura Siltosa<br>Heterogêneo, com descontinuidades<br>Não apresentam raízes |
| <b>SF4</b>         | Cor predominante cinza clara a bruna-avermelhada e Textura argilo-areno-siltosa<br>Heterogêneo e com poucas raízes                           |
| <b>SF8</b>         | Cor bruna-avermelhada, Textura arenosa<br>Homogêneo e as raízes são comuns   |
| <b>SF13</b>        | Cor predominante amarela-brunada a cinza, Textura siltosa<br>Heterogêneo, com descontinuidades<br>Não apresentam raízes                      |

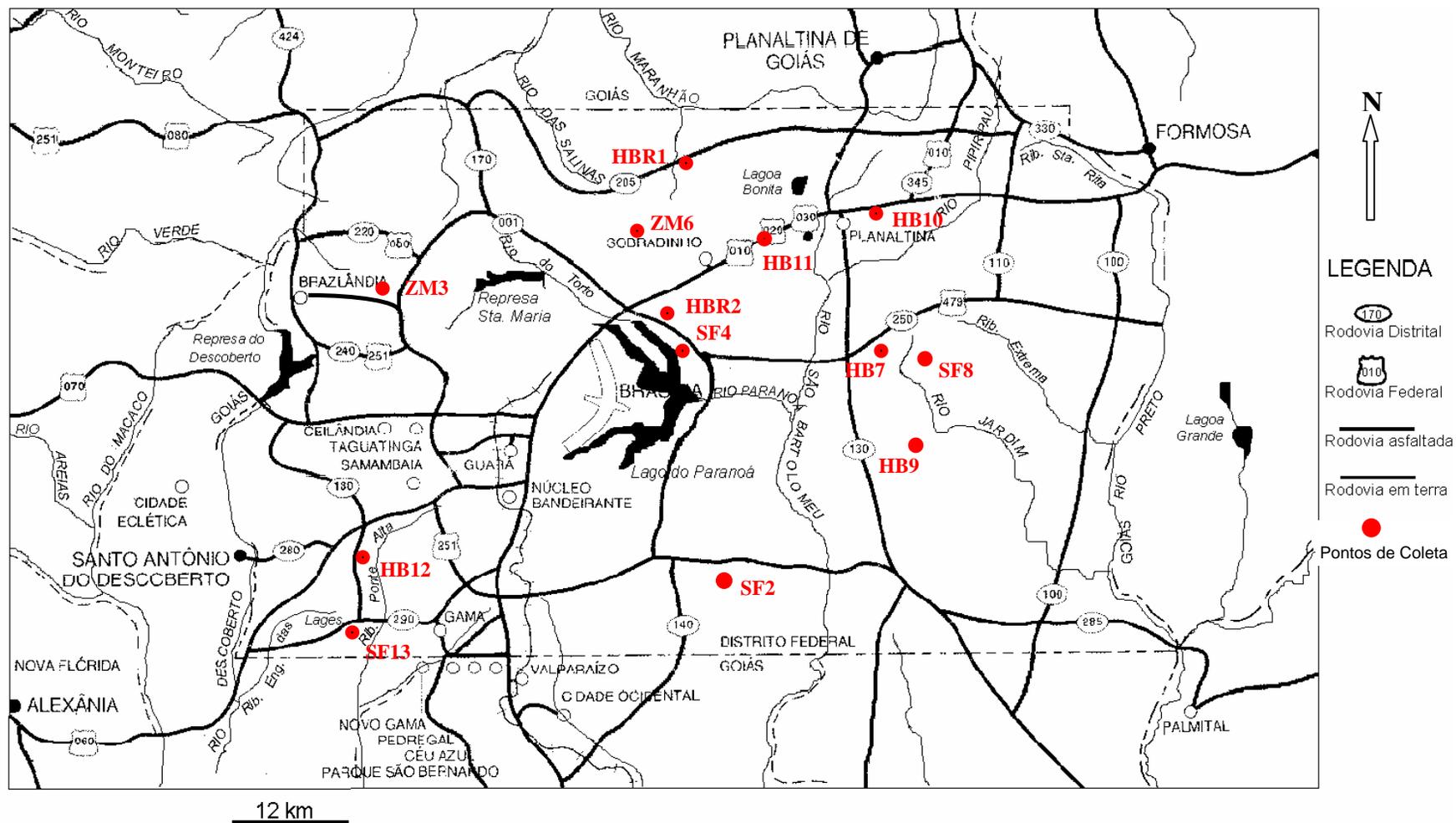


Figura 3.1 - - Mapa de Localização dos Pontos de Coleta dos Solos Estudados. (modificado- Cardoso 2002).

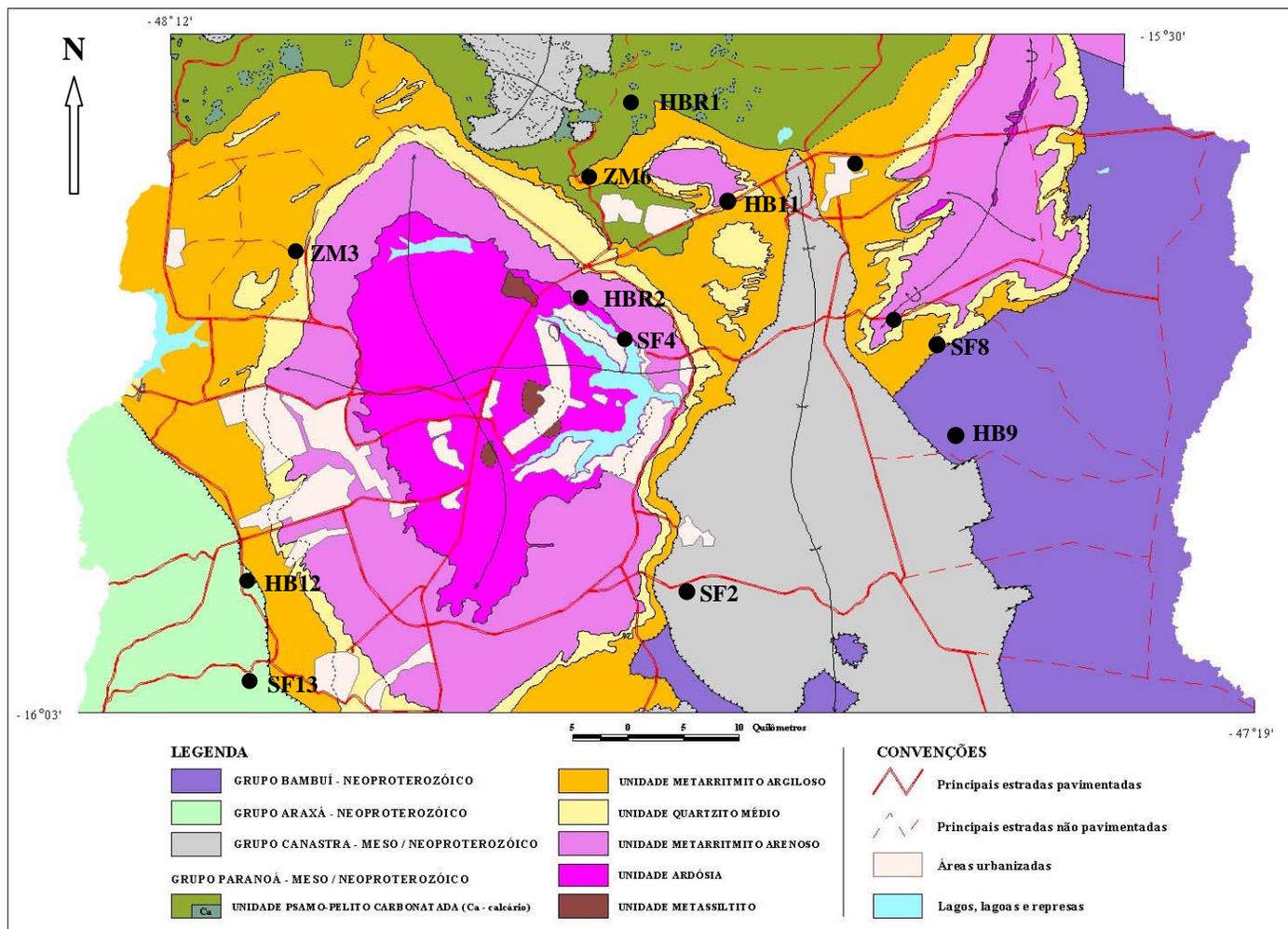


Figura 3.2 - Mapa Geológico do Distrito Federal (Freitas-Silva & Campos, 1998) e os Pontos de Coleta de Amostra. (modificado- Cardoso 2002)

Pistão do  
CBR  
 $\gamma_d$  (KN/m<sup>3</sup>)

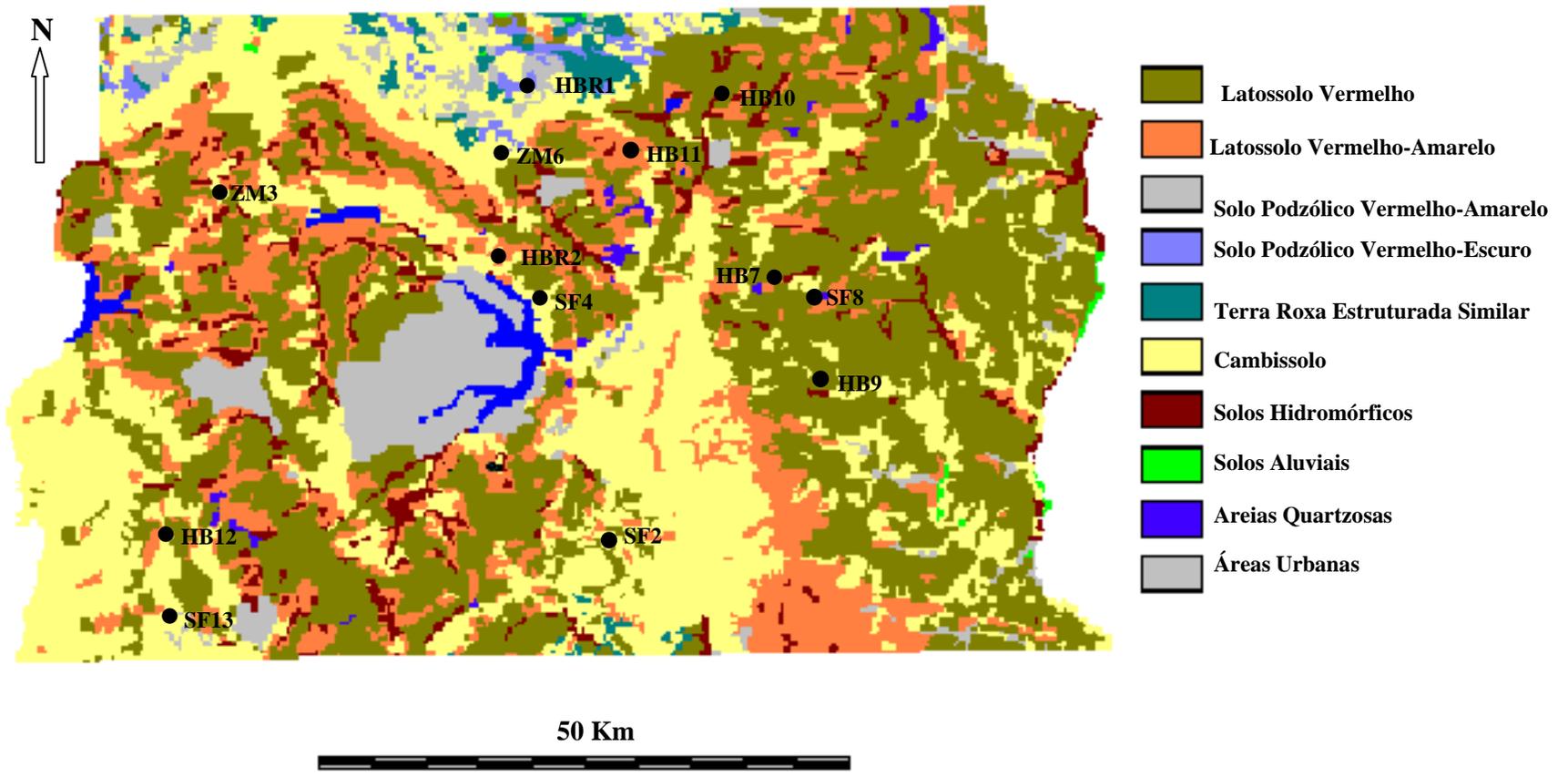


Figura 3.3 - Mapa Pedológico do Distrito Federal (EMBRAPA, 1978) e os Pontos de Coleta de Amostra. (modificado – Cardoso (2002).

## **3.2 - METODOLOGIA**

O estudo realizado neste trabalho engloba um total de 13 amostras de solos, cujas propriedades físicas, características químicas e mineralógicas se distinguem. Considerando a existência de dados anteriores sobre as mesmas, optou-se por desenvolver uma análise de suas propriedades no que se refere ao comportamento da estrutura compactada, para tal avaliação se utilizou os ensaios de mini-compactação, determinação da sucção pelo método do papel filtro, mini-CBR, compressão simples, absorção, PMI e microscopia de varredura. A seguir são detalhados todos os procedimentos/ensaios usados para esta pesquisa.

### **3.2.1 - Caracterização Física dos Solos**

Os ensaios de caracterização foram realizados seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Foram determinados: Umidade Natural do Solo ( $w_n$ ), Umidade Higroscópica ( $w_0$ ), Peso Específico Natural ( $\gamma_0$ ), Densidade Real dos Grãos ( $G$ ), Granulometria (com e sem o uso do defloculante), Limite de Liquidez ( $w_L$ ), Limite de Plasticidade ( $w_P$ ), Índice de Plasticidade (IP), Peso Específico Aparente Seco ( $\gamma_d$ ), Índice de Vazios ( $e$ ), Porosidade ( $\eta$ ) e Grau de Saturação ( $S_r$ ).

### **3.2.2 - Análise Mineralógica e Química dos Solos**

A análise mineralógica dos solos a ser utilizada no presente estudo foi objeto do trabalho de Cardoso (2002), acrescentando-se aqui os solos designados posteriormente como HBR1 e HBR2, estudados por Rezende (2003). Considerando-se que o espaço de tempo decorrido entre as coletas, espera-se que não se apresentem significativas alterações mineralógicas na composição dos materiais, o que justifica a utilização da quantificação determinada pelos autores.

Cardoso (2002) utilizou a metodologia desenvolvida por Martins (2000), que adota uma união de várias técnicas instrumentais de identificação e quantificação mineralógica (difratometria de raios-X, Tabela de Munsell, análises térmicas e micromorfológicas), além da análise química total. Pretendia-se realizar a quantificação dos solos trabalhados por Rezende (2003), utilizando-se procedimentos idênticos aos adotados por Cardoso (2002); no entanto não houve tempo hábil para tal.

Quanto às análises químicas, além das já realizadas pelos autores, foram efetuadas novas avaliações com os mesmos materiais, na empresa soloquímica, visando à reafirmação da identidade dos materiais usados nos trabalhos anteriores e destes que serviram para realização do presente estudo. Nos capítulos 5 e 6 são apresentadas as características destes solos conjuntamente a comparação dos resultados obtidos.

Os estudos foram baseados resumidamente, na determinação dos elementos Si, Al, Fe, Na, Ti, Ca, Mg e K, da matéria orgânica, do pH em H<sub>2</sub>O e do pH em KCl e, da CTC (Capacidade de Troca Catiônica). Como observado a seguir, foram obtidos valores bastante semelhantes aos verificados por Cardoso (2002) e Rezende (2003).

### **3.2.3 - Classificação MCT**

Por se tratar de uma classificação própria para solos finos, distinguindo-os em lateríticos e não-lateríticos, além de gerar dados importantes como famílias de curvas de compactação, torna-se importante sua execução.

### **3.2.4 - Curvas de Mini- Compactação**

Foram determinadas curvas de compactação para 13 tipos de solo, tanto em seu estado natural quanto estabilizados quimicamente com cal hidratada (2%, 3%, 4% e 6%). Este procedimento de ensaio seguiu o especificado em DNER-ME 254/94.

Utilizaram-se as energias equivalentes ao Proctor Normal e ao Proctor Intermediário.

### **3.2.5 - Mini- Compactação**

Determinados os valores de  $w_{ót}$  e  $\gamma_{dmáx}$  nas duas energias de compactação, optou-se pelos parâmetros obtidos na curva Proctor Normal equivalente ao solo natural (0% cal).

Foram compactados corpos de prova com energias variáveis para o teor de umidade ótimo em estado natural (0% cal) e, estabilizados quimicamente (2%, 4% e 6% de cal hidratada incorporada em peso). Foram ainda estudados corpos de prova compactados em pontos de umidade equivalentes ao ramo seco e ao ramo úmido das respectivas curvas de compactação (PN) obtidas. Esta variação de umidade ficou entre 3% a 4% em torno da ótima, o que se justifica pela tentativa de se obter o maior número possível de pontos com valores

idênticos de umidade de compactação para solos diferenciados. Desta forma, teve-se por finalidade a geração de dados suficientes para a avaliação do tipo de solo mais apropriado a ser utilizado com material de construção rodoviária.

É importante detalhar o procedimento de determinação da variação de energia, em número de golpes (N), usada. Uma vez que se estabeleceu com finalidade a determinação da aplicabilidade dos diferentes tipos de solo aqui estudados como material de construção rodoviária seja para camada de base, sub-base ou reforço de subleito, presupõe-se o uso de diferentes energias de compactação, de acordo com o ora vigente nas normas do DNER. A partir daí, optou-se ainda por trabalhar com energias inferiores ao Proctor Normal (PN) e superiores ao Proctor Intermediário (PI) sem, no entanto atingir o Proctor Modificado (PM). Tal critério foi determinado visando o comportamento, em termos de mini-CBR, de um pavimento mal compactado, o que se aproxima da condição de energia inferior a do PN. Quanto à condição de energia inferior ao Proctor Modificado (PM), teve-se por finalidade a quantificação do ganho real de suporte para cada tipo de solo, quando da execução em campo de 1 ou mais passadas do rolo compactador, sem, no entanto chegar-se a condição de compactação igual ao Proctor Modificado.

A partir do objetivo a ser atingido, se viabilizou o trabalho de compactação dinâmica com o uso apenas do soquete mais leve ( $P = 2270\text{g}$ ), opção esta justificada devido à condição de energia inferior ao PN e ainda em decorrência da maior facilidade de compactação para um número elevado de amostras. Sendo assim, foi necessário estudo prévio para se determinar a variação de número de golpes a ser aplicado. Tal estudo constou em compactação inicial, para cada solo estudado, nas condições de compactação ( $w_{ot}$  e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) já determinadas pelas curvas equivalentes ao Proctor Intermediário. A partir do peso específico e índices de vazios calculados para os corpos de prova, verificou-se que a totalidade dos solos chegaria a tais valores de peso específico ao se aplicar de 7 a 8 golpes com o soquete mais leve. Sendo assim, fixou-se como energia equivalente ao Proctor Intermediário, o número de 8 golpes com o soquete leve. Tendo, portanto, fixado duas energias, 5 (PN) e 8 (PI) golpes, optou-se por trabalhar com energia inferior de 2 golpes. Igual procedimento foi realizado para a fixação da energia equivalente ao Proctor Modificado, chegando-se a conclusão que este seria equivalente a 20 golpes aplicados com o soquete leve. Quanto à energia intermediária entre o PI e o PM, fixou-se 12 golpes, pois a idéia é trabalhar com 1 ou 2 passadas a mais do rolo compactador, o que equivale a um acréscimo de energia que não seria superior a 4 golpes.

Foram estudados solos naturais e estabilizados quimicamente, portanto como se sabe que o tipo de cal influência na estabilização de forma distinta para cada material trabalhado, torna-se essencial o conhecimento das características físico-químicas deste agente estabilizador (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Características Físico-Químicas da Cal Hidratada (Rezende, 2003).

| Parâmetros                     | Valores (%) |
|--------------------------------|-------------|
| CaO total                      | 72,8        |
| MgO                            | 0,5         |
| Perda ao fogo                  | 24,6        |
| CO <sub>2</sub>                | 1,5         |
| CaO disponível                 | 66,1        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,3         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,4         |
| SiO <sub>2</sub>               | 1,2         |
| S                              | 0,09        |
| SO <sub>3</sub>                | 0,4         |
| Óxidos totais                  | 97,5        |
| Óxidos não hidratados          | 0,2         |
| Retido na peneira 0,6 mm       | 0           |
| Retido na peneira 0,075 mm     | 3,5         |

### 3.2.5.1 - Compactação Dinâmica

Neste processo de compactação fez-se uso do equipamento de mini-compactação detalhado no método de ensaio DNER-ME 254/94. No entanto, trabalhou-se com uma variação final na energia de compactação equivalente a: 2, 5, 8, 12 e 20 golpes, o que consequentemente resultou na obtenção de pontos em diferentes densidades (Figura 3.4).

Após a determinação das energias a serem utilizadas, executou-se os corpos de prova a serem ensaiados, sendo que, para um determinado tipo de solo, umidade de compactação, teor de cal e energia, foram ensaiados um mínimo de 2 corpos de prova.

A quantidade de solo prevista em norma (190g) foi usada para a execução destes corpos de prova, nos quais foi medida pontualmente a sucção através do método do papel filtro. Após determinação da sucção, as amostras compactadas foram submetidas ao ensaio de Mini-CBR, considerando-se duas situações extremas de resistência, ou seja, sem imersão (sucção atuando) e com imersão (sucções próximas à zero).

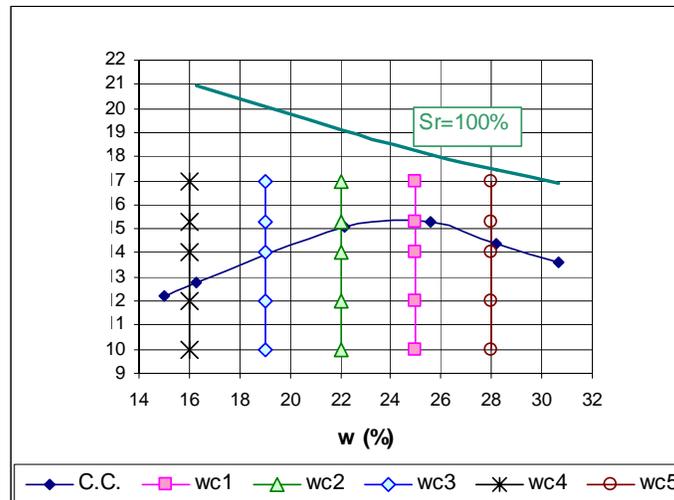


Figura 3.4 – Curva de Compactação (Delgado, 2002).

Ainda usando o procedimento de compactação dinâmica, foram compactados corpos de prova para a realização dos ensaios de Compressão Simples, Absorção e determinação de curvas características.

Quanto ao procedimento usado para as amostras de resistência à compressão simples, foram usadas as recomendações da norma DNER-ME 180/94. Portanto, compactou-se 380g de solo em 4 camadas de 95g cada, sendo submetidas a energia equivalente ao Proctor Intermediário (3 golpes com soquete de P = 4540g). As umidades de compactação utilizadas foram similares às já citadas anteriormente e, após a compactação, as amostras foram retiradas do molde e submetidas a diferentes tempos de estabilização (0, 7, 14, 28 e 54 dias) para a determinação da sucção e, posteriormente a determinação do ensaio de resistência à compressão simples.

Para o ensaio de absorção, o procedimento de compactação usado seguiu as recomendações da norma DNER-ME 254/94. Optou-se pelo uso da energia equivalente ao proctor intermediário (6 golpes – soquete de P = 4540g), para um peso de solo igual a 190g e, as umidades de compactação usadas são iguais as já citadas.

Para a determinação das curvas características, foram usadas duas energias de compactação (P.N. e P.I.), utilizando-se 114g e 3 golpes do soquete de P = 2270g (P.N) e ainda 95g e 3 golpes do soquete de P = 4540g (P.I). Quanto às umidades de compactação, foram incorporadas as w<sub>ót</sub> obtidas nas duas energias de compactação e ainda, variações em torno dos valores ótimos, de forma a obter curvas nos ramos seco e úmido.

### 3.2.6 - Determinação da Sucção – Método do Papel Filtro

Sabendo-se que a tensão de sucção influencia diretamente na determinação da resistência do solo, procedeu-se a medição desta tensão de sucção, para cada corpo de prova executado. Para tal fez-se uso do papel filtro quantitativo Whatman nº 42.

De forma a se executar as medições pontuais, após a compactação de cada corpo de prova, três discos de papel filtro são colocados em contato direto com o solo. Posteriormente, o molde é envolto em filme plástico e selado com fita adesiva, de forma a garantir o total contato do corpo de prova com o papel. Na fita anotou-se o número do corpo de prova, o tipo de solo e o teor de umidade usado, a data e a energia utilizada. Os moldes são então colocados em uma caixa de isopor e deixados em local sem grandes variações de temperatura (no caso, na câmara úmida) por um período de 15 dias (segundo recomendado por Marinho (1995), em função da faixa de sucção esperada). Este período de tempo é usado para alcançar o equilíbrio de sucção.

Cabe observar que, no caso específico das amostras a serem submetidas à compressão simples têm-se outros tempos de estabilização (7, 15, 28 e 56 dias), visando verificar a influência da variação do tempo de estabilização no valor da sucção e, conseqüentemente na Resistência à compressão simples (RCS).

Decorrido o tempo de equilíbrio, os papéis filtro centrais e superiores são retirados com o auxílio de uma pinça e pesados em balança com 0,0001g de precisão. Este sendo equivalente ao peso úmido do papel (Pp<sub>fw</sub>). Os discos de papel filtro são então colocados em cápsulas e, levados a estufa (temperatura de 105 a 110°C) por um período de 3 horas. Decorrido este intervalo de tempo procede-se à pesagem do papel filtro seco (Pp<sub>fs</sub>).

O procedimento utilizado ao realizar a segunda pesagem constou basicamente na colocação das cápsulas contendo os papéis filtro, em uma caixa de isopor, onde primeiramente foi posta uma cápsula contendo sílica gel, de forma a conservar o ar seco dentro do isopor. A caixa de isopor é então conduzida para um local próximo da balança e a pesagem é realizada retirando-se um por um os papéis, de forma a minimizar erros no peso seco de cada disco de papel filtro.

A partir do valor calculado de umidade no papel filtro empregou-se a equação recomendada por Chandler *et al.* (1992) apud Marinho (1995), para a determinação da sucção.

Quanto ao corpo de prova, este é re-envolto em filme plástico, evitando-se perdas de umidade para a seguir, ser pesado em balança de precisão 0,1g, de forma a verificar a

quantidade de água perdida pelo corpo de prova no período de estabilização. Tal fato é verificado através da diferença entre os pesos logo após a compactação e o peso após a remoção do papel filtro. Posteriormente, cada corpo de prova é levado para a prensa, para a determinação do Mini-CBR (natural e imerso) ou Compressão Simples, para a imersão (PMI) ou para a determinação da massa específica, usando a balança hidrostática (no caso das curvas características).

### **3.2.7 - Determinação das Curvas Características**

Inicialmente foram determinadas curvas características das amostras indeformadas, utilizadas com parâmetro de comparação para verificação do efeito da compactação.

Posteriormente, foram determinadas curvas características compactadas tanto das amostras de solo naturais (0% cal) quanto para os teores de 2% e 6% de cal. Estas curvas foram obtidas nos teores de umidades ótimas e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  (na energia Proctor Normal) de cada tipo de solo e, ainda 1 umidade no ramo seco e 1 umidade no ramo úmido da curva de compactação.

Destaca-se ainda que, em um primeiro momento, as curvas características compactadas foram trabalhadas na trajetória de umedecimento (TU) para a seguir, ser utilizada uma trajetória mista. Entendendo-se por trajetória mista (TM), uma junção das trajetórias de secagem e umedecimento, ou seja, metade dos corpos de prova foram deixados a secar e na outra metade acrescentou-se água destilada (umedecimento).

Após atingir os percentuais de saturação desejados, utiliza-se o papel filtro quantitativo Whatman nº 42 para determinação da sucção. Determinada a sucção, após 15 dias de tempo de equilíbrio, os corpos de prova são submetidos ao ensaio da balança hidrostática (ABNT NBR-10838 - MB-288) e determinação de umidade com o auxílio da estufa.

De posse dos dados experimentais, as curvas características são representadas em termos de sucção x umidade, a sucção sendo mostrada em pF, que é o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água. Na Figura 3.5 apresenta-se esquemas simplificados dos processos de compactação utilizados para a obtenção das curvas características. Após a compactação os corpos de prova estes são submetidos a um dos procedimentos de variação de umidade detalhados nas Figuras 3.6, de modo a obter a curva característica.

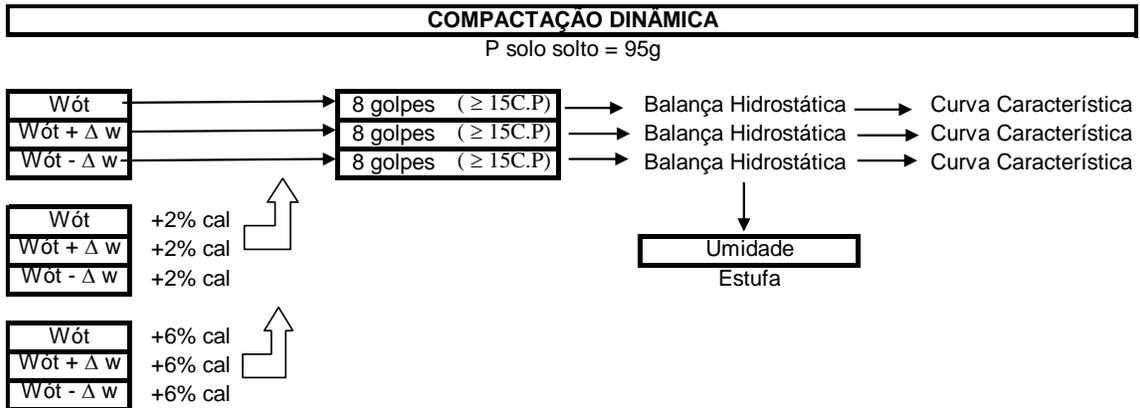
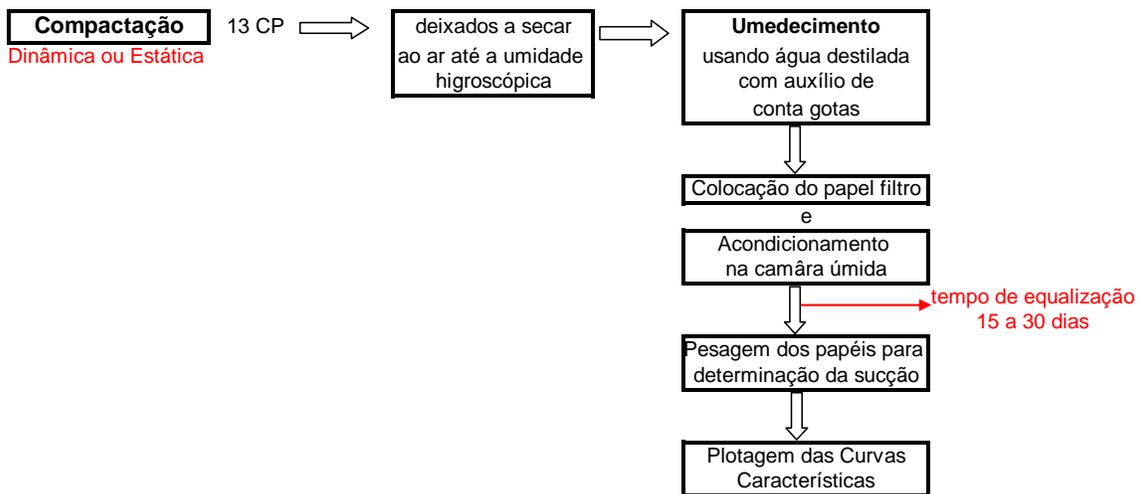
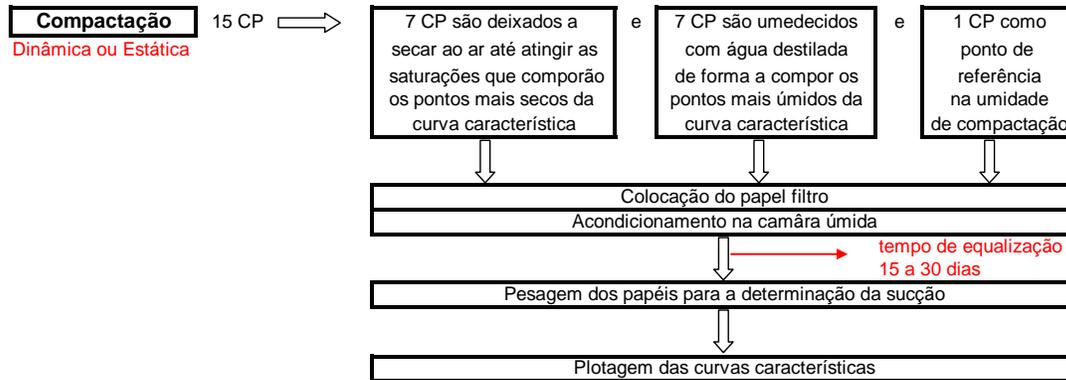


Figura 3.5 – Compactação Dinâmica para Obtenção das Curvas Características.



(a) Trajetória de Umedecimento - TU

Figura 3.6 – Trajetórias de Variação de Umidade.



(b) Trajetória Mista - TM

Figura 3.6 – Trajetórias de Variação de Umidade - Continuação.

Após detalhar os procedimentos de ensaio usados para a obtenção das curvas características dos solos indeformados e compactados aqui estudados, é necessário esclarecer o procedimento adotado para correção de alguns dos índices de vazios obtidos após medição da sucção. Este índice de vazios corrigido foi usado no traçado das curvas características.

Como já citado, devido à possibilidade de erros no procedimento da balança hidrostática realizou-se também medições com o uso do paquímetro (3 medidas, de onde se retirou uma média). Fazendo-se uso destes dois valores, plotou-se  $e_{\text{balança}}$  ( $e_b$ ) versus  $e_{\text{paquímetro}}$  ( $e_p$ ), de forma a verificar se algum dos pontos fugia a tendência. Embora os valores obtidos tenham sido bastante próximos, percebe-se em alguns casos uma dispersão ocasionada por erro de ensaio ou medida. Em alguns pontos o erro apresenta-se bem visível, mesmo durante a realização do ensaio. Esta correção foi feita através da consideração do índice de vazios obtido pela balança e, em outros casos, através da consideração da média entre os índices de vazios obtidos pelo paquímetro. Foram usados os dois métodos de correção, pois em alguns corpos de prova ocorreu entrada de água durante a obtenção do peso submerso. Assim, não sendo possível a total verificação através da plotagem da curva anteriormente citada. Também devido à perda destes pontos, deu-se preferência a utilização do índice de vazios calculado através das medições do paquímetro.

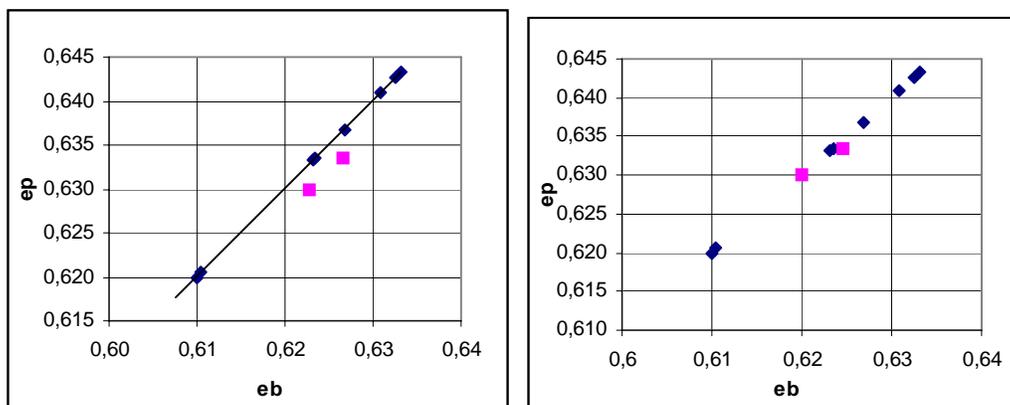


Figura 3.7 - Correção de Índices de Vazios.

Como demonstrado anteriormente, a correção consta basicamente de um ajuste nos pontos que estão fugindo a tendência apresentada (Figura 3.7). Posteriormente verifica-se a tendência  $ua-u_w$  (kPa) versus  $ec$  (índice de vazios corrigidos) de forma a verificar se os dois índices de vazios obtidos não estariam incorretos, pois se algum ponto apresenta dispersão significa que os dois valores se encontram com problema; assim deve-se proceder à correção através de uma média aritmética dos outros pontos obtidos.

### 3.2.8 - Determinação do Mini-CBR

Determinada a sucção, alguns corpos de prova foram submetidos diretamente ao ensaio de resistência à penetração e outros, imersos em água, para determinação da expansão e posterior determinação da resistência após imersão (CBR imerso).

O procedimento de ensaio obedeceu ao método de ensaio DNER-ME 254/94, destacando-se apenas que, as leituras efetuadas corresponderam a um somatório das recomendadas na norma acima citada e na NBR 9895/87; sendo assim têm-se leituras correspondentes às seguintes penetrações: 0,25 mm, 0,50mm, 0,63mm, 0,75 mm, 1,00mm, 1,25mm, 1,27mm, 1,50 mm, 1,90mm, 2,0mm, 2,5mm, 2,54mm, 3,0mm, 3,5mm, 3,81mm, 4,0mm, 4,5mm, 5,0mm, 5,08mm, 6,35mm, 7,62mm, 8,89mm e 10,16mm. Este procedimento foi adotado para que se desse à verificação da ocorrência (e em que nível de pressão aplicada) ou não, de ruptura na estrutura do corpo de prova compactado.

Finalizado o ensaio de penetração, remove-se o corpo de prova do molde metálico e, a umidade final é determinada com o auxílio da estufa.

Na Figura 3.8 apresenta-se esquema simplificado dos processos utilizados para a obtenção dos valores de CBR e PMI.

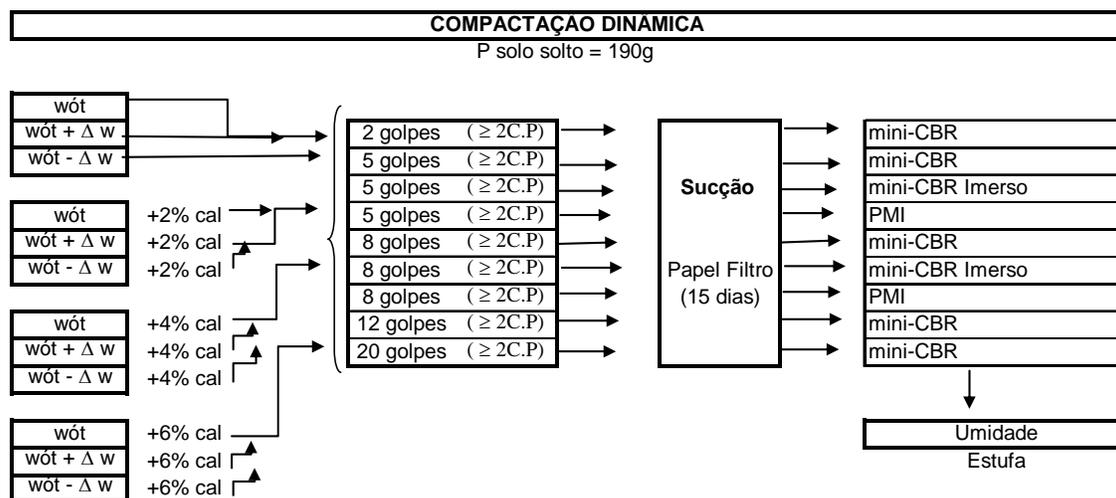


Figura 3.8 – Obtenção dos Valores de Mini-CBR e PMI

De maneira geral, foram compactados corpos de prova para todos os solos considerando o teor de umidade ótima determinada no Proctor normal, estes com a incorporação de 0%, 2%, 4% e 6% de cal; e ainda pontos no ramo seco e no úmido, para teores de 0% de cal incorporada. Considerando os pontos compactados nos ramos úmido e seco, alguns tipos de solos foram compactados com a incorporação de 2% de cal (HB7, HB11, HBR1, SF4), outros com 0%, 2%, 4% e 6% (HB9b) e ainda com 3% (HBR2).

É ainda importante ressaltar que foram compactados 2 corpos de prova para cada conjunto de número de golpes, umidade e teor de cal, para a determinação do mini-CBR sem imersão; 2 amostras para a determinação PMI; e, finalmente mais 2 para o mini-CBR Imerso. Já para a determinação da resistência imersa e da PMI foram ensaiados apenas corpos de prova compactados nas energias de 5 (P.N) e 8 (P.I.) golpes, que correspondem a energia Proctor normal e Proctor Intermediária. Como também já citado, para todas as amostras compactadas foi determinada à sucção pelo método do papel filtro, usando-se um período de equilíbrio de 15 dias. No entanto, para efeito de apresentação dos resultados serão apresentados apenas dois valores que correspondem respectivamente às médias aritméticas simples dos parâmetros obtidos. A determinação destas médias foi efetuada apenas quando verificados valores bastante aproximados, tendo-se utilizado como intervalo de aceitação 5%

de diferença para os valores de densidade, umidade de compactação e umidade final da amostra. Para os valores de sucção e resistência (mini-CBR) foi considerada uma margem de erro de 10%, devido a problemas quanto à repetibilidade dos ensaios. Caso estes não tivessem se enquadrado aos percentuais adotados, os ensaios foram refeitos até se obter a verificação dos dados.

### **3.2.9 - Perda de Massa por Imersão**

Trata-se de um dos ensaios que compõe a metodologia MCT, normalizado no método de ensaio DNER-ME 256/94. Optou-se pela sua realização, uma vez que os solos compactados trabalham, na maioria das vezes, em condições de saturação parcial, com ciclos de secagem e umedecimento alternados. Sendo assim, torna-se importante a verificação da sua capacidade de erodibilidade, quando em situação de total saturação. Sendo assim, determinou-se a PMI em todos os solos trabalhados, considerando apenas as energias equivalentes ao Proctor Normal (5 golpes) e Proctor Intermediário (8 golpes). Quanto às umidades de compactação usadas, foram ensaiados corpos de prova em todas as umidades trabalhadas, tanto no teor ótimo, quanto nos ramos seco e úmido. Destaca-se ainda que, usou-se 2 amostras compactadas por condição de umidade e energia.

### **3.2.10 - Ensaio de Absorção ou Capilaridade**

Visando a determinação do tempo de ascensão capilar da água em camadas de solo compactadas, realizaram-se ensaios com todos os solos coletados compactados na energia equivalente ao Proctor Intermediário (8 golpes), considerado todas as umidades e teores de cal trabalhados nas etapas 3.2.6 a 3.2.9.

O procedimento adotado (Figura 3.9) consta na compactação dos corpos de prova (2 por situação), pesagem, determinação da altura e, colocação em recipiente com água. Estes são colocados sob pedras porosas e pesados diariamente, ou seja, convencionou-se utilizar um intervalo de tempo equivalente à 24h entre pesagens sucessivas. Verifica-se que estes atingiram sua saturação máxima quando após três pesagens sucessivas, não ocorrer variação considerável ( $\pm 0,3g$ ) no peso do corpo de prova compactado.

Na Figura 3.10 apresenta-se esquema simplificado dos processos utilizados para a medição das absorções.

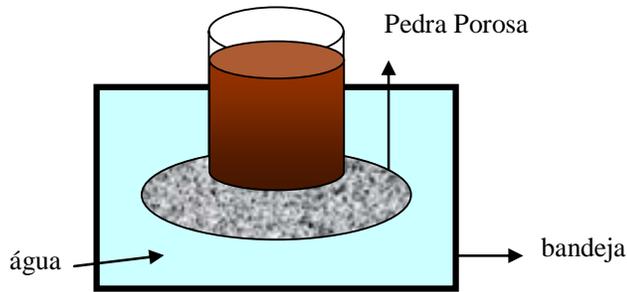


Figura 3.9 – Ensaio de Absorção.

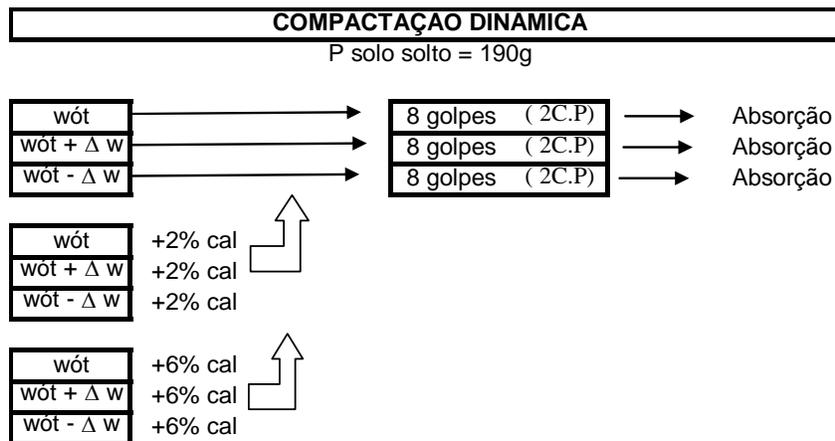


Figura 3.10 – Obtenção das Absorções.

### 3.2.11 - Determinação do Teor Ótimo de Cal pelo Método de Eades e Grim

Foram determinados valores de mini-CBR e Compressão Simples considerando diferentes teores de cal. Sendo assim, verificou-se a importância da determinação de um teor de cal que estabilize o solo, de forma a se efetuar comparação aos resultados efetivamente encontrados, quanto à resistência.

Este ensaio é baseado no pH do conjunto solo-cal, e apesar de se tratar de um ensaio indicativo, informa o teor de cal necessário para conduzir a mistura a uma alcalinidade que solubilize as estruturas existentes, gerando novos silicatos e aluminatos de cálcio mais estáveis e resistentes a esforços externos.

Este ensaio tem por objetivo determinar o teor ótimo de cal necessário para estabilizar um solo, baseado no pH do conjunto solo-cal, 1 hora após a mistura com água destilada.

Na determinação do pH do solo o eletrodo foi calibrado com soluções tampão de pH igual a 4 e 7, enquanto que para as misturas solo-cal usou-se soluções de pH igual a 7 e 10. Para os ensaios, foi usado um pH-metro da marca Analyser.

O ensaio consiste em pesar 5 percentagens de cal, no caso foram utilizadas 8 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8) e misturar a 20 g de solo seco. Colocar a mistura dentro de frascos plásticos de 150 ml (ou mais) e adicionar 100 ml de água destilada. Agitar os frascos durante 30 segundos a cada 10 minutos. Após 1 hora transferir parte da mistura para um copo de plástico e determinar o pH.

Segundo os autores, a mais baixa percentagem de cal que confere ao conjunto um pH igual 12,40 é a requerida para estabilizar o solo. Se o pH não ultrapassa 12,30 e mais 2% de cal der essa mesma leitura, a mais baixa percentagem que dá pH igual 12,30 é a requerida para estabilizar o solo. Se o pH mais alto é 12,30 e com apenas 1% de cal obtém-se a leitura de pH igual 12,30, é necessário realizar o ensaio com percentagens mais elevadas.

### **3.2.12 - Determinação da Resistência à Compressão Simples dos Solos**

A resistência à compressão simples é a característica mais empregada na avaliação das propriedades das misturas solo-cal. Essa resistência aumenta com o acréscimo de cal até um determinado nível, de acordo com Ingles & Metcalf (1973) *apud* Lima (1981). Para os autores o teor limite de cal para este acréscimo é de 8% para a maioria dos solos argilosos. Teor este que, de acordo com avaliações realizadas no decorrer do trabalho, não se justifica para os solos argilosos do Distrito Federal.

A Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo compactado e das misturas solo-cal compactadas foi realizada seguindo as recomendações da norma DNER-ME 180/94, em corpos de prova compactados de diâmetro igual a 5 cm e alturas variáveis de acordo com a umidade de compactação usada. O processo de compactação utilizado foi o Dinâmico e, a energia equivalente ao Proctor Intermediário (4 golpes por camada de 95g de solo solto). Como foram utilizadas diferentes umidades de compactação houve variação quanto à altura final compactada para cada tipo de solo e mistura compactada, tendo sido compactados 2 (ou 3) corpos de prova por situação a ser avaliada.

Imediatamente após a compactação estes corpos de prova foram removidos dos moldes, pesados e medidos com o auxílio do paquímetro. Em seguida foi colocado sobre cada um 3 discos de papel filtro Whatmann n<sup>o</sup> 42, para medição da sucção mátrica e, estes foram

envoltos com filme plástico e selados com fita crepe. Cada amostra compactada foi identificada com data de compactação, tipo de solo ou mistura e, energia de compactação. Estas amostras foram então deixadas em local sem grandes variações de umidade, no caso na câmara úmida, por diferentes períodos de tempo. Este procedimento teve por finalidade a avaliação da contribuição da sucção mátrica para o aumento de resistência a compressão. Sob este enfoque, as variações de tempo consideradas foram 0, 7, 14, 28 e 58 dias. Para cada período citado foram ensaiados pelo menos 2 corpos de prova por condição, ou seja, por tipo de solo ou mistura e em uma dada umidade de compactação. De acordo com a norma DNER-ME 180/94 deveriam ter sido ensaiados um mínimo de 3 amostras por situação, no entanto, optou-se por realizar 3 amostras apenas quando os resultados de RCS fossem bastante diferenciados para a mesma condição de compactação. Tal quantidade de amostras é justificada dentro do universo de variações a serem avaliadas, como pode ser visualizado na Figura 3.11, através da exemplificação com o solo SF2, os demais solos seguindo a mesma sistemática de ensaios.

É importante ainda observar que os períodos de estabilização de 7, 14, 28 e 58 dias já englobam a tempo de estabilização acrescido do de cura quando da incorporação da cal.

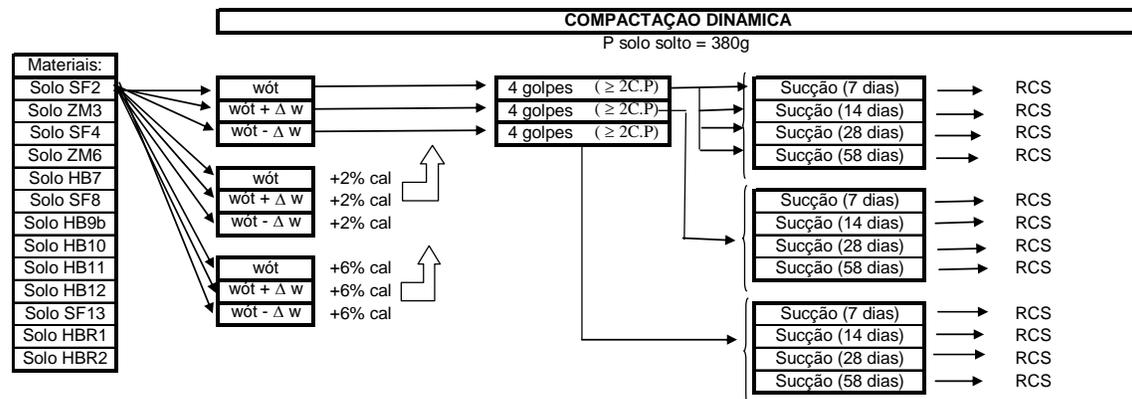


Figura 3.11 – Obtenção das Resistências à Compressão Simples dos Solos (RCS).

## **4 – PROPRIEDADES FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS**

Como já visto no Capítulo 3, os estudos foram realizados sobre 13 tipos de solos, escolhidos propositalmente para representar os diferentes tipos de solo existentes no Distrito Federal. É evidente que outros solos existem na região, apresentando características físicas, químicas e mineralógicas intermediárias, no entanto, os escolhidos permitem uma avaliação global das propriedades e comportamentos dos solos regionais, podendo contribuir para o entendimento do comportamento dos solos tropicais como um todo.

A coleta das amostras foi realizada em horizontes mais superficiais, portanto apresentam-se *in natura*, em sua maioria, não saturados. As amostras ensaiadas foram coletadas a profundidades de 0,20 a 1,60 m em relação à superfície do terreno natural.

De forma a bem caracterizar o material utilizado, fez-se uso de análises mineralógicas, químicas, físicas e estruturais. Destaca-se que, só assim é possível uma melhor análise e compreensão dos aspectos que influenciam no comportamento do solo quando em estado natural, compactado e estabilizado, o que por sua vez, vem a contribuir para a determinação de seu potencial de uso em obras de pavimentação. Sendo assim, este capítulo tem por objetivo o estudo das características físicas dos solos e a sua classificação segundo os sistemas TRB, SUCS e MCT, uma vez que estes relacionam as características físicas dos materiais a sua aplicabilidade em camadas de pavimento.

### **4.1 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS ESTUDADOS**

Os resultados referentes à caracterização física dos solos estudados são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os índices físicos dos solos estudados e os limites de Atterberg. Os resultados obtidos por Cardoso (2002) e Rezende (2003) são referidos nas Tabelas como 2002. Os resultados desta pesquisa foram designados como 2004. A repetição da caracterização destes solos teve por objetivo averiguar a similaridade das amostras, uma vez que elas foram retiradas em épocas distintas e, em alguns casos, não exatamente nos mesmos pontos e/ou cotas.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos de umidade natural ( $w_n$ ), densidade dos grãos ( $G$ ), peso específico natural ( $\gamma_o$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $\eta$ ) e saturação ( $S_r$ ). Verifica-se inicialmente, a similaridade entre os resultados

obtidos em 2002 e 2004, registrando-se pequenas diferenças em termos de porosidade. As variações de umidade e grau de saturação simplesmente refletem os diferentes períodos de amostragem. Observa-se ainda que, similarmente ao definido por Cardoso (2002), o índice de vazios ( $e$ ) e a porosidade ( $\eta$ ) são, em média, maiores nos solos definidos como (HB) ( $e$  entre 1,09 e 2,34) quando comparados aos horizontes (ZM) ( $e$  entre 0,52 e 1,22) e (SF) ( $e$  entre 0,53 e 0,85). Este fato reflete a importância do perfil de intemperismo, onde se tem valores de índices de vazios maiores para os latosolos (HB), seguidos dos provenientes da zona mosqueada (ZM) e, finalmente os solos saprolíticos finos (SF). Quanto aos valores de ( $\gamma_o$ ) e ( $\gamma_d$ ), estes se comportam de forma inversa ao “ $e$ ”, ou seja, seus valores são, em média, menores para os solos HB em relação aos demais.

Deste modo, pode-se constatar que nos solos naturais estudados, os horizontes mais superficiais possuem “ $e$ ” maiores que aqueles encontrados em subsuperfície. Comportamento este explicado por Cardoso (1995) e Araki (1997), como função do elevado teor de  $Al^{+3}$ , que ocorre com o aumento do grau de intemperismo.

Tabela 4.1 - Resultados dos Ensaio de Caracterização Geotécnica dos Solos *in natura*.

| Amostra | wn (%) |      | G    |      | $\gamma_o$ (KN/m <sup>3</sup> ) |       | $\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> ) |       | e    |      | n (%) |       | Sr (%) |       |
|---------|--------|------|------|------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|------|------|-------|-------|--------|-------|
|         | 2002   | 2004 | 2002 | 2004 | 2002                            | 2004  | 2002                            | 2004  | 2002 | 2004 | 2002  | 2004  | 2002   | 2004  |
| HB7     | 25,2   | 25   | 2,83 | 2,83 | 12,2                            | 13,2  | 9,74                            | 10,56 | 1,85 | 1,63 | 64,89 | 61,95 | 38,59  | 43,46 |
| HB9     | 28,1   | 30   | 2,77 | 2,76 | 11,1                            | 10,52 | 8,67                            | 8,09  | 2,13 | 2,34 | 68,10 | 70,10 | 36,46  | 35,31 |
| HB10    | 11     | 14,3 | 2,72 | 2,71 | 14,1                            | 13,81 | 12,70                           | 12,08 | 1,10 | 1,20 | 52,38 | 54,54 | 27,20  | 32,31 |
| HB11    | 14,1   | 13   | 2,71 | 2,7  | 14,5                            | 14    | 12,71                           | 12,39 | 1,09 | 1,14 | 52,18 | 53,21 | 35,02  | 30,87 |
| HB12    | 25     | 22   | 2,8  | 2,82 | 17,1                            | 16,18 | 13,68                           | 13,26 | 1,01 | 1,09 | 50,18 | 52,04 | 69,50  | 57,17 |
| HBR1    | -      | 26   | 2,78 | 2,78 | -                               | 12,6  | -                               | 10,00 | -    | 1,73 | -     | 63,32 | -      | 41,87 |
| HBR2    | -      | 25   | 2,76 | 2,77 | -                               | 12,11 | -                               | 9,69  | -    | 1,80 | -     | 64,34 | -      | 38,39 |
| ZM3     | 15     | 18   | 2,7  | 2,7  | 20,1                            | 19,33 | 17,48                           | 16,38 | 0,51 | 0,62 | 33,99 | 38,13 | 78,65  | 78,85 |
| ZM5     | 22,8   | 21,4 | 2,74 | 2,74 | 20,7                            | 21,5  | 16,86                           | 17,71 | 0,59 | 0,61 | 37,27 | 37,89 | 105,16 | 96,12 |
| ZM6     | 11     | 13   | 2,85 | 2,85 | 14,6                            | 14,22 | 13,15                           | 12,58 | 1,12 | 1,22 | 52,94 | 54,97 | 27,87  | 30,34 |
| SF 1    | 15     | 18,6 | 2,88 | 2,87 | 17,5                            | 18    | 15,22                           | 15,18 | 0,86 | 0,85 | 46,12 | 46,08 | 50,47  | 62,48 |
| SF 2    | 1,2    | 8,5  | 2,81 | 2,8  | 18,7                            | 19,5  | 18,48                           | 17,97 | 0,49 | 0,53 | 32,94 | 34,55 | 6,86   | 45,09 |
| SF4     | 23     | 25   | 2,81 | 2,81 | 20,5                            | 19,3  | 16,67                           | 15,44 | 0,65 | 0,78 | 39,52 | 43,97 | 98,91  | 89,52 |
| SF8     | 2,1    | 5,8  | 2,69 | 2,7  | 16,7                            | 17,56 | 16,36                           | 16,60 | 0,61 | 0,60 | 38,00 | 37,32 | 9,22   | 26,31 |
| SF13    | 10,1   | 11   | 2,79 | 2,8  | 20,1                            | 19,55 | 18,26                           | 17,61 | 0,50 | 0,56 | 33,28 | 35,86 | 56,50  | 55,10 |

A Tabela 4.2 apresenta os valores de limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ), índice de plasticidade (IP) e índice de atividade (Ia) de Skempton. Quanto a estes limites, são registradas pequenas diferenças entre os valores anteriormente determinados e os atuais, no entanto, os índices de plasticidade foram praticamente os mesmos. Nota-se ainda que os ( $w_L$ ) dos solos (HB), que apresentam plasticidade, são sempre superiores aos encontrados nos solos (ZM) e solos (SF). Este mesmo comportamento é observado em relação aos limites de plasticidade ( $w_P$ ). Os índices de plasticidade (IP), em contraposição, fornecem resultados onde os valores obtidos são, em média, menores para os (HB) e, maiores para os (ZM) e (SF).

No entanto, com a profundidade, em perfis distintos, devido à interferência de outros fatores como textura, minerais de origem e cátions trocáveis, isso necessariamente pode não ocorrer (Delgado, 2002). Por outro lado, os limites de Atterberg refletem a influência dos argilominerais, composição química, agregação e textura nas propriedades do solo, considerando distintamente a influência do tipo e da quantidade dos argilominerais, elementos e compostos químicos presentes. De forma a considerar tais influências (exceto a agregação), Skempton (1953) *apud* Vargas (1982), definiu a atividade coloidal das argilas baseando-se nos resultados dos ensaios de índice de plasticidade e no teor de argila presente nos solos.

De acordo com o citado autor, a classificação apresenta três níveis: inativa ( $I_a < 0,75$ ), normal ( $1,25 < I_a < 0,75$ ) e ativa ( $I_a > 1,25$ ). Este índice de atividade ( $I_a$ ) indica o grau de influência das propriedades mineralógicas e químico-coloidais da fração argila nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso, sendo expresso pela relação do índice de plasticidade (IP) pela percentagem de argila presente no solo. Esta proposta, dado os solos estudados pelo autor, não contempla a influência marcante dos oxi-hidróxidos de ferro e do nível de agregação que marcam os solos tropicais, sobretudo os mais intemperizados. Cardoso (2002) mostra que a presença dos oxi-hidróxidos de ferro afetou de modo marcante o comportamento dos solos estudados. Ao mesmo tempo é possível supor que a agregação presente nos solos tropicais intemperizados afeta a plasticidade no que se refere à textura e interação entre as partículas. No entanto, o mais relevante parece ser o fato dos poros presentes no interior dos agregados armazenarem água livre, fato este que apesar de acrescer os limites de plasticidade e liquidez, pouco afeta o índice de plasticidade. Tal característica contribuiria para a localização dos pontos abaixo da linha “A” na carta de plasticidade de Casagrande.

Observando-se os valores de  $I_a$  (Tabela 4.2), verifica-se que os solos pertencentes aos Horizontes B (HB) são, em relação ao  $I_A$ , definidos como solos inativos, enquanto que os outros horizontes (ZM e SF), na sua maioria são solos ativos.

Avaliando-se os limites de Atterberg (Tabela 4.2) em relação aos parâmetros físicos densidade dos grãos (G), índice de vazios (“e”) e umidade natural ( $w_n$ ) (Tabela 4.1), de uma forma geral verificou-se que o  $w_p$  apresenta uma melhor relação com os mesmos (Figura 4.1).

A Figura 4.1(a) mostra que embora exista relação do G com o  $w_p$ , verificam-se comportamentos diferenciados de acordo com o grau de intemperismo do material. Ou seja, para os solos estudados, no horizonte SF o  $w_p$  tende a crescer com o aumento do G e, nos solos HB ocorre o inverso. Embora o número de resultados seja pequeno, ele aparentemente reflete os aspectos químicos e da agregação, sendo recomendável observar as conclusões de

Cardoso (2002) a cerca da influencia dos oxi-hidróxidos de ferro na plasticidade. Cabe destaque ainda para a Figura 4.1(b) que mostra que quanto maior o “e” e, portanto do grau de intemperização e agregação do solo, maior o limite de plasticidade; o que corrobora com as discussões anteriores. A redução do limite de plasticidade com o “G” deixa claro que os dois fatores, poros internos e presença do ferro, interferem na plasticidade, cabendo lembrar que os oxi-hidróxidos de alumínio, com papel relevante na agregação, é traço comum aos solos profundamente intemperizados. Sendo assim, a Figura 4.1 reflete a influência da mineralogia na plasticidade, uma vez que o potencial de retenção de água depende dela.

Tabela 4.2 – Limites de Atterberg.

| Amostra | Cardoso (2002) e Rezende (2003) |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | wL                              | wP   | IP   | la   | wL   | wP   | IP   | la   |
| HB7     | 40,0                            | 32,0 | 8,0  | 0,17 | 42   | 33   | 9    | 0,19 |
| HB9     | 48,0                            | 38,0 | 10,0 | 0,14 | 49   | 39   | 10   | 0,17 |
| HB10    | NP                              | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   |
| HB11    | NP                              | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   |
| HB12    | 45,0                            | 30,0 | 15,0 | 0,47 | 47   | 32   | 15   | 0,48 |
| HBR1    | 55,6                            | 36,2 | 19,4 | 0,57 | 57,6 | 38,6 | 19   | -    |
| HBR2    | 50,1                            | 38,2 | 11,9 | 0,31 | 52,3 | 40,9 | 11,4 | -    |
| ZM3     | NP                              | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   |
| ZM5     | 22,0                            | NP   | NP   | NP   | 23   | NP   | NP   | NP   |
| ZM6     | 38,0                            | 21,0 | 17,0 | 1,95 | 39   | 22   | 17   | 2,30 |
| SF 1    | 43,0                            | 25,0 | 18,0 | 1,32 | 45   | 26   | 19   | 1,43 |
| SF 2    | 42,0                            | 20,0 | 22,0 | 2,65 | 40   | 18   | 22   | 2,44 |
| SF4     | 36,0                            | 21,0 | 15,0 | 0,74 | 35   | 20   | 15   | 0,76 |
| SF8     | NP                              | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   |
| SF13    | NP                              | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   | NP   |

Queiroz de Carvalho (1987) relata que vários fatores podem influenciar nos valores finais do limite de liquidez e do limite de plasticidade, normalmente tendo como principais fatores a natureza mineralógica e o teor da fração fina. A literatura demonstra que, independente da origem do solo (de região tropical ou temperada), os limites de plasticidade e liquidez aumentam à medida que aumentam os teores de argila no solo. Uma vez que a variação do G está intimamente relacionada aos minerais constituintes e ao nível de intemperização sofrido pelo solo, é de se esperar que este varie com o teor de argila existente no material, o que de forma geral é verificado nos solos estudados.

No entanto, paralelamente a verificação da boa correlação entre o  $w_P$  e os índices físicos, notou-se que o mesmo não se deu com o  $w_L$ . Fato este verificado por Cardoso (2002), através de análises estatísticas, que observou a inexistência de correlações importantes do  $w_L$  com as frações granulométricas (Tabela 4.3) e com os minerais constituintes (Tabela 4.5) dos solos. O autor levanta a possibilidade de tal comportamento ser resultante de combinações

mais complexas entre a umidade e o índice de vazios e as propriedades dos solos, que não foram identificadas através das análises estatísticas realizadas; e/ou ao fato do Método de Casagrande não definir eficazmente o limite de liquidez dos solos estudados.

Quanto ao “e” e à  $w_n$ , estas tendem a crescer com o aumento do  $w_p$ .

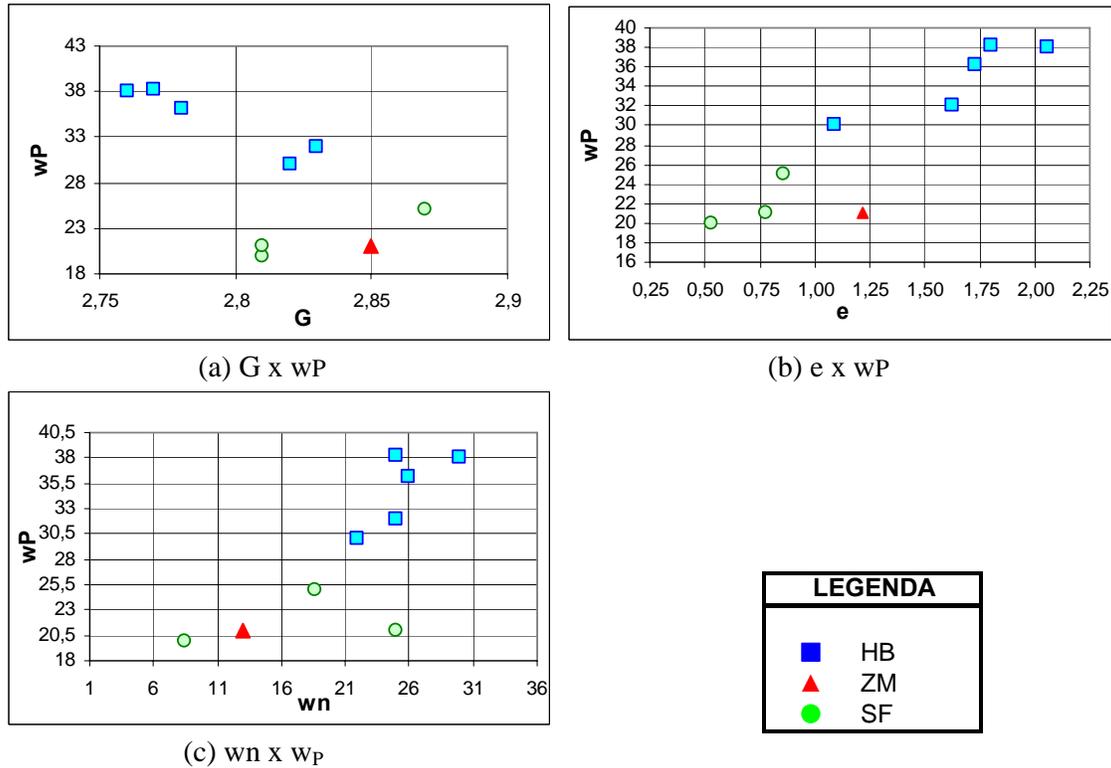


Figura 4.1 - Índices Físicos x Limite de Plasticidade

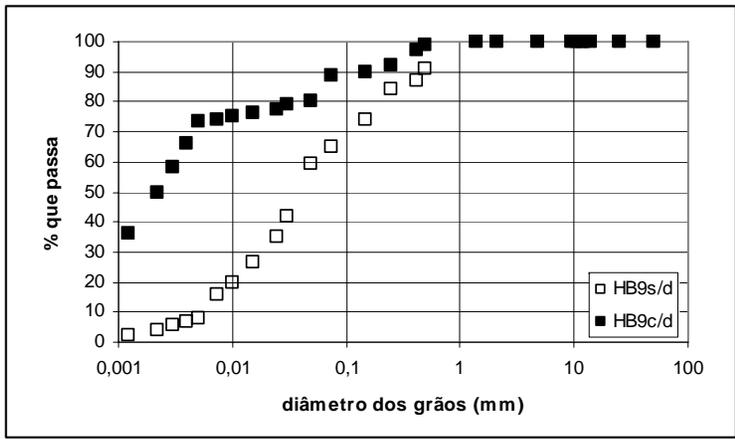
Na Tabela 4.3 é mostrada a análise granulométrica efetuada com e sem o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio. A utilização do defloculante tem por finalidade desagregar os torrões e agregações de baixa estabilidade diante do agente químico hexametáfosfato de sódio. As Figuras 4.2 exemplificam as curvas granulométricas representativas dos três grupos de solo, os resultados completos são apresentados no anexo I. A Figura 4.3 apresenta o teor de agregação calculado a partir da relação entre a quantidade de argila com defloculante (aCD) e a quantidade de argila sem defloculante (aSD).

Tabela 4.3 – Análise Granulométrica das Amostras de Solos em Estado Natural.

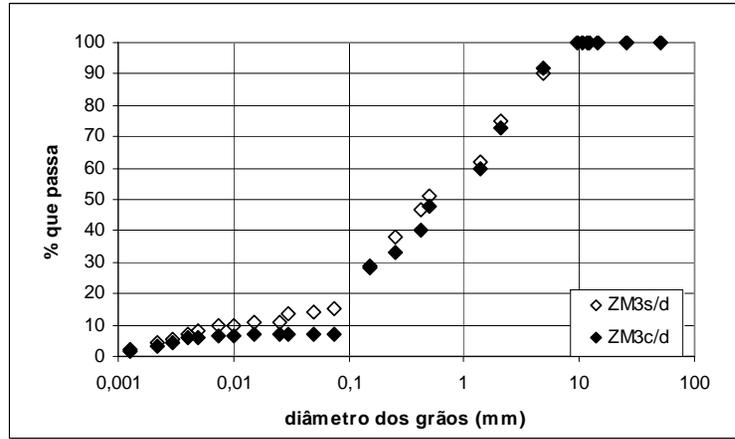
| Amostra | Análise Granulométrica<br>ABNT NBR 7181/84<br>Sem defloculante |           |           |            | Análise Granulométrica<br>ABNT NBR 7181/84<br>Com defloculante |           |           |            |
|---------|--|-----------|-----------|------------|--|-----------|-----------|------------|
|         | Pedregulho (%)   | Areia (%) | Silte (%) | Argila (%) | Pedregulho (%)   | Areia (%) | Silte (%) | Argila (%) |
| HB7     | 0,0  | 53,0      | 40,0      | 7,0        | 0,0  | 20,0      | 33,0      | 47,0       |
| HB9     | 0,0  | 40,5      | 51,5      | 8,0        | 0,0  | 11,4      | 15,0      | 73,6       |
| HB10    | 0,0  | 65,3      | 22,3      | 12,4       | 0,0  | 71,0      | 7,0       | 22,0       |
| HB11    | 0,0  | 76,5      | 17,0      | 6,5        | 0,0  | 67,4      | 7,8       | 24,8       |
| HB12    | 0,0  | 12,8      | 58,2      | 29,0       | 0,0  | 13,7      | 54,2      | 32,1       |
| HBR1    | 0,2  | 4,0       | 74,0      | 22,0       | 0,1  | 5,6       | 60,4      | 34,0       |
| HBR2    | 0,0  | 6,6       | 67,8      | 25,6       | 0,0  | 7,1       | 55,1      | 37,8       |
| ZM3     | 0,0  | 85,0      | 7,0       | 8,0        | 0,0  | 93,0      | 0,8       | 6,2        |
| ZM5     | 0,0  | 44,3      | 47,4      | 8,3        | 0,0  | 50,0      | 37,0      | 13,0       |
| ZM6     | 0,0  | 5,0       | 89,0      | 6,0        | 0,0  | 11,0      | 80,3      | 8,7        |
| SF 1    | 0,0  | 7,6       | 85,2      | 7,2        | 0,0  | 12,8      | 73,6      | 13,6       |
| SF 2    | 0,0  | 11,5      | 76,0      | 12,5       | 0,0  | 13,8      | 77,9      | 8,3        |
| SF4     | 0,0  | 12,0      | 81,0      | 7,0        | 0,0  | 27,2      | 52,5      | 20,3       |
| SF8     | 0,0  | 85,5      | 6,5       | 8,0        | 0,0  | 91,3      | 2,6       | 6,1        |
| SF13    | 0,0  | 13,8      | 78,1      | 8,1        | 0,0  | 90,0      | 5,0       | 5,0        |

A análise em conjunto das Tabelas 4.3 e 4.4 mostra o grau de agregação das partículas finas em cada solo. Nos solos (HB), tanto os arenosos como principalmente os argilosos, a razão argila (CD)/argila (SD) é sempre superior a 1, revelando que grande parte da argila está sob a forma de agregados. Segundo demonstram as razões areia (CD)/areia (SD) e silte (CD)/silte (SD), nos solos mais argilosos (HB7, HB9), os agregados são distribuídos nas frações areia e silte, enquanto que nos solos arenosos (HB11 e HB10), estes agregados formaram-se basicamente sob o tamanho silte. Nos outros solos, ou seja, (ZM) e (SF), a presença de agregados foi importante nas amostras ZM5, ZM6, SF1, SF4 enquanto nas demais, as partículas de argila mostram-se dispersas, com razões argila (CD)/argila (SD) menores que 1. No entanto, o esperado seria obter valores não inferiores a 1, mas sim iguais a 1. Lima & Camapum de Carvalho (2005) mostraram que para um solo regional contendo illita, o hexametáfosfato de sódio terminou por ter um efeito flocculador, reduzindo o teor de argila.

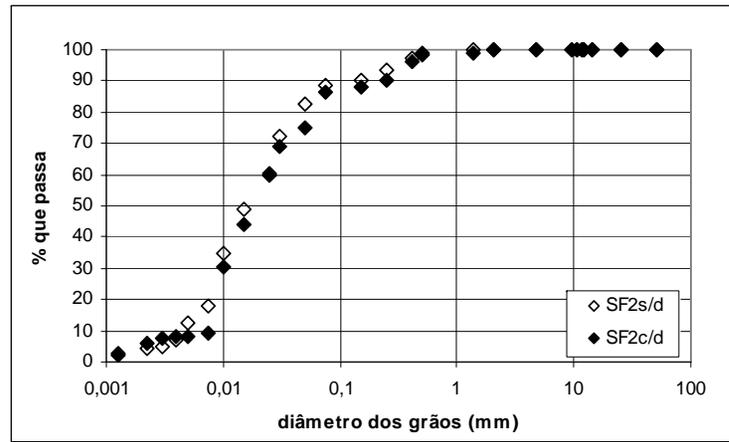
Cardoso (2002) em concordância com Araki (1997) relata que a formação de agregados é função do elevado teor de  $Al^{3+}$ . No entanto, outras análises realizadas pelo autor, a partir da extração de matéria orgânica e de oxi-hidróxidos de Fe cristalinos dispersos na matriz e de baixa cristalinidade (amorfo e paracristalinos), também mostram que estes componentes são importantes agentes na agregação dos solos, ou seja, quanto maior a concentração de um destes componentes, maior é a formação de agregados nos solos. Este fenômeno seria o principal responsável pelo elevado índice de vazios ( $e$ ) nos solos finos, que cresce de acordo com o teor da fração argila.



(a) Solo HB9



(b) ZM3



(c) Solo SF2

Figura 4.2 - Curvas Granulométricas representativas dos Solos Estudados.

Tabela 4.4 – Razões entre as Frações Granulométricas obtidas Com (CD) e Sem (SD) o Uso de Defloculante.

| Amostra | Argila (c/d) | Silte (c/d) | Areia (c/d) |
|---------|--------------|-------------|-------------|
|         | Argila (s/d) | Silte (s/d) | Areia (s/d) |
| HB7     | 6,71         | 0,83        | 0,38        |
| HB9     | 9,20         | 0,29        | 0,28        |
| HB10    | 1,77         | 0,31        | 1,09        |
| HB11    | 3,82         | 0,46        | 0,88        |
| HB12    | 1,11         | 0,93        | 1,07        |
| HBR1    | 1,55         | 0,82        | 1,40        |
| HBR2    | 1,48         | 0,81        | 1,08        |
| ZM3     | 0,78         | 0,11        | 1,09        |
| ZM5     | 1,57         | 0,78        | 1,13        |
| ZM6     | 1,45         | 0,90        | 2,20        |
| SF 1    | 1,89         | 0,86        | 1,68        |
| SF 2    | 0,66         | 1,03        | 1,20        |
| SF4     | 2,90         | 0,65        | 2,27        |
| SF8     | 0,76         | 0,40        | 1,07        |
| SF13    | 0,62         | 1,04        | 1,00        |

Plotando-se os dados apresentados na Tabela 4.4 em relação ao “e” verificou-se que “e” aumenta com o grau de agregação da fração argila (Figura 4.3). No entanto os solos HBR1 e HBR2 fogem a esta tendência, apontando para a grande fragilidade dos agregados desses solos que seriam destruídos pela simples presença da água.

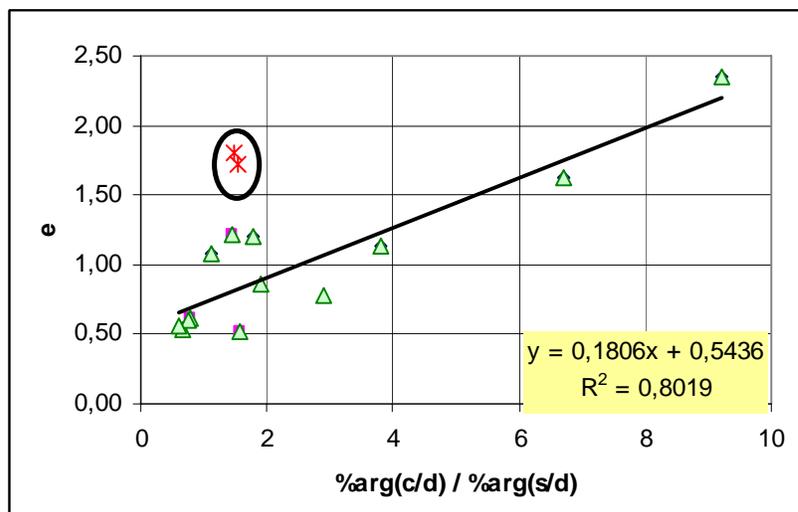


Figura 4.3 - Relação entre Teor de argila Com e Sem Defloculante e Índice de Vazios.

Uma vez que compõe o escopo deste trabalho o estudo dos solos já citados considerando a estabilização química, realizada com a incorporação de 2% e 6% de cal hidratada,

apresentou-se na Tabela 3.5 as características da cal calcítica usada. Deve ser destacado que, estes dados foram fornecidos pelo fabricante.

Segundo Fossberg & Gregg (1963) *apud* Nóbrega (1991), quando a cal é adicionada ao solo o fenômeno de troca de bases ocorre com os minerais de argila. Esta relação leva à flocculação das partículas argilosas causando o aumento no ângulo de atrito da massa do solo. Isto se manifesta pelo decréscimo de  $w_L$  e IP e, frequentemente, pelo aumento de umidade ótima. Ainda segundo esses autores, a redução do  $w_L$  e do IP, com a adição da cal, é provocada pela diminuição das espessuras das camadas de água adsorvidas devido à troca de bases. No entanto, Rezende (2003) mostra que os solos HBR1 e HBR2 são inicialmente desagregados com a incorporação de cal. A Tabela 4.5 apresenta os resultados de  $w_L$ ,  $w_P$  e IP para todos os solos, considerando os teores de 0%, 2% e 6% de cal em peso, sendo possível observar que nem sempre o comportamento é o mesmo.

Pelos dados de que se dispõe na literatura, quando se analisa a influência da adição da cal, em vários teores, sobre os Limites de Atterberg, observa-se que o índice de plasticidade diminui, o que não é uma verdade absoluta para os solos estudados (Tabela 4.5). Nota-se que, os latossolos HB7, HB10, HB12, HBR1, HBR2 apresentam aumento do  $w_L$  com a adição de 2% de cal. Comportamento igual é observado para os solos ZM (zona mosqueada) e SF (saprólitos).

Quanto aos solos HB9b e HB11, os valores de  $w_L$  caem com a adição de 2% de cal. Em relação ao  $w_P$  nota-se comportamento similar ao que ocorre para o  $w_L$ . No entanto, ao incorporar 6% de cal, verifica-se comportamento diferenciado, com decréscimo de  $w_L$ , em relação ao teor de 2% de cal, para alguns solos (HB7, HB12 e HBR1) e, aumento para os demais. Em relação ao  $w_P$ , ocorre também decréscimo para alguns solos (HB7, HB10, HB12, HBR2) e aumento para os demais. Passando-se a avaliar o IP é possível verificar igualmente que tal comportamento não é constante para todos os tipos de solo e muito menos está diretamente associado ao acréscimo do teor de cal. Há solos em que a incorporação de 2% de cal praticamente não gera modificações no IP (HB7, HB9b). Outros, em que este valor decresce (HB11, HB12, ZM6, SF2, SF4) e ainda, outros em que ocorrem aumentos não muito significativos de IP (HBR1 e HBR2). Destaca-se que os solos HB10 e SF13, que no estado natural eram não plásticos, passaram a apresentar plasticidade com a adição de cal.

Os resultados deixam claro que considerar que a cal agrega o solo ou reduz sua plasticidade não pode ser considerado como uma avaliação apropriada aos solos tropicais, e nem poderia ser para os demais solos, pois Grim (1966) *apud* Lima (1981) mostra que a alteração da plasticidade e do comportamento do solo com a adição de cálcio, depende da

mineralogia. Enquanto nos solos de regiões temperadas as trocas catiônicas e a mineralogia reina quase que de forma absoluta influenciando a plasticidade e agregação das partículas com a incorporação de cal, nos solos tropicais fatores como o ponto isoelétrico são determinantes, fazendo com que alguns solos agreguem e reduzam a plasticidade e outros, desagreguem ampliando-a. É certo que após a desagregação ao se aumentar o teor de cal o solo pode voltar a agregar e reduzir a plasticidade. Rezende (2003) e Pessoa (2004) realizaram o fenômeno em suas pesquisas e Cardoso (2002) mostra a importância do ponto isoelétrico para a estabilidade estrutural dos solos tropicais.

Tabela 4.5 – Limites de Atterberg Com a Cal Hidratada Incorporada.

| Amostra       | Limites de Atterberg |      |      |
|---------------|----------------------|------|------|
|               | LL                   | LP   | IP   |
| HB7 - 0% cal  | 40                   | 32   | 8    |
| HB7 - 2% cal  | 46                   | 38   | 8    |
| HB7 - 6% cal  | 42,7                 | 34   | 8,7  |
| HB9b - 0% cal | 48                   | 38   | 10   |
| HB9b - 2% cal | 46,2                 | 36,1 | 10,1 |
| HB9b - 6% cal | 48                   | 40,5 | 7,5  |
| HB10 - 0% cal | NL                   | NP   | x    |
| HB10 - 2% cal | 32,2                 | 21,5 | 10,7 |
| HB10 - 6% cal | 33                   | 21   | 12   |
| HB11 - 0% cal | 27,4                 | 18,3 | 9,1  |
| HB11 - 2% cal | 27,3                 | 22   | 5,3  |
| HB11 - 6% cal | 28,2                 | 22   | 6,2  |
| HB12 - 0% cal | 45                   | 30   | 15   |
| HB12 - 2% cal | 46,5                 | 37,7 | 8,8  |
| HB12 - 6% cal | 46,2                 | 36   | 10,2 |
| HBR1 - 0% cal | 43,9                 | 29,9 | 14   |
| HBR1 - 2% cal | 47,7                 | 33,3 | 14,4 |
| HBR1 - 6% cal | 44,2                 | 34,5 | 9,7  |
| HBR2 - 0% cal | 44,1                 | 37,7 | 6,4  |
| HBR2 - 3% cal | 45                   | 38,2 | 6,8  |
| HBR2 - 6% cal | 45                   | 37,4 | 7,6  |
| ZM3 - 0% cal  | NL                   | NP   | x    |
| ZM3 - 2% cal  | NL                   | NP   | x    |
| ZM3 - 6% cal  | NL                   | NP   | x    |
| ZM6 - 0% cal  | 38                   | 21   | 17   |
| ZM6 - 2% cal  | 42                   | 30   | 12   |
| ZM6 - 6% cal  | 44                   | 36   | 8    |
| SF2 - 0% cal  | 42                   | 20   | 22   |
| SF2 - 2% cal  | 43,5                 | 23,5 | 20   |
| SF2 - 6% cal  | 44,7                 | 30   | 14,7 |
| SF4 - 0% cal  | 36                   | 21   | 15   |
| SF4 - 2% cal  | 42,8                 | 30,5 | 12,3 |
| SF4 - 6% cal  | 48,1                 | 31,9 | 16,2 |
| SF8 - 0% cal  | NL                   | NP   | x    |
| SF8 - 2% cal  | NL                   | NP   | x    |
| SF8 - 6% cal  | NL                   | NP   | x    |
| SF13 - 0% cal | NL                   | NP   | x    |
| SF13 - 2% cal | 25,5                 | 20   | 5,5  |
| SF13 - 6% cal | 27,2                 | 21,8 | 5,4  |

## 4.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Como já visto no item de Revisão Bibliográfica, existem diferentes classificações para os solos, baseadas em geral em índices físicos. No Brasil, o sistema de classificação de solos mais usado em pavimentação rodoviária é o que segue as instruções do “*Transportation Research Board (TRB)*” e à “*Unified Soil Classification System (SUCS)*”. No entanto, pesquisas iniciadas por Nogami & Villibor quanto ao comportamento de solos tropicais demonstraram que o comportamento destes materiais, muitas vezes foge ao esperado pelas classificações tradicionais, o que ocasionou a proposição da metodologia MCT, através de uma série de procedimentos que reproduzem condições mais reais de camadas de solos tropicais usadas em pavimentação. Sendo assim, serão apresentadas as três classificações para cada solo estudado. A Tabela 4.6 sintetiza a classificação dos materiais dos materiais obtida pelos três sistemas de classificação e, as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 localizam os pontos nos gráficos HRB, SUCS e MCT. É importante destacar, a presença da maioria dos latossolos abaixo da linha A na carta de Casagrande (Figura 4.5) conforme discutido ao longo deste capítulo.

Tabela 4.6 – Classificação dos Solos.

| Amostra | HRB           | SUCS | MCT |
|---------|---------------|------|-----|
| HB7     | A-7-5         | SM   | LG' |
| HB9     | A-5           | ML   | NA' |
| HB10    | A-2-6         | SM   | LG' |
| HB11    | A-2-6         | SM   | LG' |
| HB12    | A-7-5         | MH   | NG' |
| HBR1    | A-7-5         | MH   | LG' |
| HBR2    | A-7-5         | MH   | LG' |
| ZM3     | A-3           | SC   | LG' |
| ZM5     | A-4           | ML   | -   |
| ZM6     | A-6           | CL   | LG' |
| SF 1    | A-7-6         | ML   | -   |
| SF 2    | A-6           | CL   | LG' |
| SF4     | A-6           | CL   | LG' |
| SF8     | A-2-4 / A-2-5 | SC   | NG' |
| SF13    | A-4           | SM   | NA  |

| Classificação Geral                           | Materiais Granulares<br>( ≤ 35% passando na peneira 200) |        |            |                                   |        |        | Materiais Siltosos e Argilosos<br>( >35% passando na peneira 200) |        |                 |        |        |
|---|--|--------|------------|-----------------------------------|--------|--------|---|--------|-----------------|--------|--------|
|   | A-1  |        | A-3        | A-2                               |        |        | A-4   | A-5    | A-6             | A-7    |        |
|   | A-1-a  | A-1-b  |            | A-2-4                             | A-2-5  | A-2-6  |   |        |                 |        | A-2-7  |
| Grupo   |  |        |            |                                   |        |        |   |        |                 |        |        |
| Peneira: % que passa                          |  |        | *          |                                   |        | ■      |   |        | ▲               | ■ ■    |        |
| n° 10 .....                                   | 50 máx   |        |            | ▲                                 | ▲      | ■      |   | *      | □               | □ ▲    |        |
| n° 40 .....                                   | 30 máx   | 50 máx | 51 máx     |                                   |        |        |   |        |                 | ■ ▲    |        |
| n° 200 .....                                  | 15 máx   | 25 máx | 10 máx     | 35 máx                            | 35 máx | 35 máx | 35 máx  | 36 min | 36 min          | 36 min |        |
| Características da fração que passa na n° 40: |  |        |            |                                   |        |        |   |        |                 |        |        |
| LL (%) .....                                  |  |        |            | 40 máx                            | 41 mín | 40 máx | 41 mín  | 40 máx | 41 mín          | 40 máx | 41 mín |
| IP (%) .....                                  | 6 máx  |        | NP         | 10 máx                            | 10 máx | 11 mín | 11 mín  | 10 máx | 10 máx          | 11 mín | 11 mín |
| Índice de Grupo (IG) .....                    | 0  |        | 0          | 0                                 |        | 4 máx  |   | 8 máx  | 2 máx           | 16 máx | 20 máx |
| Materiais que predominam                      | Pedra britada, pedreg e areia                            |        | areia fina | Areia e areia siltosa ou argilosa |        |        | Solos Siltosos  |        | Solos Argilosos |        |        |
| Comportamento geral como Subleito             | Excelente a Bom  |        |            |                                   |        |        | Fraco a pobre   |        |                 |        |        |

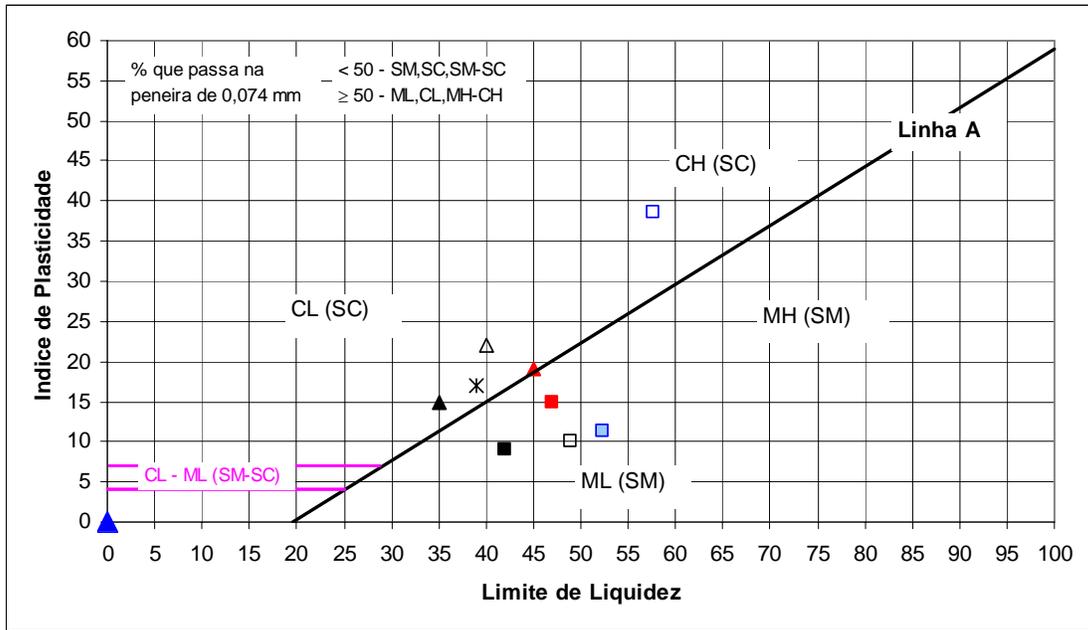
| LEGENDA - HRB, SUCS, MCT |     |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |
|--------------------------|-----|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|
| ■                        | HB7 | □ | HB9b | □ | HB10 | ■ | HB11 | ■ | HB12 | □ | HBR1 | ■ | HBR2 |
| *                        | ZM3 | * | ZM5  | * | ZM6  |   |      |   |      |   |      |   |      |
| ▲                        | SF1 | △ | SF2  | ▲ | SF4  | ▲ | SF8  | △ | SF13 |   |      |   |      |

Figura 4.4 – Classificação TRB

|  |   |                      |   |  |
|--|---|----------------------|---|--|
| Solos de Graduação Grossa:<br><br>mais de 50% retido na peneira n° 200 | Pedregulhos : 50% ou mais da fração graúda retida na peneira n° 4 | Pedregulho sem finos | GW  | Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino |
|  |   |                      | GP  | Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino |
|  |   | Pedregulho com finos | GM  | Pedregulhos siltosos ou mistura de pedreg., areia e argila                           |
|  |   |                      | GC  | Pedregulhos argilosos ou mistura de pedreg., areia e argila                          |
|  | Areias : mais de 50% da fração graúda passando na peneira n° 4    | Areias sem finos     | SW  | Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino               |
|  |   |                      | SP  | Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino               |
| Areias com finos   |   | SM                   | Areias siltosas - Misturas de areia e silte □ ■ △   |  |
| Solos de Graduação Fina:<br><br>50% ou mais passando na peneira n° 200 | Siltos ou Argilas com : LL ≤ 50                                   | ML                   | Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilas *                           |  |
|  |   | CL                   | Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade. Argilas Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas |  |
|  |   | OL                   | Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade                                   |  |
|  | Siltos e Argilas com : LL > 50                                    | MH                   | Siltos - Areias finas ou siltos micáceos - Siltos elásticos   |  |
|  |   | CH                   | Argilas inorgânicas de alta plasticidade  |  |
|  |   | OH                   | Argilas orgânicas de alta e média plasticidade  |  |
| Solos altamente orgânicos  |   | PT                   | Turfas e outros solos altamente orgânicos   |  |

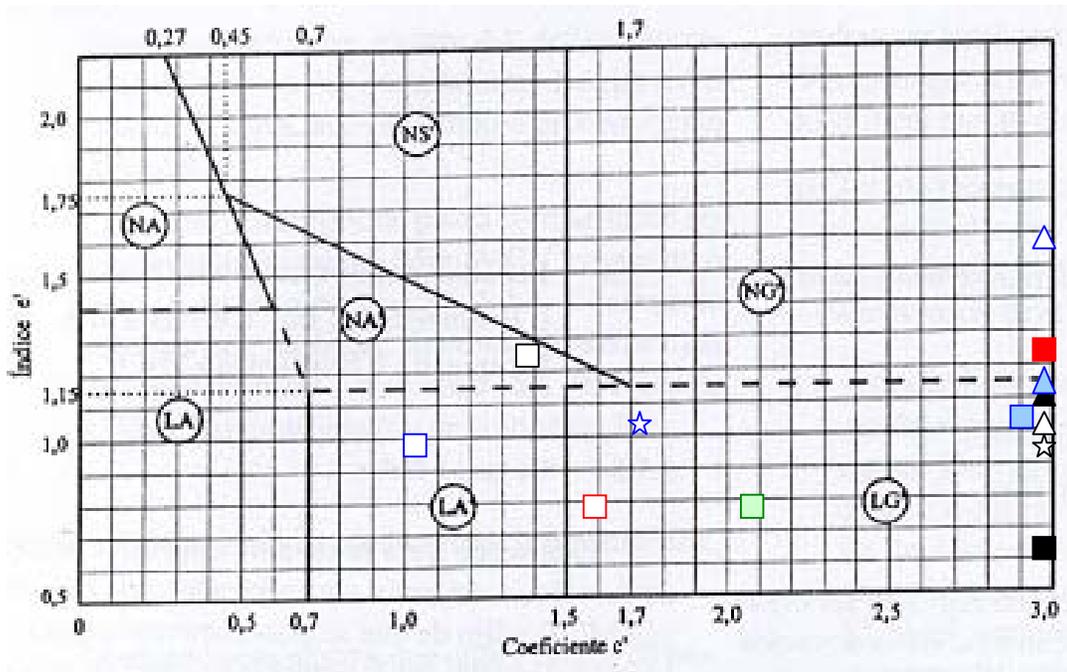
| LEGENDA - HRB, SUCS, MCT |     |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |
|--------------------------|-----|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|
| ■                        | HB7 | □ | HB9b | □ | HB10 | ■ | HB11 | ■ | HB12 | □ | HBR1 | ■ | HBR2 |
| *                        | ZM3 | * | ZM5  | * | ZM6  |   |      |   |      |   |      |   |      |
| ▲                        | SF1 | △ | SF2  | ▲ | SF4  | ▲ | SF8  | △ | SF13 |   |      |   |      |

Figura 4.5 - Classificação SUCS



| LEGENDA - HRB, SUCS, MCT |        |        |        |        |        |        |  |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| ■ HB7                    | □ HB9b | □ HB10 | ■ HB11 | ■ HB12 | □ HBR1 | ■ HBR2 |  |
| * ZM3                    | * ZM5  | * ZM6  |        |        |        |        |  |
| ▲ SF1                    | △ SF2  | ▲ SF4  | ▲ SF8  | △ SF13 |        |        |  |

Figura 4.5 - Classificação SUCS – Continuação.



| LEGENDA - HRB, SUCS, MCT |        |        |        |        |        |        |  |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| ■ HB7                    | □ HB9b | □ HB10 | ■ HB11 | ■ HB12 | □ HBR1 | ■ HBR2 |  |
| * ZM3                    | * ZM5  | * ZM6  |        |        |        |        |  |
| ▲ SF1                    | △ SF2  | ▲ SF4  | ▲ SF8  | △ SF13 |        |        |  |

Figura 4.6 - Ábaco para Classificação MCT.

## 5 - PROPRIEDADES QUÍMICAS, MINERALÓGICAS E CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS

### 5.1 - PROPRIEDADES QUÍMICAS

Como mencionado anteriormente, os solos estudados nesta pesquisa já foram objeto de pesquisas por parte de Cardoso (2002) e Rezende (2003), portanto serão apresentados os resultados obtidos pelos referidos autores e os resultados deste estudo. Tal procedimento foi realizado primeiramente como forma de confirmação da identidade dos materiais e, em segundo plano, considerando que nem sempre foi possível efetuar a coleta no ponto exato referido pelos autores, embora se buscasse coletar as amostras em ponto o mais próximo possível. Devido a tal possibilidade de diferença de ponto de coleta, diferenças oriundas da repetibilidade dos ensaios e ou metodológicas, são registradas pequenas diferenças entre os valores anteriormente determinados e os atuais. A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos autores já citados e, na Tabela 5.2 são colocados os resultados obtidos no decorrer desta pesquisa.

Observa-se que tanto o pH em H<sub>2</sub>O quanto em KCl, mostram que os solos analisados são ácidos. Segundo Melfi & Pedro (1978) *apud* Cardoso (2002), as soluções de alteração que ocorrem nos meios tropicais são caracterizadas por uma certa carga de CO<sub>2</sub>, devido à rápida degradação da matéria orgânica, gerando características levemente ácidas com pH variando entre 5,5 e 6,0. Tal afirmação corrobora com os valores de pH obtidos, sendo que em alguns casos os pH foram ainda menores.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (1996) e Cardoso (1995 e 2002), o pH dos solos finos está associado diretamente ao teor de argila que os compõe. O pH representa um fator importante na formação de agregados e, conseqüentemente, influencia o arranjo estrutural entre os sólidos do solo e define a distribuição dos vazios. Verifica-se que, a floculação dos minerais de argila é mais fácil quanto mais ácido é o pH do solo.

A Tabela 5.1 mostra os resultados de pH obtidos para os solos estudados. A diferença entre os dois resultados de pH ( $\Delta$ pH) mostra-se negativa para todas as amostras, excetuando-se HB11, significando que nestas amostras ocorre predomínio de argilas silicatadas. O valor positivo de  $\Delta$ pH para HB11 demonstra ser este o único solo estudado onde predomina os oxi-hidróxidos de Fe e Al sobre os minerais de argila, o que está de acordo com a composição mineralógica.

Segundo os critérios de avaliação recomendados por Catani *et al.* (1955) (*apud* Cardoso, 2002) para a Capacidade de Troca Catiônica (CTC), pode-se considerar que os solos estudados são todos de baixa CTC ( $< 4,62$  cmol<sub>c</sub>/kg), excetuando-se HB12, HBR1 e HBR2 que são definidos como de média CTC (de 4,62 a 11,30 cmol<sub>c</sub>/kg).

Estes resultados podem ser reflexos dos baixos teores de matéria orgânica (MO) dos solos, onde se observa que, os teores mais elevados são os dos solos HB10, HB12 e HBR2. Destaca-se, no entanto que, os valores de CTC não se encontram diretamente correlacionáveis com os teores de matéria orgânica.

De acordo com Cardoso (2002), a matéria orgânica pode influenciar alguns parâmetros físicos do solo, como G, grau de agregação e limites de Atterberg, embora para os solos estudados, devido ao baixo teor de MO, estas alterações não sejam marcantes.

Botelho da Costa (1973) *apud* Guimarães (2002), destaca que além do processo de endurecimento e cimentação que ocorre nos solos tropicais, a agregação em solos lateríticos decorre também da ação floculante (irreversível ou não) dos hidróxidos de ferro ou alumínio. Tem-se também que os sistemas dominados por íons de Al e H apresentam fraca resistência à floculação. Neste tipo de solo, a lixiviação geralmente provoca a liberação de Al<sup>+3</sup> da malha cristalina que passa a ocupar posições de troca. A forte retenção do íon trivalente corresponde à fraca espessura da camada dupla e forte neutralização das cargas negativas das partículas coloidais, explicando o domínio do processo de floculação em sistemas controlados por íons Al<sup>+3</sup> e H<sup>+</sup> em comparação com os solos saturados por Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup> ou Na<sup>+</sup>. Além da influência de Al<sup>+3</sup> e H<sup>+</sup>, a floculação por ácidos é facilitada pela redução da carga negativa resultante da influência do pH reduzido. Cardoso (2002) considerando tal observação e, embasado nas microscopias apresentadas em subitem posterior poder-se-ia dizer que os solos HB são os que apresentam maior capacidade de agregação, devido aos maiores teores de Al<sup>3+</sup> em relação ao teor de argila; no entanto, observa-se que o fenômeno não é tão simples assim, pois outros fatores que atuam neste possível potencial de agregação, interferem no processo.

Observa-se também que quando o valor obtido para saturação das bases (V) está situado entre 25% e 50%, sendo classificado como baixo, isto indica geralmente que o solo é intemperizado. Com base nesse índice, poder-se-ia dizer que os solos HB7, HB10, HBR1 e HBR2 são mais intemperizados.

Tabela 5.1 – Propriedades Químicas dos Solos Estudados.  
modificado – Cardoso (2002).

| Amostra | pH KCl | pH H <sub>2</sub> O | Δ pH  | Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup><br>cmolc/kg | K <sup>+</sup><br>cmolc/kg | Na <sup>+</sup><br>cmolc/kg | Al <sup>3+</sup><br>cmolc/kg | H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup><br>cmolc/kg | % Al  | % V   | CTC<br>cmolc/kg | MO<br>(%) |
|---------|--------|---------------------|-------|---|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|-------|-------|-----------------|-----------|
| HB7     | 4,9    | 5,5                 | -0,6  | 0,08  | 0,01                       | ND                          | 0,55                         | 0,7   | 28,67 | 38,15 | 0,79            | 0,5       |
| HB9b    | 5,1    | 5,5                 | -0,4  | 0,01  | 0,02                       | ND                          | 0,23                         | 1,1   | 39,34 | 67,67 | 1,13            | 0,5       |
| HB10    | 4,11   | 4,6                 | -0,49 | 0,21  | 0,03                       | ND                          | 0,24                         | 1,96  | 9,92  | 25,78 | 2,2             | 0,71      |
| HB11    | 5,4    | 5,2                 | 0,2   | 0,18  | 0,01                       | ND                          | 0,60                         | 1,46  | 12,81 | 78,33 | 1,65            | 0,5       |
| HB12    | 4,8    | 6,1                 | -1,3  | 0,38  | 0,12                       | ND                          | 1,22                         | 5,56  | 17,83 | 61,57 | 6,06            | 0,65      |
| HBR1    | 4,2    | 5,1                 | -0,9  | 2,2   | 0,11                       | 0,04                        | 1                            | 5   | 30    | 32    | 7,35            | 5,2       |
| HBR2    | 5,0    | 5,2                 | -0,2  | 0,6   | 0,03                       | 0,1                         | 0,1                          | 4,6   | 12    | 14    | 5,33            | 8,6       |
| ZM3     | 5,02   | 5,1                 | -0,08 | 0,19  | 0,01                       | ND                          | 0,01                         | 0,4   | 3,66  | 93,15 | 0,6             | 0,15      |
| ZM5     | 4,49   | 4,9                 | -0,41 | 0,23  | 0,01                       | ND                          | 0,11                         | 1,76  | 17,41 | 70,77 | 2               | 0,15      |
| ZM6     | 4,2    | 5,1                 | -0,9  | 0,19  | 0,01                       | ND                          | 0,03                         | 0,66  | 21,52 | 55,76 | 0,86            | 0,05      |
| SF1     | 4,1    | 4,7                 | -0,6  | 0,24  | 0,03                       | ND                          | 0,08                         | 1,92  | 17,84 | 67,06 | 2,19            | 0,15      |
| SF2     | 4,09   | 4,8                 | -0,71 | 0,28  | 0,02                       | ND                          | 0,08                         | 1,04  | 16,57 | 71,06 | 1,34            | 0,05      |
| SF4     | 4,05   | 4,7                 | -0,65 | 0,23  | 0,01                       | ND                          | 0,04                         | 1,26  | 18,75 | 69,42 | 1,5             | 0,2       |
| SF8     | 4,45   | 4,8                 | -0,35 | 0,12  | 0,1                        | ND                          | 0,36                         | 2,78  | 3,78  | 86,88 | 3               | 0,07      |
| SF13    | 4,15   | 4,7                 | -0,55 | 0,24  | 0,02                       | ND                          | 0,02                         | 0,58  | 17,06 | 72,02 | 0,84            | 0,23      |

Tabela 5.2 – Propriedades Químicas dos Solos Estudados.

| Amostra | pH KCl | pH H <sub>2</sub> O | Δ pH  | Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup><br>cmolc/kg | K <sup>+</sup><br>cmolc/kg | Na <sup>+</sup><br>cmolc/kg | Al <sup>3+</sup><br>cmolc/kg | H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup><br>cmolc/kg | % Al | % V | CTC<br>cmolc/kg | MO<br>(%) |
|---------|--------|---------------------|-------|---|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|------|-----|-----------------|-----------|
| HB7     | 4,9    | 5,6                 | -0,7  | 0,07  | 0,03                       | ND                          | 0,60                         | 0,81  | 25   | 35  | 0,81            | 0,45      |
| HB9b    | 5      | 5,5                 | -0,5  | 0,03  | 0,04                       | ND                          | 0,30                         | 1,2   | 40   | 62  | 1,27            | 0,35      |
| HB10    | 4,05   | 4,5                 | -0,45 | 0,24  | 0,03                       | ND                          | 0,16                         | 1,92  | 11   | 20  | 2,19            | 0,7       |
| HB11    | 5,5    | 5,3                 | 0,2   | 0,17  | 0,02                       | ND                          | 0,52                         | 1,51  | 15   | 75  | 1,7             | 0,55      |
| HB12    | 4,75   | 6,1                 | -1,35 | 0,4   | 0,11                       | ND                          | 1,10                         | 5,5   | 25   | 57  | 6,01            | 0,67      |
| HBR1    | 4,2    | 5,1                 | -0,9  | 2,1   | 0,11                       | ND                          | 0,9                          | 5   | 29   | 30  | 7,21            | 0,51      |
| HBR2    | 5,0    | 5,2                 | -0,2  | 0,8   | 0,02                       | ND                          | 0,1                          | 4,8   | 15   | 12  | 5,62            | 0,88      |
| ZM3     | 5      | 5,1                 | -0,1  | 0,21  | 0,02                       | ND                          | 0,01                         | 0,6   | 6    | 90  | 0,83            | 0,2       |
| ZM5     | 4,45   | 4,8                 | -0,35 | 0,25  | 0,01                       | ND                          | 0,10                         | 1,78  | 20   | 66  | 2,04            | 0,2       |
| ZM6     | 4,1    | 5                   | -0,9  | 0,2   | 0,01                       | ND                          | 0,03                         | 0,61  | 25   | 56  | 0,82            | 0,04      |
| SF1     | 4,15   | 4,7                 | -0,55 | 0,25  | 0,03                       | ND                          | 0,03                         | 1,9   | 18   | 65  | 2,18            | 0,18      |
| SF2     | 4,11   | 4,8                 | -0,69 | 0,29  | 0,02                       | ND                          | 0,05                         | 1,08  | 15   | 70  | 1,39            | 0,05      |
| SF4     | 4,05   | 4,7                 | -0,65 | 0,22  | 0,02                       | ND                          | 0,02                         | 1,28  | 19   | 70  | 1,52            | 0,2       |
| SF8     | 4,4    | 4,7                 | -0,3  | 0,13  | 0,1                        | ND                          | 0,40                         | 2,81  | 6    | 85  | 3,04            | 0,08      |
| SF13    | 4,2    | 4,7                 | -0,5  | 0,25  | 0,03                       | ND                          | 0,01                         | 0,61  | 15   | 72  | 0,89            | 0,25      |

O teor em alumínio trocável é baixo na maioria dos solos estudados, sendo o valor máximo apresentado pelo solo HB12. Quanto ao hidrogênio trocável, este varia consideravelmente para os solos estudados, chegando ao valor máximo igual a 4,5 no solo HBR2.

Cardoso (2002) realizou a análise química total das amostras de solos estudadas. Uma vez que o comportamento dos solos lateríticos é, muitas vezes, totalmente diferenciado dos classificados como não lateríticos é essencial verificar a classificação de todos os solos estudados. De acordo com o DER-SP (1971), o solo laterítico é o material cuja fração coloidal (abaixo de 2 micra) apresenta relação molecular sílica/sesquióxidos menor que 2 e, em conjunto a presença apreciável de sesquióxido de ferro, tendência para o concrecionamento e endurecimento sob exposição ao sol, baixa expansibilidade e baixo teor de matéria orgânica. Sendo assim, a Tabela 5.3 apresenta a análise química total dos solos estudados, realizada por

Cardoso (2002) e ainda, a determinação da relação sílica-sesquióxidos (kr), indicando ainda a classificação em laterítico ou não laterítico.

Tabela 5.3 – Análise Química Total e Cálculo da Relação Sílica-Sesquióxidos

| Amostra | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | CaO (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | K <sub>2</sub> O (%) | MgO (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | TiO <sub>2</sub> (%) | PF (%) | Soma(%) | Kr    | quartzo (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | Kr          |
|---------|------------------------------------|---------|------------------------------------|----------------------|---------|----------------------|----------------------|--------|---------|-------|-------------|----------------------|-------------|
| HB7     | 29,6                               | 0,04    | 13,13                              | 0,2                  | 0,06    | 37,98                | 1,68                 | 17,18  | 99,87   | 0,89  | 22,3        | 29,51                | <b>0,69</b> |
| HB9b    | 39,99                              | 0,02    | 12,14                              | 0,14                 | 0,04    | 25,71                | 2,17                 | 19,99  | 100,2   | 0,49  | 3,7         | 24,76                | <b>0,47</b> |
| HB10    | 10,37                              | 0,06    | 3,8                                | 0,19                 | 0       | 78,18                | 0,51                 | 6,13   | 99,24   | 5,52  | 69,2        | 24,08                | <b>1,70</b> |
| HB11    | 13,68                              | 0,1     | 6,81                               | 0,07                 | 0       | 67,65                | 0,85                 | 9,88   | 99,03   | 3,30  | 63,4        | 24,76                | <b>1,21</b> |
| HB12    | 19,59                              | 0,1     | 8,61                               | 4,05                 | 0,88    | 57,1                 | 0,83                 | 7,93   | 99,09   | 2,02  | 33,6        | 37,91                | <b>1,34</b> |
| ZM3     | 3,69                               | 0,08    | 1,73                               | 0,55                 | 0       | 92,61                | 0,14                 | 1,48   | 100,27  | 17,09 | 88,6        | 10,56                | <b>1,95</b> |
| ZM5     | 17,6                               | 0,07    | 5,73                               | 4,01                 | 0,24    | 66,7                 | 0,84                 | 3,85   | 99,04   | 2,86  | 54,2        | 30,55                | <b>1,31</b> |
| ZM6     | 21,62                              | 0,04    | 13,03                              | 1,57                 | 0,26    | 53,94                | 0,88                 | 8,29   | 99,63   | 1,56  | 30,3        | 37,60                | <b>1,09</b> |
| SF1     | 18,05                              | 0,03    | 8,46                               | 3,76                 | 0,58    | 62,83                | 0,66                 | 4,85   | 99,22   | 2,37  | 35,3        | 40,65                | <b>1,53</b> |
| SF2     | 16,76                              | 0,11    | 6,75                               | 3,28                 | 0,6     | 67,25                | 0,81                 | 4,36   | 99,92   | 2,86  | 46,2        | 36,18                | <b>1,54</b> |
| SF4     | 18,85                              | 0,06    | 4,71                               | 4,27                 | 0,26    | 64,97                | 0,88                 | 4,95   | 98,95   | 2,76  | 32,1        | 44,11                | <b>1,87</b> |
| SF8     | 4,4                                | 0,08    | 3,88                               | 0,09                 | 0       | 86,86                | 0,35                 | 2,82   | 98,48   | 10,49 | 81,7        | 15,90                | <b>1,92</b> |
| SF13    | 17,21                              | 0,11    | 5,62                               | 4,31                 | 0,53    | 67,19                | 0,65                 | 3,5    | 99,12   | 2,94  | 45,1        | 36,89                | <b>1,62</b> |

Os valores de Kr apresentados na última coluna da Tabela 5.3 são os calculados sem o percentual de quartzo. Os valores de Kr inferiores a 2 indicam que todos os solos estudados são lateríticos. De acordo com a Figura 4.6 (Classificação MCT), os solos HB9b, SF13 e SF4 são não lateríticos e, os HB12 e SF8 estão localizados na linha entre o LG/NG', podendo apresentar comportamento laterítico ou não laterítico. É importante destacar que, de acordo com a separação nos três grupos de solos (latossolo, zona mosqueada e saprólito), a relação sílica-sesquióxidos não está coincidindo com o esperado.

Uma vez que serão realizados estudos dos solos já citados com a incorporação de cal hidratada, foram realizadas análises químicas com os respectivos teores de cal usados. Buscou-se assim, determinar o “teor ótimo” de cal necessário para estabilizar o material segundo o método de Eades e Grim. A partir deste teor, verificar-se-á se este é realmente suficiente para a obtenção de valores consideráveis de sucção. A Tabela 5.4 mostra a evolução do pH dos solos com a incorporação da cal.

Tabela 5.4 – Evolução do pH com a Incorporação de Cal.

| Solo | % cal | pH água | pH KCl | $\Delta$ pH |
|------|-------|---------|--------|-------------|
| HB7  | 0     | 5,6     | 4,9    | -0,7        |
| HB7  | 2     | 13,1    | 11,7   | -1,4        |
| HB7  | 3     | 11,71   | 11,85  | 0,14        |
| HB7  | 4     | 12,58   | 12,65  | 0,07        |
| HB7  | 5     | 12,63   | 12,95  | 0,32        |
| HB7  | 6     | 12,72   | 13,03  | 0,31        |
| HB7  | 7     | 12,78   | 13,05  | 0,27        |
| HB7  | 8     | 12,81   | 13,09  | 0,28        |
| HB9b | 0     | 5,5     | 5      | -0,5        |
| HB9b | 2     | 11,8    | 11,8   | 0           |
| HB9b | 3     | 11,9    | 11,9   | 0           |
| HB9b | 4     | 12,06   | 12,32  | 0,26        |
| HB9b | 5     | 12,17   | 12,41  | 0,24        |
| HB9b | 6     | 12,84   | 12,45  | -0,39       |
| HB9b | 7     | 12,29   | 12,48  | 0,19        |
| HB9b | 8     | 12,36   | 12,49  | 0,13        |
| HB10 | 0     | 4,5     | 4,05   | -0,45       |
| HB10 | 2     | 12,26   | 12,29  | 0,03        |
| HB10 | 3     | 12,09   | 12,32  | 0,23        |
| HB10 | 4     | 12,33   | 12,44  | 0,11        |
| HB10 | 5     | 12,29   | 12,46  | 0,17        |
| HB10 | 6     | 12,25   | 12,42  | 0,17        |
| HB10 | 7     | 12,33   | 12,48  | 0,15        |
| HB10 | 8     | 12,31   | 12,46  | 0,15        |
| HB11 | 0     | 5,3     | 5,5    | 0,2         |
| HB11 | 2     | 12,2    | 11,9   | -0,3        |
| HB11 | 3     | 12,83   | 12,96  | 0,13        |
| HB11 | 4     | 12,9    | 13,04  | 0,14        |
| HB11 | 5     | 12,93   | 13,07  | 0,14        |
| HB11 | 6     | 13,2    | 13,4   | 0,2         |
| HB11 | 7     | 13,3    | 13,5   | 0,2         |
| HB11 | 8     |         |        |             |
| HB12 | 0     | 6,1     | 4,75   | -1,35       |
| HB12 | 2     | 11,83   | 11,56  | -0,27       |
| HB12 | 3     | 12,56   | 12,03  | -0,53       |
| HB12 | 4     | 12,8    | 17,75  | 4,95        |
| HB12 | 5     | 12,84   | 12,85  | 0,01        |
| HB12 | 6     | 12,87   | 12,92  | 0,05        |
| HB12 | 7     | 12,87   | 12,94  | 0,07        |
| HB12 | 8     | 12,88   | 12,91  | 0,03        |
| HBR1 | 0     | 5,1     | 4,2    | -0,9        |
| HBR1 | 2     | 6,8     | 8,3    | 1,5         |
| HBR1 | 3     | 7,5     | 8,8    | 1,3         |
| HBR1 | 4     | 8       | 9      | 1           |
| HBR1 | 5     | 8,4     | 9,3    | 0,9         |
| HBR1 | 6     | 8,5     | 9,5    | 1           |
| HBR1 | 7     | 12      | 12,14  | 0,14        |
| HBR1 | 8     | 11,98   | 12,15  | 0,17        |
| HBR2 | 0     | 5,2     | 5      | -0,2        |
| HBR2 | 2     | 9,2     | 9      | -0,2        |
| HBR2 | 3     | 9,6     | 9,8    | 0,2         |
| HBR2 | 4     | 10      | 10,2   | 0,2         |
| HBR2 | 5     | 10      | 10,5   | 0,5         |
| HBR2 | 6     | 10,9    | 10,7   | -0,2        |
| HBR2 | 7     | 12,05   | 12,17  | 0,12        |
| HBR2 | 8     | 12,06   | 12,18  | 0,12        |
| ZM3  | 0     | 5,1     | 5      | -0,1        |
| ZM3  | 2     | 12,57   | 12,86  | 0,29        |
| ZM3  | 3     | 12,65   | 12,88  | 0,23        |
| ZM3  | 4     | 12,77   | 13     | 0,23        |
| ZM3  | 5     | 12,79   | 13     | 0,21        |
| ZM3  | 6     | 12,8    | 13     | 0,2         |
| ZM3  | 7     | 12,39   | 12,56  | 0,17        |
| ZM3  | 8     | 12,81   | 13,02  | 0,21        |
| ZM6  | 0     | 5       | 4,1    | -0,9        |
| ZM6  | 2     | 12,1    | 12,13  | 0,03        |
| ZM6  | 3     | 12,13   | 12,2   | 0,07        |
| ZM6  | 4     | 12,16   | 12,23  | 0,07        |
| ZM6  | 5     | 12,15   | 12,25  | 0,1         |
| ZM6  | 6     | 12,16   | 12,26  | 0,1         |
| ZM6  | 7     | 12,16   | 12,27  | 0,11        |
| ZM6  | 8     | 12,17   | 12,27  | 0,1         |
| SF2  | 0     | 4,8     | 4,11   | -0,69       |
| SF2  | 2     | 12,05   | 12,33  | 0,28        |
| SF2  | 3     | 12,05   | 12,35  | 0,3         |
| SF2  | 4     | 12,21   | 12,46  | 0,25        |
| SF2  | 5     | 12,27   | 12,51  | 0,24        |
| SF2  | 6     | 12,3    | 12,52  | 0,22        |
| SF2  | 7     | 12,31   | 12,53  | 0,22        |
| SF2  | 8     | 12,33   | 12,54  | 0,21        |
| SF4  | 0     | 6       | 4,3    | -1,7        |
| SF4  | 2     | 13      | 13,2   | 0,2         |
| SF4  | 3     | 13,4    | 13,52  | 0,12        |
| SF4  | 4     | 13,39   | 13,52  | 0,13        |
| SF4  | 5     | 13,38   | 13,52  | 0,14        |
| SF4  | 6     | 13,3    | 13,3   | 0           |
| SF4  | 7     | 13,4    | 13,4   | 0           |
| SF4  | 8     | 13,4    | 13,4   | 0           |
| SF8  | 0     | 4,7     | 4,4    | -0,3        |
| SF8  | 2     | 13,2    | 14     | 0,8         |
| SF8  | 3     | 13,5    | 14,1   | 0,6         |
| SF8  | 4     | 14,05   | 14,51  | 0,46        |
| SF8  | 5     | 14,37   | 14,53  | 0,16        |
| SF8  | 6     | 14,47   | 14,54  | 0,07        |
| SF8  | 7     | 14,48   | 14,55  | 0,07        |
| SF8  | 8     | 14,48   | 14,55  | 0,07        |
| SF13 | 0     | 4,7     | 4,2    | -0,5        |
| SF13 | 2     | 11,85   | 12,17  | 0,32        |
| SF13 | 3     | 11,94   | 12,18  | 0,24        |
| SF13 | 4     | 12      | 12,23  | 0,23        |
| SF13 | 5     | 12,01   | 12,26  | 0,25        |
| SF13 | 6     | 12,05   | 12,28  | 0,23        |
| SF13 | 7     | 12,06   | 12,28  | 0,22        |
| SF13 | 8     | 12,07   | 12,28  | 0,21        |

De acordo com o método de Eades e Grim e, com os dados apresentados na Tabela 5.4, observa-se que os teores de cal necessários à estabilização variam de acordo com o tipo de solo, verificando-se teores de 2% (solos HB7, SF4 e SF8), 3% (solos HB11, HB12), 4% (solos HB9b e HB10), 6% (solos HBR1, HBR2, SF2). Em capítulo posterior verificar-se-á que alguns dos teores mais elevados de cal, indicados em termos de pH não apresentam variações consideráveis em termos de resistência que justificassem seu uso. Ou seja, em muitos casos, verifica-se que os valores de CBR obtidos com a incorporação de 4% de cal não diferem consideravelmente dos obtidos com 6% de cal, não justificando assim o acréscimo deste percentual em se tratando de relação custo – benefício. Por outro lado, também é possível notar que para alguns solos é necessária a incorporação de maiores teores de cal do que os indicados em termos de pH. O que leva a reafirmar que o mecanismo que age nas reações químicas entre a cal e o solo é complexo, não podendo ser tratado apenas ao nível de um ou dois parâmetros, sejam eles químicos, mineralógicos ou físicos.

## **5.2 – PROPRIEDADES MINERALÓGICAS**

A Tabela 5.5 apresenta a quantificação mineralógica determinada por Cardoso (2002), a qual foi realizada a partir da metodologia adaptada de Martins (2000). De acordo com o autor, a mineralogia dos materiais estudados é típica de solos que sofreram intemperismo químico, cujos processos de alteração predominantes são a alitização e a monossilificação. O primeiro processo é bem marcado nos solos HB, onde os teores de gibbsita são expressivos (entre 5,5 à 30,7%). Nos solos (ZM) e (SF), a gibbsita possui uma importância reduzida (exceto para o solo ZM5) e a caulinita + illita, argilominerais silicatados resultantes da monossilificação, são predominantes. A illita é de fundamental importância na composição mineralógica dos solos predominantemente siltosos (SF).

Embora não se possa desprezar a presença de agregados, o quartzo forma, praticamente, a quase totalidade da fração areia dos solos estudados, uma vez que não são encontrados outros minerais típicos desta fração em termos relevantes, como feldspatos e carbonatos que, evidentemente, foram solubilizados sob as condições regionais de intemperismo químico. De acordo com as análises micromorfológicas, realizadas por Cardoso (2002), a goethita está totalmente dispersa na matriz, não formando nódulos. A hematita, por sua vez, se encontra sob a forma nodular ou dispersa na matriz.

O TiO<sub>2</sub> dos solos estudados está na forma de rutilo e anatásio, constituindo formas resistentes ao intemperismo. Apesar destes minerais terem sido estimados em conjunto, o anatásio é dominante em relação ao rutilo, principalmente nos horizontes de solo (HB). No entanto, estes representam apenas traços nos solos estudados.

Em relação aos solos HBR1 e HBR2, Rezende (2003) não apresentou a quantificação mineralógica dos materiais. No entanto, foram qualitativamente determinadas as mineralogias do material natural e estabilizado com cal. Para o solo fino HBR1, a autora verificou a existência dos seguintes minerais: quartzo, caulinita, gibbsita, hematita e illita. Os difratogramas obtidos para a amostra total e para a amostra passante na peneira nº 200 foram semelhantes, sendo que no caso da amostra mais fina, os picos observados apresentaram menores intensidades. Para o solo HBR2 observou-se que estão presentes os seguintes minerais: quartzo, caulinita, gibbsita e hematita. Na amostra total os picos de caulinita e gibbsita têm intensidade semelhante, enquanto que para a amostra passante na peneira nº 200, o pico da caulinita é um pouco maior, realçando a presença de gibbsita nos agregados retidos na peneira nº 200.

Tabela 5.5 – Características Mineralógicas dos Materiais Estudados  
modificado – Cardoso, (2002)

| Amostra     | Gibbsita (%) | Caulinita (%) | Illita (%) | Goethita (%) | Hematita (%) | Quartzo (%) | Rutilo + Anatásio (%) | SOMA (%) |
|-------------|--------------|---------------|------------|--------------|--------------|-------------|-----------------------|----------|
| <b>HB7</b>  | 23,1         | 31            | 2,4        | 3,6          | 10,9         | 22,3        | 1,7                   | 95       |
| <b>HB9b</b> | 30,7         | 45,1          | 1,9        | 1,6          | 11,4         | 3,7         | 2,2                   | 96,6     |
| <b>HB10</b> | 6,3          | 16,9          | 2,2        | 0,8          | 3,4          | 69,2        | 0,5                   | 99,3     |
| <b>HB11</b> | 18,2         | 9,2           | 0          | 1,8          | 5,7          | 63,4        | 0,8                   | 99,1     |
| <b>HB12</b> | 5,5          | 26,5          | 21,9       | 3,4          | 6,3          | 33,6        | 0,8                   | 98       |
| <b>HBR1</b> | -            | -             | -          | -            | -            | -           | -                     | -        |
| <b>HBR2</b> | -            | -             | -          | -            | -            | -           | -                     | -        |
| <b>ZM3</b>  | 1,3          | 5,1           | 3,2        | 0,1          | 1,6          | 88,6        | 0,1                   | 100      |
| <b>ZM5</b>  | 11,1         | 13,8          | 12         | 2,9          | 3,2          | 54,2        | 0,8                   | 98       |
| <b>ZM6</b>  | 3,4          | 46,8          | 3,7        | 1,5          | 11,7         | 30,3        | 0,9                   | 98,3     |
| <b>SF1</b>  | 0,6          | 34,7          | 22,2       | 0,9          | 7,7          | 35,3        | 0,7                   | 102,1    |
| <b>SF2</b>  | 2,3          | 26,3          | 17,1       | 2            | 5            | 46,2        | 0,8                   | 99,7     |
| <b>SF4</b>  | 6,6          | 24,1          | 26,8       | 1,7          | 3,6          | 32,1        | 0,9                   | 95,8     |
| <b>SF8</b>  | 2,1          | 11,2          | 0          | 1,5          | 3,1          | 81,7        | 0,3                   | 99,9     |
| <b>SF13</b> | 1,2          | 18,6          | 26,3       | 3            | 3,6          | 45,1        | 0,6                   | 98,4     |

Segundo Cardoso *et al.* (1998) os oxi-hidróxidos de Al cristalinos e para cristalinos, formados na alitização, são fundamentais no desenvolvimento de agregados de partículas finas e nas fracas ligações interestruturais dos latossolos do DF. A geração destes agregados argilosos influi no aumento da macroporosidade, influenciando assim no comportamento mecânico dos solos. Ainda segundo os autores, os solos do DF apresentam suas características

estruturais influenciadas pelo intemperismo químico tendo influência desprezível à origem (residual ou transportado) do solo. Camapum de Carvalho *et al.* (2000) mostram que a agregação do solo aumenta com o crescimento do teor dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

O peso específico dos sólidos entre 26 e 28kN/m<sup>3</sup>, conforme observado no capítulo 4, é típico deste solo, e está associado à presença de caulinita ( $\gamma_s = 25,5\text{kN/m}^3$ ), quartzo ( $\gamma_s = 26,0\text{kN/m}^3$ ), oxi-hidróxidos de ferro (hematita,  $\gamma_s = 51,0 \text{ kN/m}^3$  e goethita,  $\gamma_s = 40,0$  a  $42,0 \text{ kN/m}^3$ ) e de alumínio (gibbsita,  $\gamma_s = 24,0 \text{ kN/m}^3$ ). Portanto, as variações de G (Tabela 5.1) estão ligadas à composição mineralógica dos solos.

Segundo Cardoso (2002), a caracterização mineralógica dos solos é ponto essencial para o correto entendimento do comportamento dos mesmos, sabendo-se que, o comportamento dos solos tropicais intemperizados está ligado aos minerais de argila e aos oxi-hidróxidos constituintes. Portanto, a variação das propriedades físicas dos solos (item 4.1), deve encontrar justificativa tanto na composição mineralógica quanto nas propriedades químicas dos mesmos. Sob esta ótica, um ponto importante a ser avaliado, quando se fala em plasticidade dos solos, lateríticos ou não, é o seu teor em oxi-hidróxidos de ferro. De acordo com Gidigas (1976) se o ferro ocorre associado às partículas finas, recobrando-as ou mesmo cimentando-as, é de se esperar que a plasticidade seja afetada por uma redução nos valores de  $w_L$  e  $w_P$ . Se, por outro lado, o ferro ocorre no solo como partículas discretas ou parcialmente discretas, é de se esperar que o mesmo não tenha efeito ou tenha efeito reduzido, sobre os valores dos limites de plasticidade e liquidez (Queiroz de Carvalho, 1979). Tendo por finalidade verificar a atuação do ferro nas propriedades físicas dos solos estudados, Cardoso (2002) realizou a quantificação das possíveis formas em que são encontrados os óxi-hidróxidos de Fe nos solos por eles estudados (Tabela 5.6), a partir da diferença entre Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da análise química total e o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da análise química da fase de oxi-hidróxidos. De forma a verificar o efeito destes oxi-hidróxidos de Fe, o autor procedeu à extração da goethita e parte da hematita, além dos amorfos e paracristalinos, a partir de citrato de sódio e ácido cítrico. Com a extração foi verificado que tais componentes incrementam a plasticidade, aumentando os limites de Atterberg ( $w_L$  e  $w_P$ ) e diminuindo os índices de plasticidade (IP). Cabendo ainda destacar que, segundo o autor, a variação quanto ao  $w_P$  não é constante, provavelmente porque este pode ser resultante de combinações mais complexas entre as propriedades dos solos. Sendo assim, pode-se dizer que o  $w_L$  e o IP são afetados diretamente pelos oxi-hidróxidos de Fe.

Comparando-se os resultados da plasticidade ( $w_L$  e IP obtidos na Tabela 4.2), com os mineralógicos (Tabela 5.5), verifica-se que nos latossolos (solos ricos em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio) ocorrem aumentos e reduções com o crescimento do teor de cal, apontando para a influencia da agregação gerada por esses compostos químicos nos solos naturais. Nos solos ZM e SF, a influência é marcada de modo predominante pela mineralogia, não ocorrendo interferência da agregação. Neles,  $w_L$  e  $w_P$  aumentam com a ampliação da incorporação de cal.

Como anteriormente citado, Rezende (2003) realizou difratometrias para as amostras do solo HBR1 e HBR2, com a cal incorporada. Segundo a autora com a incorporação de 2% de cal para o solo HBR1, os minerais presentes na mistura são praticamente os mesmos verificados na amostra natural, sendo que também aparecem pequenos picos de calcita. Comparando os dois tipos de amostras analisadas, tem-se que, ao contrário do observado para o solo fino, as intensidades dos picos são um pouco maiores para a amostra passante na peneira nº200. Este comportamento pode indicar dois aspectos: no primeiro, a destruição dos agregados pela cal geraria um aumento no teor de argilominerais na fração fina; no segundo, o consumo dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio nas reações com a cal estaria propiciando um aumento relativo dos demais argilominerais. Para o percentual de 6% de cal, não foi realizado tal estudo, no entanto se nos balizarmos pelos valores de IP obtidos (decréscimo de IP) é provável a ocorrência de modificação no teor dos argilominerais.

Ainda de acordo com Rezende (2003), para o solo HBR2 a incorporação de 3% de cal gera redução na intensidade dos picos observados nas amostras. Os traços de illita desaparecem e aparece a calcita. Para a amostra passante na peneira nº 200, no geral, verificou-se picos maiores do que a amostra total. O pico de quartzo é melhor definido na amostra total e o pico da calcita já aparece de uma forma mais clara na amostra mais fina. Com a incorporação de 6% de cal, além dos minerais já observados, verifica-se a existência de traços de rutilo e anatásio. O pico de quartzo continua apresentando-se mais definido na amostra total, inclusive com maior intensidade. Os picos dos demais minerais apresentam intensidade um pouco menor na amostra mais fina, correspondendo ao esperado. Para esta porcentagem de cal, o pico de calcita é melhor visualizado. A presença ou ausência de illita, rutilo e anatásio nas amostras, se deve ao fato de tratar apenas de traços. Como se pode notar, há diferenciação nos argilominerais existentes quando da incorporação da cal, sendo provável que a diferenciação comportamental no IP seja decorrente do desaparecimento da illita e dos traços de rutilo e anatásio que surgiram.

Com relação às amostras naturais é necessário ainda comentar sobre a baixa atividade dos solos (Tabela 4.2), que podem ser explicadas pela predominância de argilomineral do tipo caulinita, e ausência de argilominerais do tipo montmorilonita e outros de maior atividade.

Observa-se então que, de forma a se ter uma melhor idéia das causas que geram os comportamentos diferenciados dos materiais, é relevante a avaliação dos difratogramas dos materiais estabilizados. No entanto, como já explicado, devido a grande gama de ensaios realizados nesta pesquisa, não houve tempo hábil para uma verificação mais detalhada. Em trabalho posterior pretende-se a complementação de tais avaliações; assim como a realização das microscopias de todos os materiais, considerando variações de umidade de compactação, teor de cal incorporado e energia de compactação.

Tabela 5.6 – Teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas Amostras Estudadas modificado – Cardoso, (2002).

| <b>Amostra</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><br/>Disperso (%)</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><br/>Nódulos (%)</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><br/>Total (%)</b> |
|----------------|---|--|--|
| <b>HB7</b>     | 4,27  | 8,87   | 13,14  |
| <b>HB9b</b>    | 3,84  | 8,3  | 12,14  |
| <b>HB10</b>    | 1,84  | 1,96   | 3,8  |
| <b>HB11</b>    | 1,94  | 4,87   | 6,81   |
| <b>HB12</b>    | 2,27  | 6,34   | 8,61   |
| <b>ZM3</b>     | 0,44  | 1,29   | 1,73   |
| <b>ZM6</b>     | 1,44  | 11,59  | 13,03  |
| <b>SF2</b>     | 1,78  | 4,97   | 6,75   |
| <b>SF4</b>     | 1,77  | 2,94   | 4,71   |
| <b>SF8</b>     | 3,09  | 0,79   | 3,88   |
| <b>SF13</b>    | 2,03  | 3,59   | 5,62   |

Levando-se em consideração os aspectos analisados anteriormente, comprova-se a explanação de diversos autores (Cardoso, 1995 e 2002; Camapum de Carvalho *et al.*, 1996; Nóbrega, 1991; Pessoa, 2004, etc) quanto à direta associação do grau de intemperismo do solo à sua composição mineralógica, o que por sua vez influencia as suas propriedades físicas assim como, a maior ou menor reatividade e eficácia da estabilização com cal.

### 5.3 - Características Estruturais dos Solos Estudados

De forma a permitir o melhor entendimento das discussões relacionadas à microestrutura dos horizontes de solos estudados, as Figuras 5.1 a 5.76 apresentam respectivamente as imagens obtidas para os solos, HB7, HB9b, HB10, HB11, HB12, HBR1, HBR2, ZM3, ZM6, SF2, SF4, SF8 e SF13. As imagens foram obtidas por duas técnicas: microscopia ótica e de varredura. As oriundas de microscopia ótica foram obtidas por Cardoso (2002), e as demais foram realizadas em FURNAS Centrais Elétricas S.A.

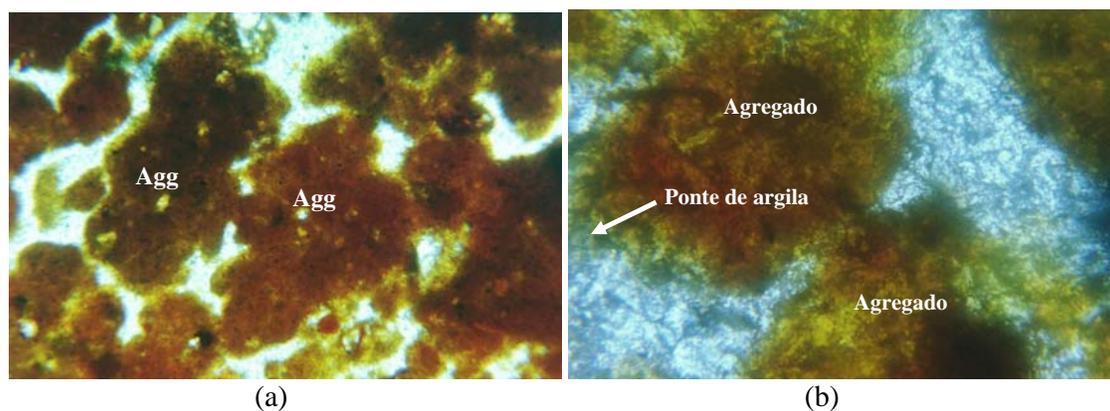


Figura 5.1 - Microscopia do Solo HB7 obtida para Amostra Natural (Indeformada).  
(a) Fotomicrografia mostrando dois agregados grumosos (Agg). Aumento: 40x.  
(b) Pontes de argila entre dois agregados. Aumento: 600x.  
Cardoso, (2002).

De acordo com Cardoso (2002), o estudo micromorfológico do solo HB7 apresentou agregados perfazendo 55% da estrutura, estes sendo constituídos por grânulos com forma esferoidal ou grumosa, lisos a pouco rugosos, com ausência de orientação (Figura 5.1(a)). Os nódulos possuem forma subarredondada a subangular, isotrópicos sem a presença de fraturamentos e orientação. São cerca de 4% do total da amostra e, pelas suas características óticas, tais nódulos são compostos predominantemente por hematita.

Os grãos de quartzo perfazem cerca de 15% do total da amostra, são subangulosos a angulosos e não apresentam fraturamento e orientação. Seus contornos evidenciam forte "corrosão". Estes são encontrados no interior de agregados, mas principalmente em contato com os agregados a partir de pontes de argila. Destaca-se que o teor aproximado de quartzo verificado na lâmina não é tão distante do quantificado pelo próprio Cardoso (2002) na análise mineralógica (22,3%, Tabela 5.4).

Os contatos entre todos os elementos estruturais são realizados através de pontes de argila, e na grande maioria, perceptíveis na microscopia ótica (Figura 5.1(b)). Os vazios ocupam cerca de 25% do total da amostra. Cabe destacar aqui a grande fragilidade das pontes de argila e sua elevada sensibilidade à presença de água. As trocas catiônicas podem igualmente fragilizar esse tipo de elo.

Para avaliar o efeito da compactação foram efetuadas microscopias de varredura no material após o procedimento de compactação na umidade ótima da energia Proctor normal (PN). Verifica-se que a estrutura mantém-se composta por macro e micro agregados (Figura 5.2), muito embora aparentemente, a microporosidade se destaque devido à redução dos macroporos pelo processo de compactação. Tem-se, portanto, que o processo de compactação teve papel atuante no rearranjo estrutural do solo compactado na condição ótima. Ao se incorporar 6% de cal ao solo (Figura 5.4), verifica-se que a estrutura gerada pela compactação é aparentemente um pouco mais “fechada” que a sem estabilização, ou seja, predomina a microporosidade em detrimento da macroporosidade, fato este que indica que a cal reagiu desagregando o solo. O mecanismo de alteração estrutural com a presença da cal pode ser explicado à luz da Figura 5.6. Nela percebe-se, considerando-se a curva granulométrica obtida para 2% de cal, que inicialmente o solo passa por um processo de desagregação, passando a agregar-se em seguida, à medida que se aumenta o teor de cal (curva granulométrica obtida para 6% de cal). Percebe-se nas imagens com maior ampliação que os agregados oriundos da reação com cal e a própria estrutura gerada (Figura 5.4(d)) são distintos dos existentes no solo compactado no estado natural (Figura 5.2(d)).

As Figuras 5.3 e 5.5 apresentam respectivamente os espectros de raios-x da amostra natural e estabilizada, obtidos em diferentes pontos da estrutura do solo compactado. Com base nestes gráficos, verifica-se o aparecimento, na massa mais fina do material natural, de Al, Fe, Si, Ti e O (Figura 5.3). O Fe e o Al são os principais responsáveis pelo nível de agregação verificado no solo, o que justifica a presença de estrutura composta por micro e macroporosidade, mesmo após a compactação. Ao estudar o material compactado com cal hidratada incorporada (Figura 5.5), observa-se o surgimento de picos de Ca, Na, Mg e K. O cálcio e o magnésio são oriundos da cal e, os demais cátions trocáveis, tendo sido mobilizados provavelmente em decorrência das trocas iônicas geradas pela estabilização. É interessante observar que o fenômeno de trocas se dá na seguinte ordem decrescente:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ .

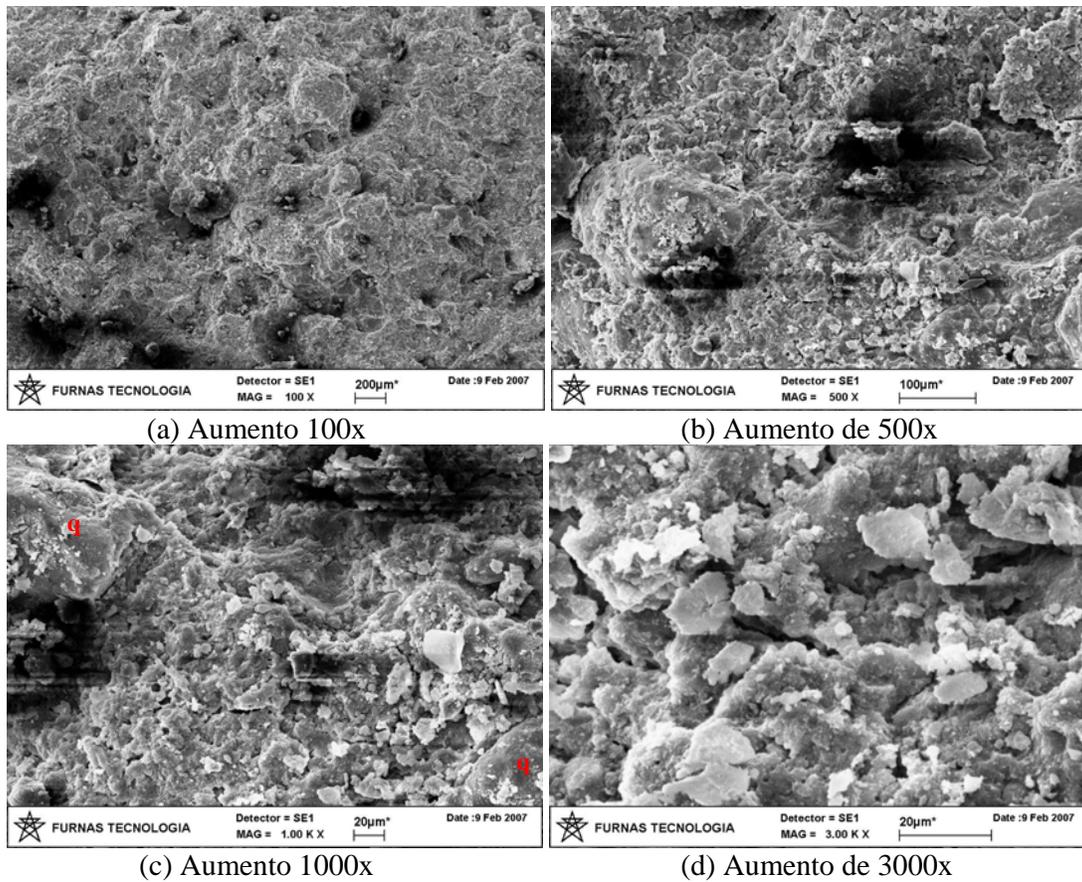
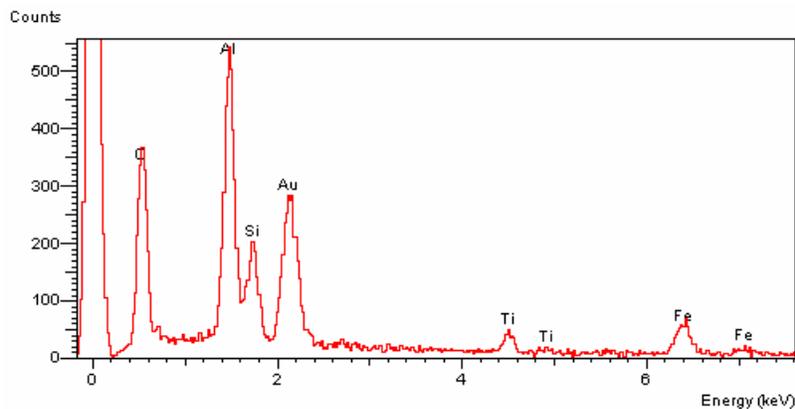
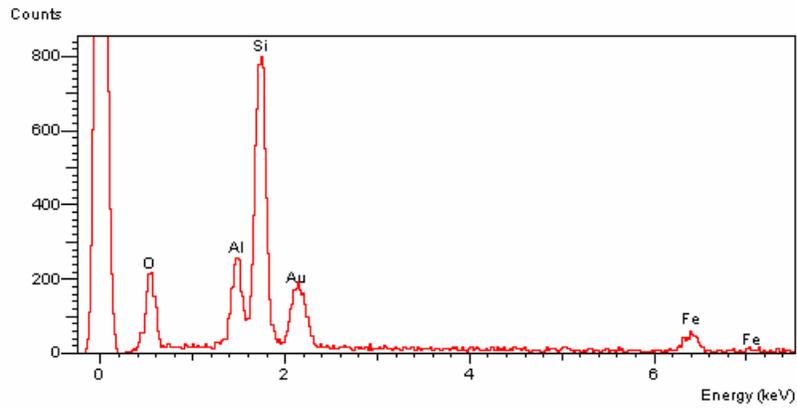


Figura 5.2 - Microscopia de Varredura do Solo HB7 Compactado na Energia PN.



(a) Microanálise realizada na massa de solo mais fino, que envolve os grãos de quartzo – provável caulinita + óxido de titânio e ferro.

Figura 5.3 - Microanálise do Solo HB7 Compactado na Energia PN.



(b) Microanálise realizada no grão de quartzo (q)

Figura 5.3 - Microanálise do Solo HB7 Compactado na Energia PN - Continuação.

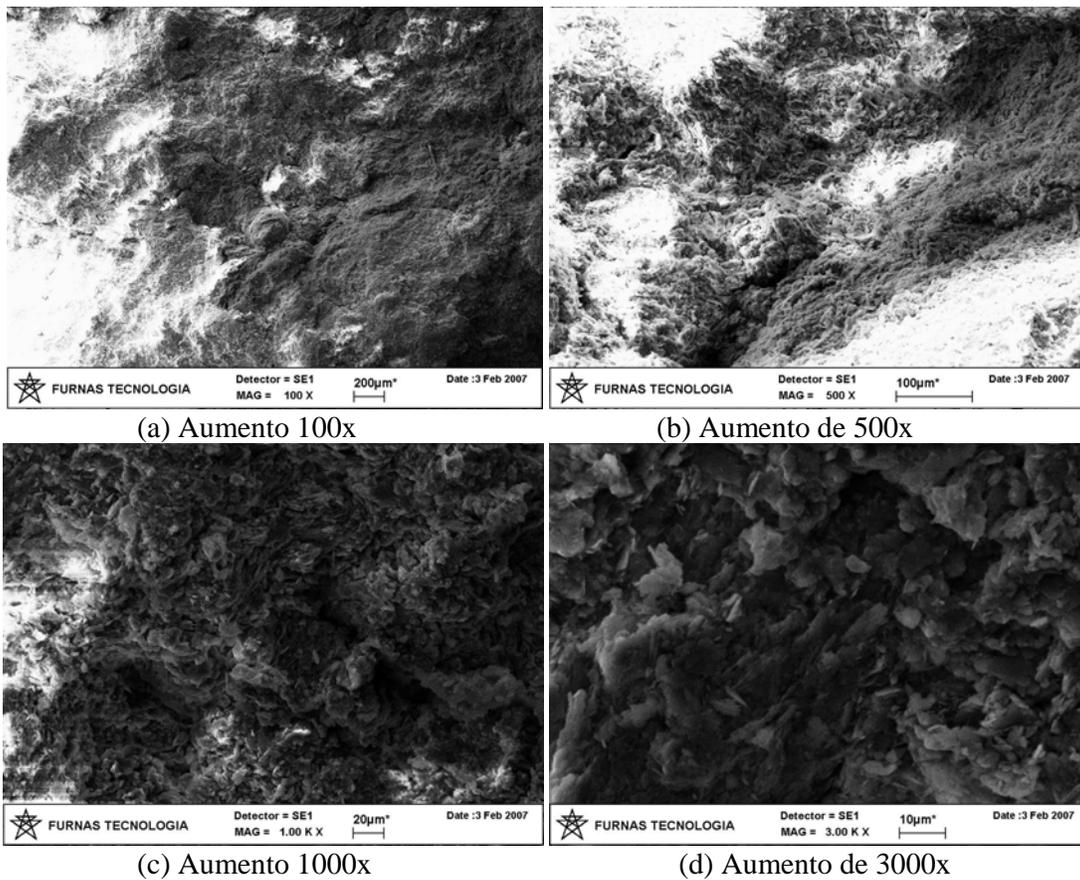
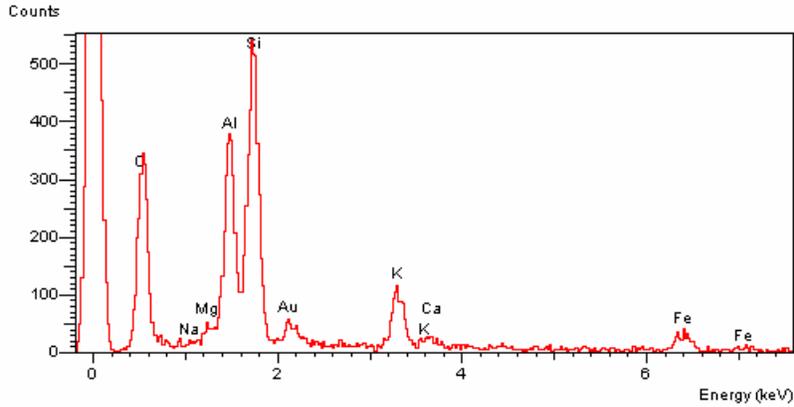


Figura 5.4 - Microscopia de Varredura do Solo HB7 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.



(a) Na placa. Possível illita.

Figura 5.5 – Microanálise no Solo HB7 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.

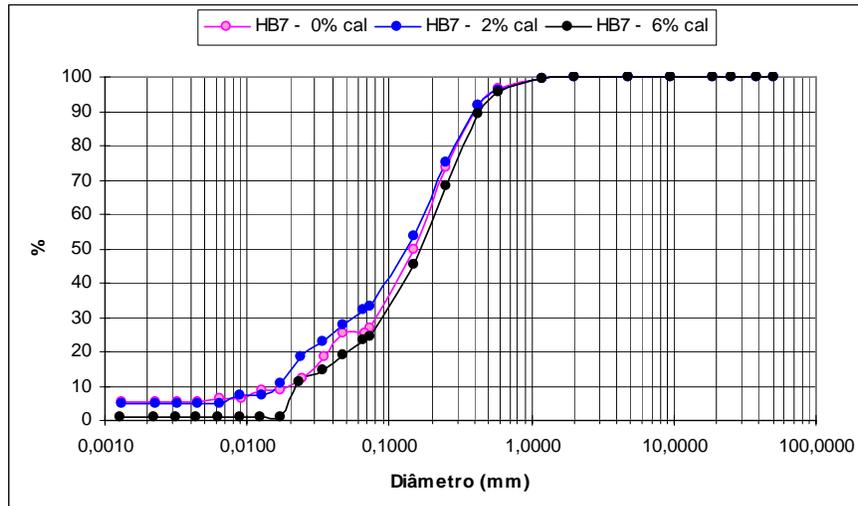


Figura 5.6 – Curvas Granulométricas obtidas para o Solo HB7.

Segundo Cardoso (2002), o solo HB9b apresenta estrutura agregada, sendo constituído por grânulos com forma esferoidal ou grumosa, lisos a pouco rugosos. Os nódulos são típicos com forma arredondada, isotrópicos sem a presença de fraturamentos e orientação. Pelas suas características óticas, são compostos predominantemente por hematita. Os grãos de quartzo ocupam menos de 5% do total da amostra, possuem tamanho médio, em geral são arredondados, não apresentam fraturamento e orientação, porém alguns deles apresentam corrosão em suas bordas, estes sendo normalmente encontrados no interior de agregados. Os contatos entre todos os elementos estruturais são realizados por meio de pontes e filmes de argila (Figura 5.7(b)), e na maioria, facilmente perceptíveis na microscopia ótica.

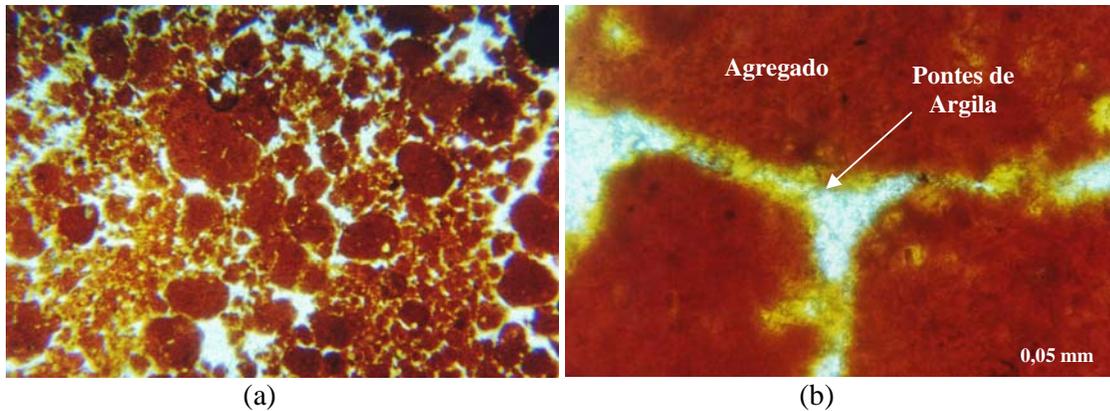


Figura 5.7 - Microscopia do Solo HB9b obtida para Amostra Natural (Indeformada).  
 (a) Fotomicrografia mostrando agregados arredondados e vazios - Aumento: 40x.  
 (b) Pontes de argila entre três agregados. Aumento: 400x.  
 Cardoso, (2002).

Ao realizar a compactação do solo, foram efetuadas microscopias de varredura no material após o procedimento de compactação na umidade ótima da energia Proctor Normal (PN). Verifica-se que a estrutura é composta ainda de macro e micro agregados (Figura 5.8(d)). Ao se incorporar a cal (Figura 5.10) observa-se por comparação com as imagens obtidas para a amostra natural (Figuras 5.8) que a estrutura gerada é alterada pela cal por meio da destruição de alguns agregados e formação de outros, o que pode ser melhor visualizado por meio da comparação das imagens com aumento de 1000 e 3000 vezes (Figuras 5.8(c), 5.8(d) e 5.10(b), 5.10(c)). As imagens ampliadas do solo natural e estabilizado mostram ainda que os macro e microporos são mantidos havendo, no entanto, redução dos primeiros.

As Figuras 5.9 e 5.11 apresentam respectivamente os espectros de raios-x da amostra natural e estabilizada, estes obtidos para diferentes pontos da estrutura do solo. Com base nestas figuras, verifica-se o aparecimento, no grumo do material natural, de Al, Si, Fe; e ainda, Ti (Figura 5.11(b)). O Fe e o Al são componentes característicos dos solos lateríticos intemperizados do DF, sendo principais responsáveis pelo nível de agregação verificado nos mesmos, o que justifica a presença de estrutura composta por micro e macroporosidade mesmo após a compactação. Ao estudar o material compactado com cal hidratada incorporada, são verificados o Ca e o C.

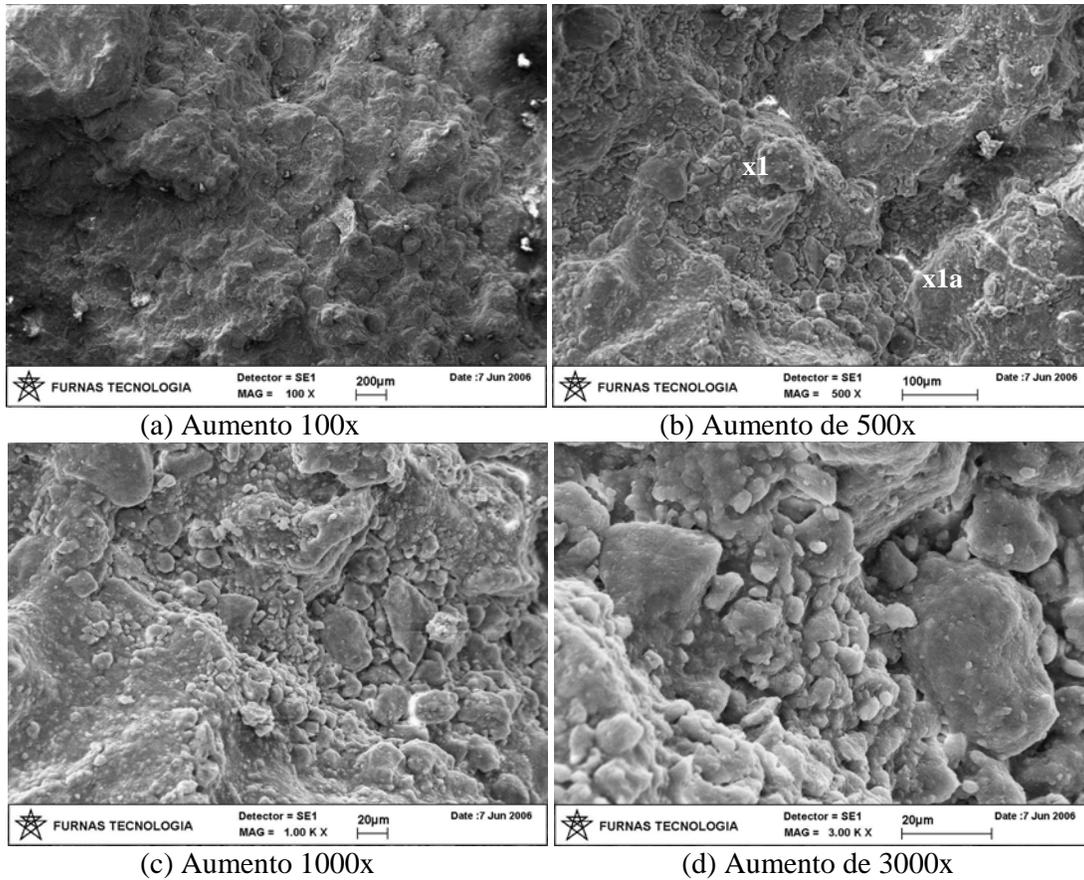
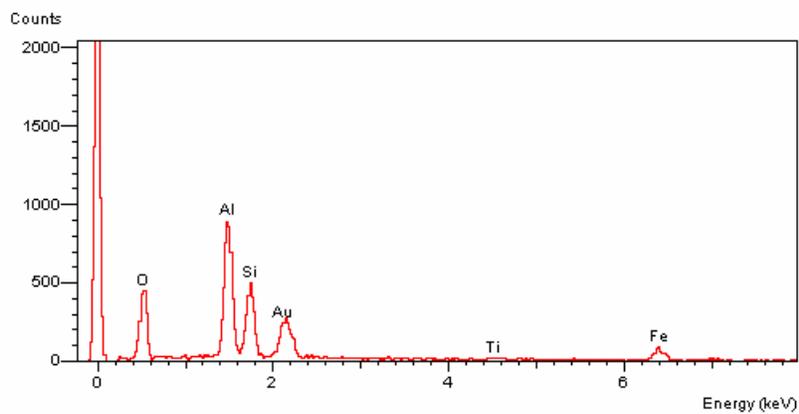
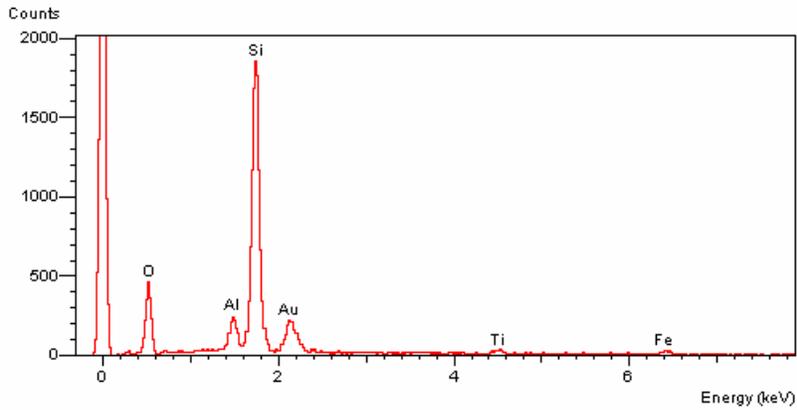


Figura 5.8 - Microscopia de Varredura do solo HB9b Compactado na Energia PN.



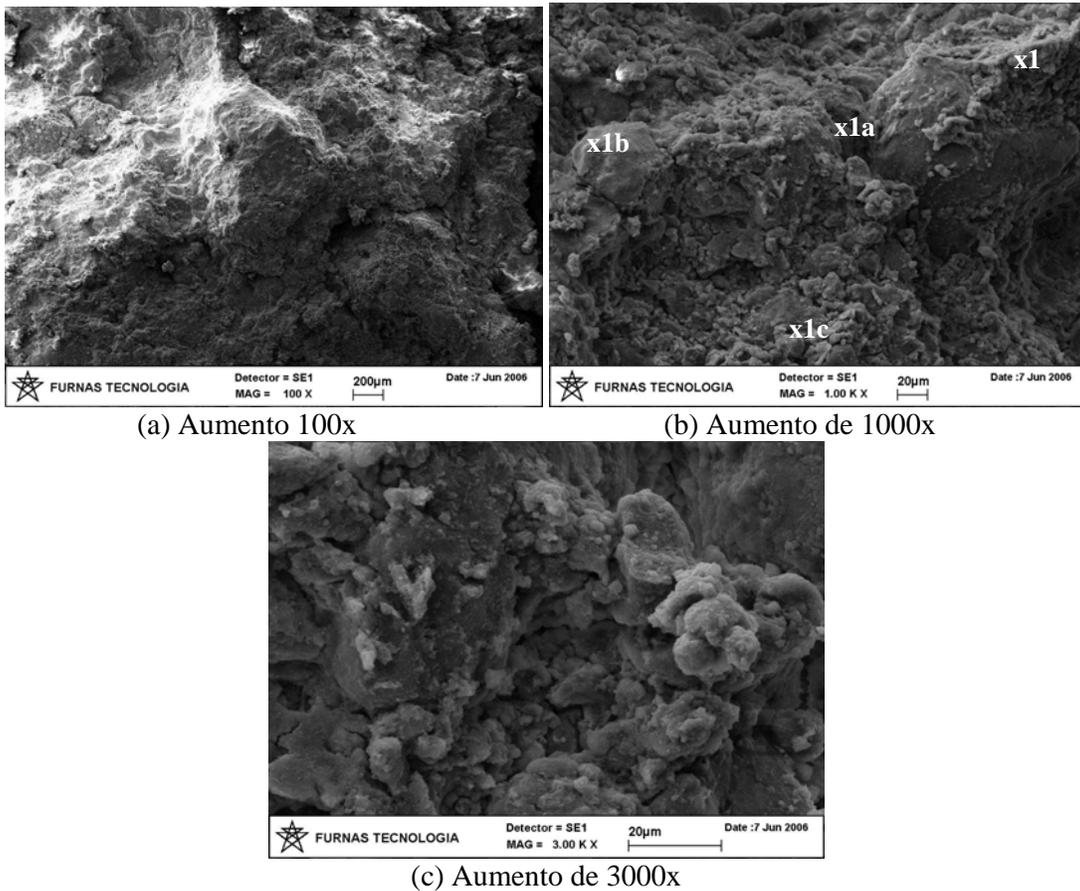
(a) Microanálise x1 - Na placa (caulinita).

Figura 5.9 - Microanálise do Solo HB9b Compactado na Energia PN.



(b) Microanálise x1a - No cristal (quartzo com provável contaminação de caulinita).

Figura 5.9 - Microanálise do Solo HB9b Compactado na Energia PN - Continuação.

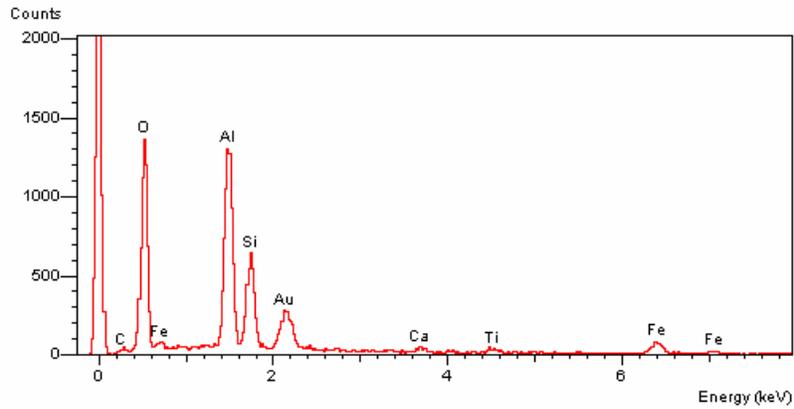


(a) Aumento 100x

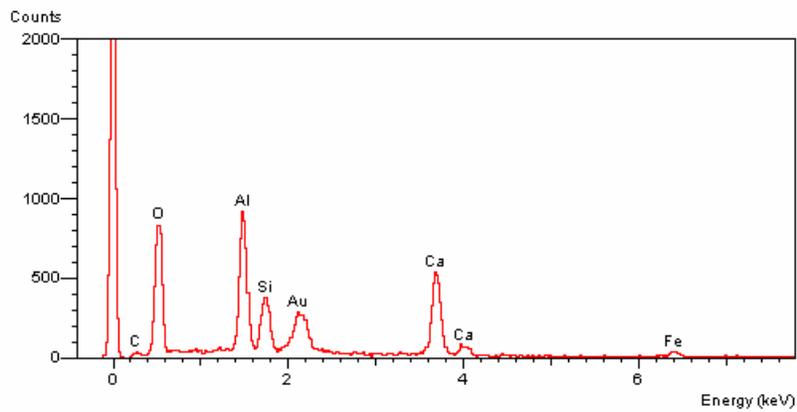
(b) Aumento de 1000x

(c) Aumento de 3000x

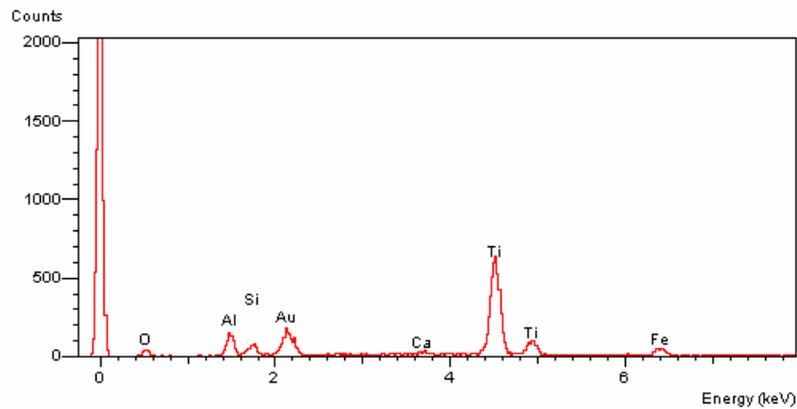
Figura 5.10 - Microscopia de Varredura do Solo HB9b Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.



(a) Microanálise x1 - Na palheta. Argilomineral (provável caulinita).



(b) Microanálise x1b. No cristal. Argilomineral (provável caulinita) + carbonato.



(c) Microanálise x1c - Na massa. Argilomineral (provável óxido/hidróxido de titânio e/ou ferro).

Figura 5.11 – Microanálise do Solo HB9b Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.

Segundo Cardoso (2002), o solo HB10 (Figura 5.12) apresenta agregados, constituídos por grânulos com forma esferoidal ou grumosa, lisos a pouco rugosos e orientação inexistente. Os nódulos existentes são típicos com forma arredondada a angular, isotrópicos sem a presença de fraturamentos e orientação. Pelas suas características óticas, estes são formados principalmente por hematita. Os grãos de quartzo representam a grande maioria do material sólido, em torno de 60% da lâmina, em geral são de forma subarredondadas a subangulosas, não apresentam orientação e raros são os grãos fraturados. O processo de corrosão é relativamente intenso na maioria dos grãos e desenvolve-se geralmente em suas bordas. Os contatos podem ser realizados por meio de pontes e filmes de argila. Os vazios ocupam cerca de 20% do total.

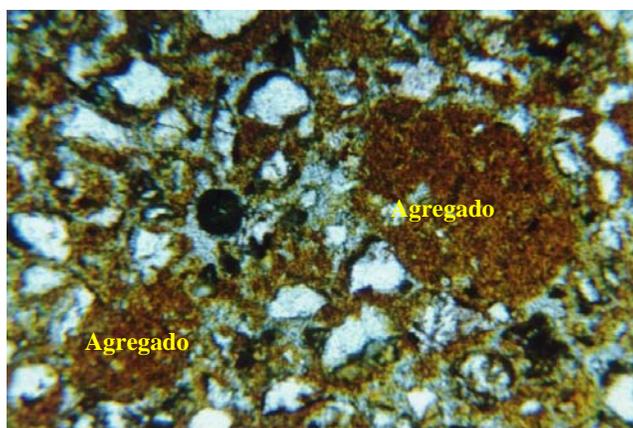


Figura 5.12 – Microscopia do Solo HB10 em Estado Indeformado, mostrando Agregados no interior do Solo e, Grãos de Quartzo Arredondados a Angulosos Dispersos - Aumento: 90x - Cardoso, (2002).

A estrutura do solo compactado no estado natural mostra-se composta de macro e micro agregados (Figura 5.13), destacando-se a presença de macroporosidade entre os grumos (Figura 5.13(b), 5.13(c)). Ao ampliar a imagem em 1000x (Figura 5.13(c)) é possível observar a presença dos microporos adentrando os grumos e constituindo uma massa de solo denso, ou seja, uma estrutura fechada. Destaca-se ainda a existência de uma estrutura em forma de rede ao se ampliar em 3000x (Figura 5.13(d)) a imagem. Ao se incorporar 6% de cal (Figura 5.15) observa-se que aparentemente a estrutura torna-se mais agregada com grânulos melhor definidos que o solo natural compactado. É interessante observar que a agregação ocorrida para 6% de cal corresponde ao comportamento apregado pela literatura, no entanto, a Figura 5.17 mostra, considerando-se o teor de 2% de cal, que o solo inicialmente passa por um

processo de desagregação à exemplo do já mostrado para o solo HB7. Para este material observa-se a ocorrência de uma boa reação da cal com o solo, uma vez que os grãos de hidróxido de cálcio não são visíveis nas microscopias.

De forma similar ao feito para os solos anteriormente estudados, são apresentados os espectros de raios-x da amostra natural (Figura 5.14) e estabilizada (Figura 5.16). Com base nestes gráficos, verifica-se o aparecimento, no cristal do quartzo e na estrutura em forma de rede, do material natural, de O, Al, Si, Mg e Fe (Figura 5.14). O Fe e o Al influenciam no nível de agregação do solo natural. No espectro de raios-x do material compactado com cal hidratada incorporada (Figura 5.16), surgem picos de Ca, em decorrência da cal cálcica incorporada, os demais elementos químicos são os mesmos já verificados na amostra compactada sem estabilização química.

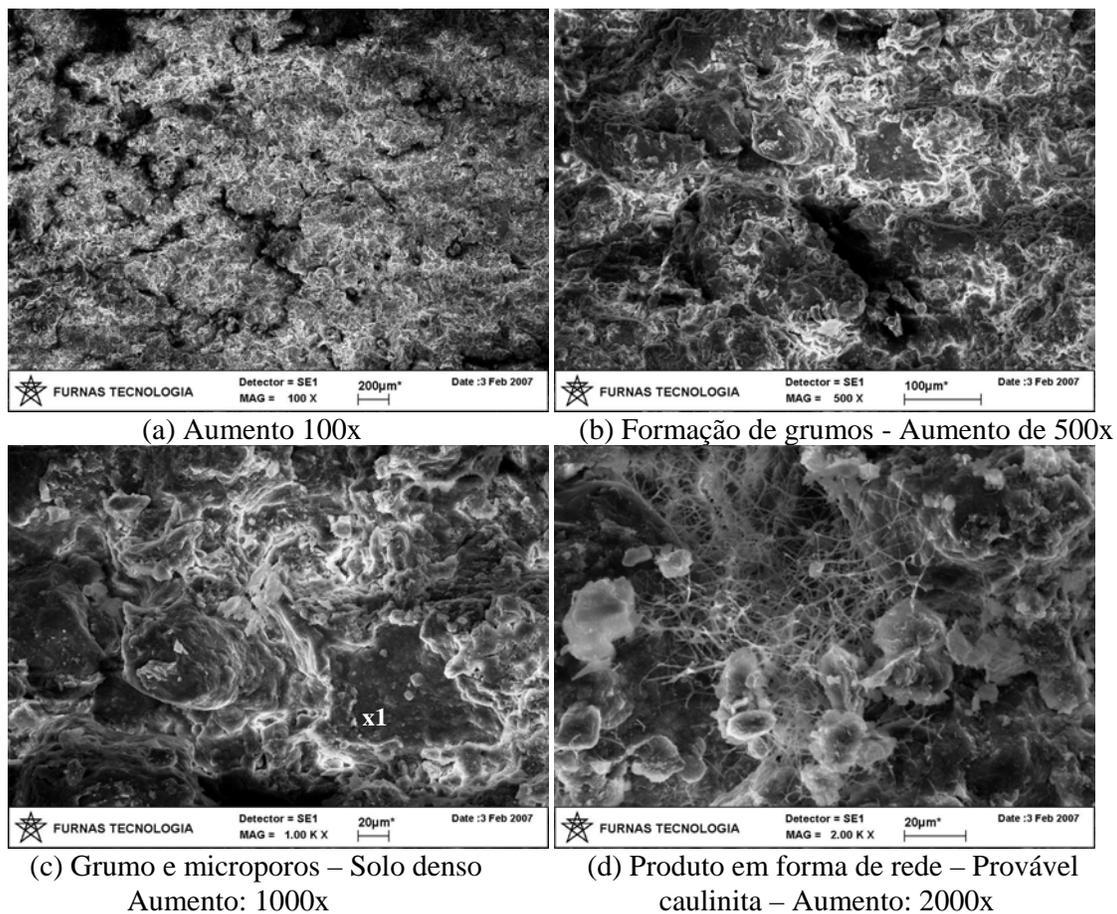
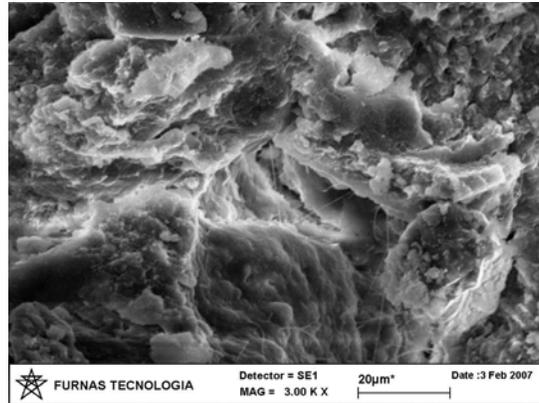
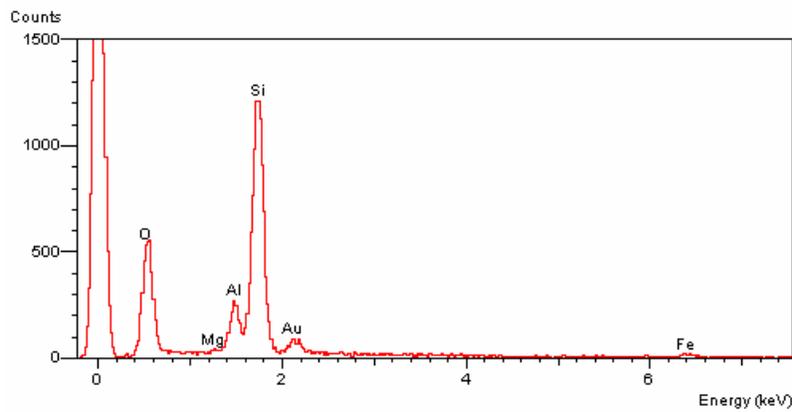


Figura 5.13 - Microscopia de Varredura do Solo HB10 Compactado na Energia PN.

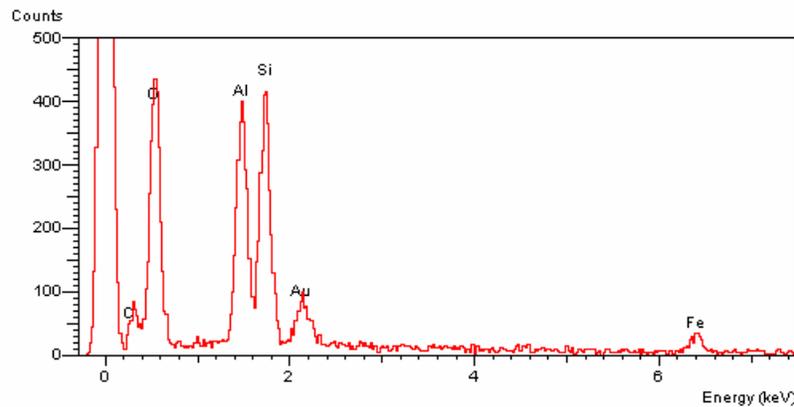


(e) Microporos, detalhe entre os grãos, compactidade  
Aumento de 3000x

Figura 5.13 - Microscopia de Varredura do Solo HB10 Compactado na Energia PN -  
Continuação.



(a) Microanálise x1 – Cristal de quartzo com superfície com argilomineral (provável  
caulinita).



(b) Microanálise – No produto em forma de rede.

Figura 5.14 - Microanálise do Solo HB10 Compactado na Energia PN.

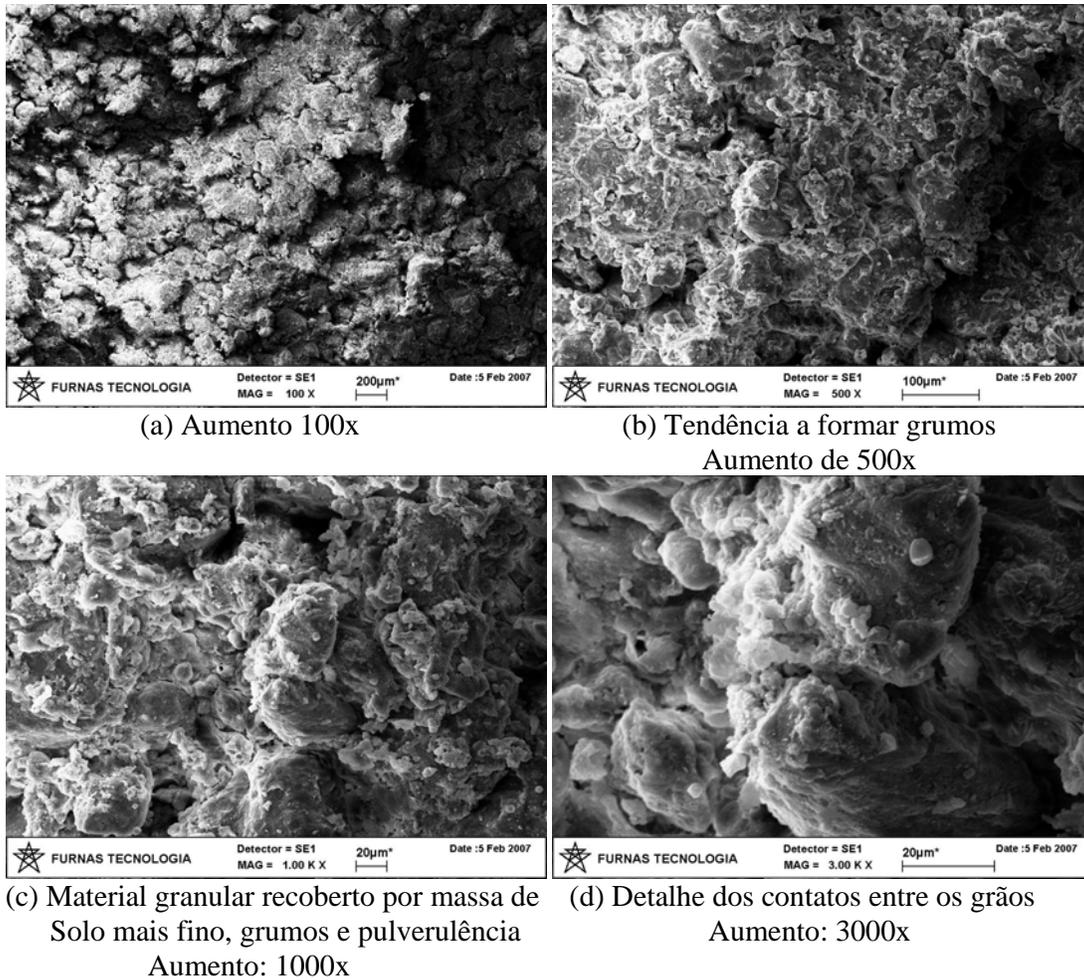
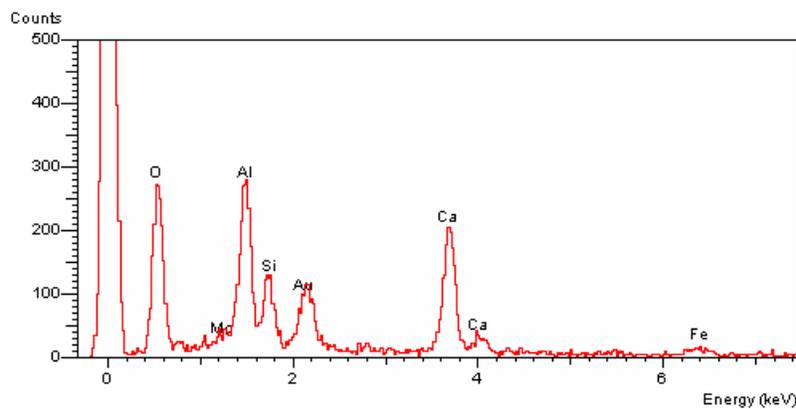
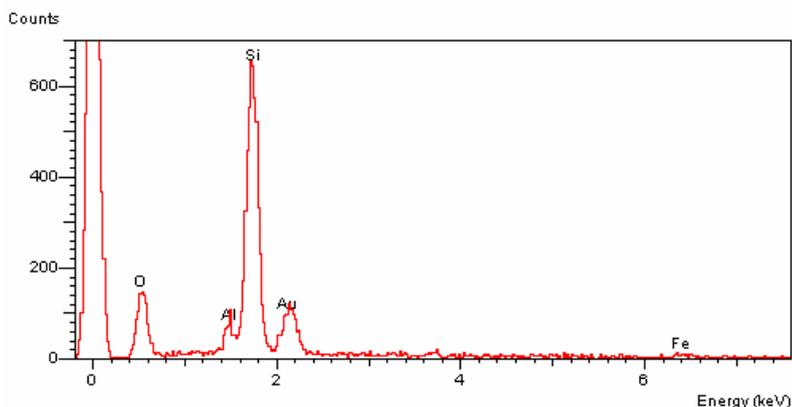


Figura 5.15 - Microscopia de Varredura do Solo HB10 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.



(a) Microanálise - Na massa do solo mais fino, que envolve os grãos de quartzo. Prováveis caulinita + hidróxido de cálcio.

Figura 5.16 – Microanálise do Solo HB10 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.



(b) Microanálise - No grão de quartzo.

Figura 5.16 – Microanálise do Solo HB10 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN - Continuação.

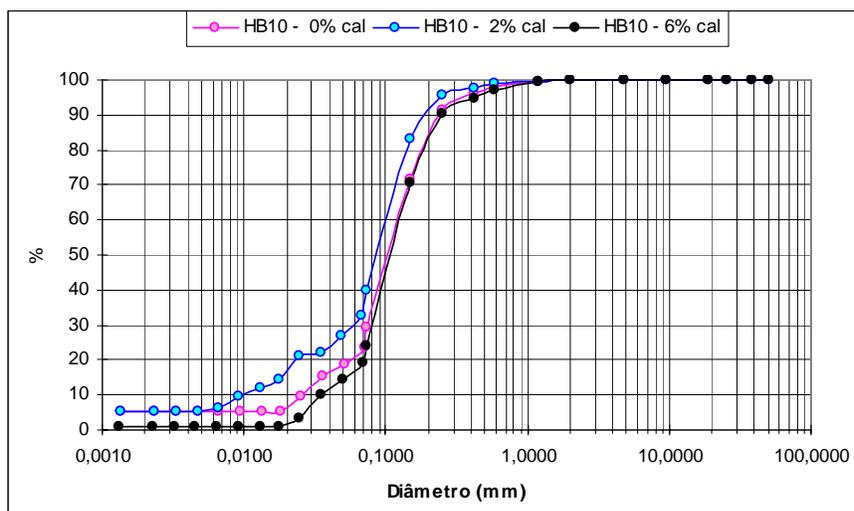


Figura 5.17 – Curvas Granulométricas do Solo HB10.

De acordo com Cardoso (2002), o solo HB11 apresenta cerca de 15% do total da lâmina formando agregados. Estes agregados são constituídos por grânulos com forma esferoidal ou grumosa, lisos a pouco rugosos e orientação inexistente. Os nódulos são típicos com forma arredondada a subangular, isotrópicos sem a presença de fraturamentos e orientação. Pelas suas características óticas, neste solo predomina a hematita. Os grãos de quartzo formam a grande maioria do material sólido, em torno de 60% da lâmina, em geral são arredondados a angulosos. Não apresentam orientação e em alguns grãos o fraturamento é intenso, porém na maioria inexistente. O processo de corrosão em alguns grãos é relativamente intenso e

desenvolve-se geralmente sobre as zonas fraturadas. Os contatos podem ser realizados através de pontes e filmes de argila e, os vazios ocupam cerca de 20% do total.

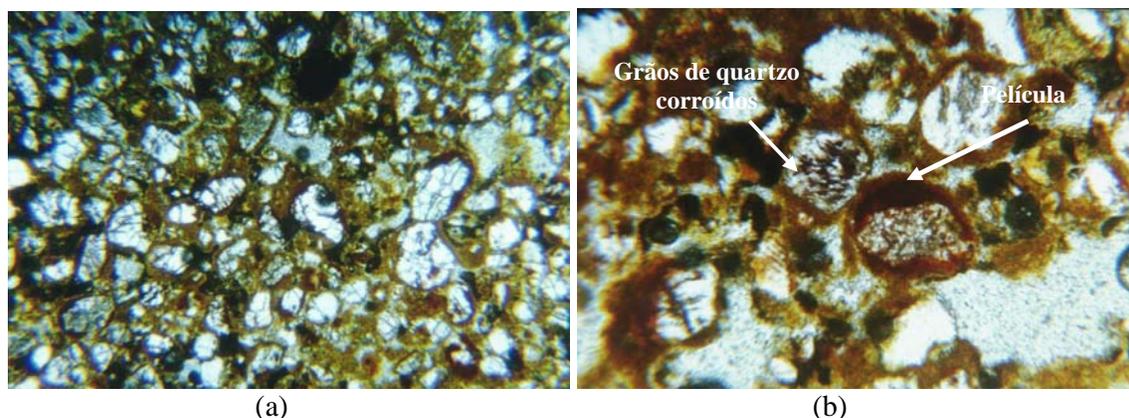


Figura 5.18 - Microscopia do Solo HB11 obtida para Amostra Natural (Indeformada).  
(a) Fotomicrografia mostrando o predomínio dos grãos de quartzo. Aumento: 40x.  
(b) Grãos de quartzo fortemente corroídos. Aumento: 90x.  
Cardoso, (2002).

Observa-se nas microscopias de varredura efetuadas sobre esse solo, que apesar da aparente homogeneidade dos poros na imagem registrada para pequena ampliação (100 vezes, Figura 5.19(a)), verifica-se que aparecem macro e microporos quando se trata de imagens com maior ampliação (Figura 5.19 (b), 5.19(c)). Ao se incorporar a cal (Figura 5.20(a)) observa-se que a estrutura gerada apresenta-se mais nitidamente agregada que a do solo natural compactado floclando as partículas de argila em torno dos grãos de quartzo (Figura 5.21). Portanto, para este solo verifica-se a ação flocladora da cal, atuando através da formação de grumos e acréscimo de índice de vazios. Torna-se importante ressaltar ainda que, para este tipo de solo também ocorre uma boa reação entre o solo e a cal, uma vez que os grãos de hidróxido de cálcio ou cal hidratada não são visíveis nas imagens efetuadas.

As Figuras 5.20 e 5.22 apresentam respectivamente os espectros de raios-x da amostra natural e estabilizada com cal. Os resultados foram obtidos em diferentes pontos da estrutura do solo. Com base nestas análises, verifica-se o aparecimento, no cristal do material natural, de Al, Si, C, Fe; e ainda, Ti (Figura 5.20). Ao incorporar a cal hidratada ao material compactado na condição de umidade ótima, verifica-se a presença adicional de Ca (Figuras 5.22), comprovando assim a presença de elemento proveniente da cal.

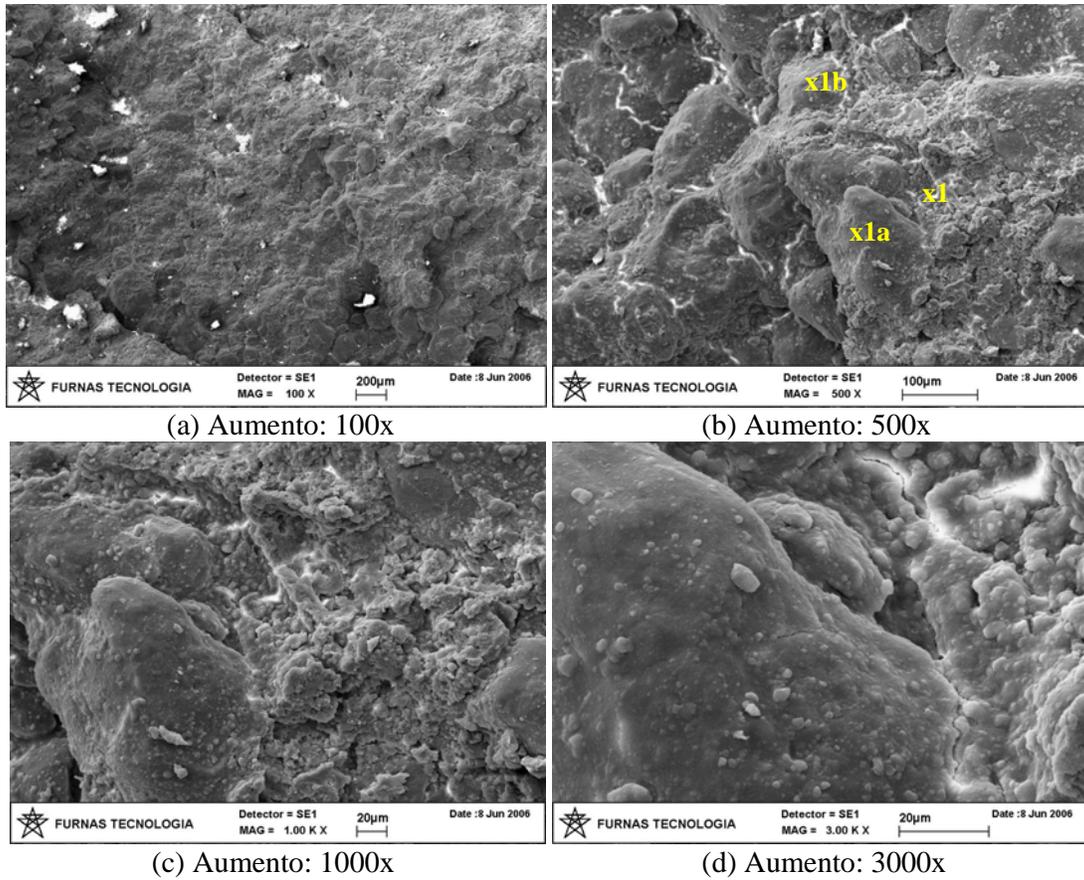
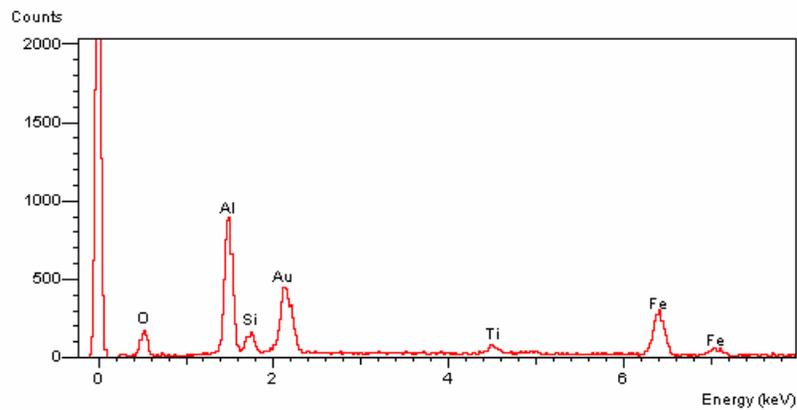
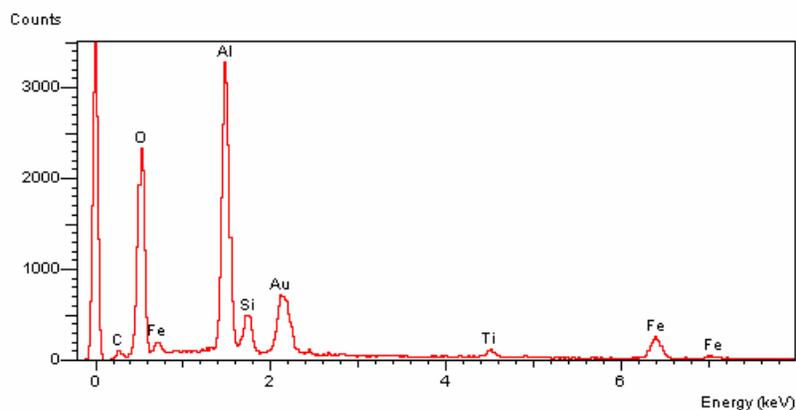


Figura 5.19 - Microscopia de Varredura do Solo HB11 Compactado na Energia PN.



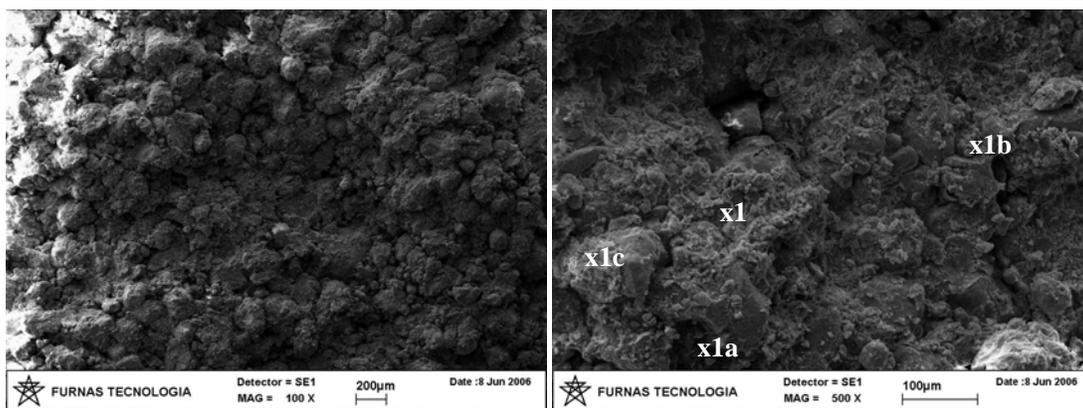
(a) Microanálise x1 - No cristal (provável caulinita) com carbonato e cimento de óxido/hidróxido ferro e/ou titânio.

Figura 5.20 - Microanálise do Solo HB11 Compactado na Energia PN.



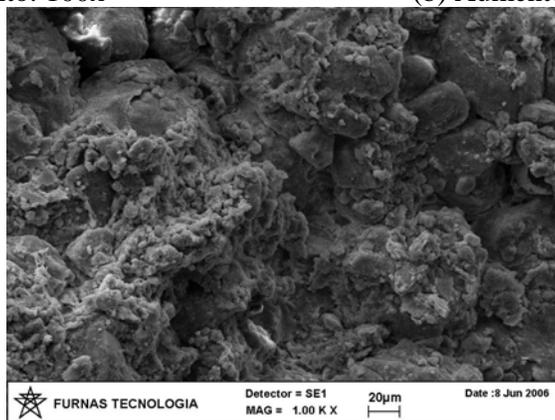
(b) Microanálise x1b - No cristal (provável caulinita) com carbonato e cimento de óxido/hidróxido ferro e/ou titânio

Figura 5.20 - Microanálise do Solo HB11 Compactado na Energia PN - Continuação.



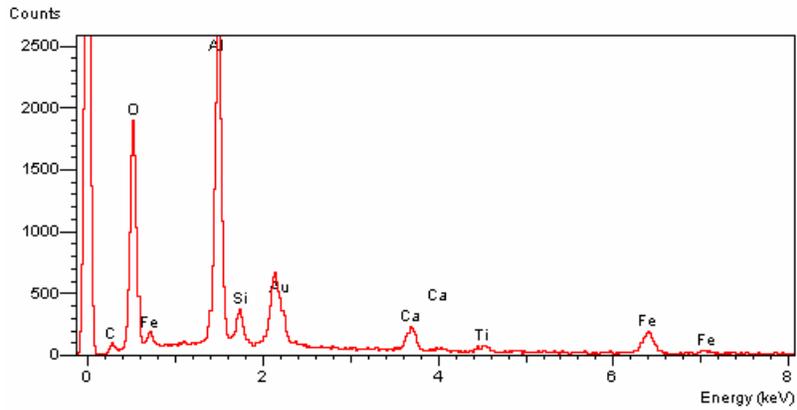
(a) Aumento: 100x

(b) Aumento: 1000x

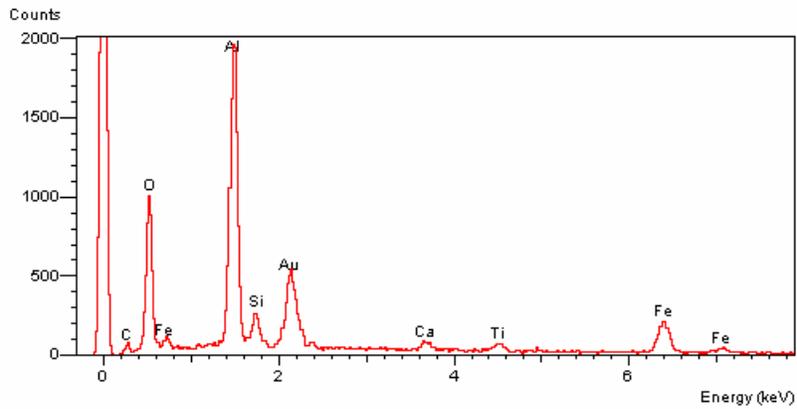


(c) Aumento: 3000x

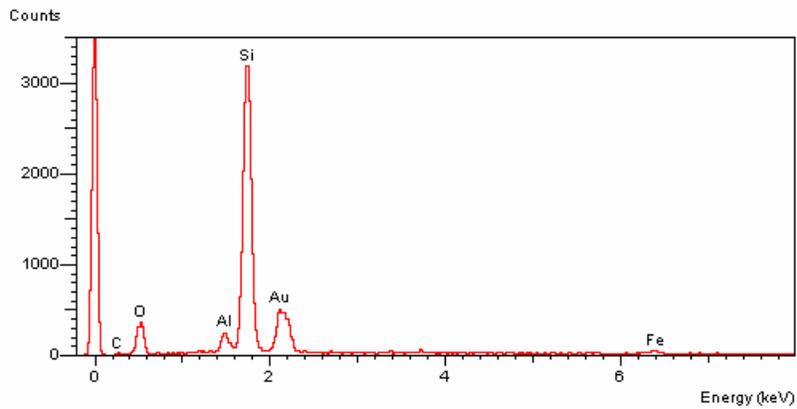
Figura 5.21 - Microscopia de Varredura do solo HB11 Estabilizado e Compactado na Energia PN.



(a) Microanálise x1 - Na massa (provável caulinita) com carbonato e cimento de óxido/hidróxido ferro e/ou titânio.



(b) Microanálise x1a - No cristal (provável caulinita) com carbonato e cimento de óxido/hidróxido ferro e/ou titânio.



(c) Microanálise x1b - No cristal (quartzo com provável contaminação de caulinita).

Figura 5.22 – Microanálise do Solo HB11 Estabilizado e Compactado na Energia PN.

O solo HB12, segundo Cardoso (2002), apresenta agregados compondo cerca de 25% do total da amostra, estes sendo constituídos na grande maioria por blocos com forma angular, lisos a pouco rugosos e orientação inexistente (Figura 5.23). Os nódulos (cerca de 3% do total da amostra) são típicos com forma arredondada a subangular, isotrópicos sem a presença de fraturamentos e orientação. Estes são compostos principalmente por hematita. Ainda segundo o autor, os grãos de quartzo ocupam menos de 15% do total da amostra retratada na lâmina, possuem dimensões variadas e em geral são arredondados, não apresentando fraturamento, orientação ou corrosão. Os contatos entre os elementos estruturais são realizados por meio de pontes e filmes de argila, e os vazios compõem cerca de 20% do total da amostra.

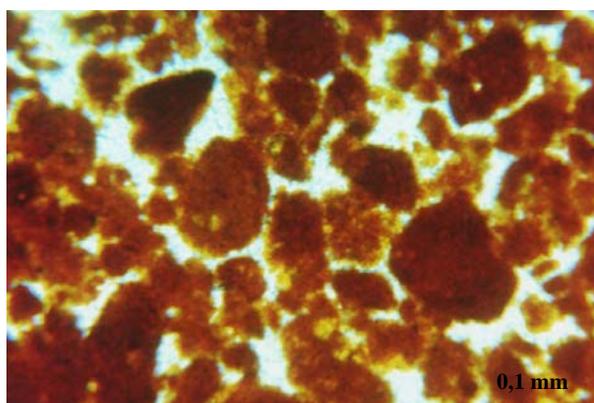


Figura 5.23 – Microscopia do Solo HB12 em Estado Indeformado, mostrando Agregados, na maioria em Blocos, e os Vazios Compactos Simples - Aumento: 90x. Cardoso, (2002).

A Figura 5.24(a) mostra que aparentemente o solo compactado no estado natural é marcado por uma estrutura mais homogênea. No entanto, ao se ampliar a imagem (Figura 5.24(b), 5.24(c)) observa-se a presença discreta de macro e microporosidade em uma estrutura densa de solo compactado. Apenas ao ampliar a imagem em 3000x (Figura 5.24(d)) é possível distinguir a existência de material mais fino recobrendo os grãos de quartzo. Ao se incorporar 6% de cal ao solo, a estrutura gerada ainda se apresenta homogênea (Figura 5.26(a)), distinguindo-se apenas por não mais apresentar a aparência de placas. Em maiores ampliações é possível observar certo rearranjo estrutural das partículas com formação de agregados melhor definidos quando da adição de cal. A Figura 5.28 mostra que ao se incorporar 2% de cal ao solo, este desagrega, voltando a agregar-se com 6% de cal, logo, ao se acrescentar 6% de cal ao solo, ele inicialmente se desagrega ao passar possivelmente pelo pH correspondente ao ponto isoelétrico, voltando a se agregar em seguida. Ainda, de forma semelhante aos

latossolos já estudados, ocorreu total incorporação da cal na mistura com o solo, uma vez que os grãos de  $\text{Ca(OH)}_2$  não são visíveis.

As Figuras 5.25 e 5.27 apresentam respectivamente os espectros de raios-x da amostra natural e estabilizada com 6% de cal. Os espectros de raios-x foram obtidos em diferentes pontos da estrutura do solo. Com base nestas análises, verifica-se o aparecimento, no material natural, de O, Al, Si, K e Fe. É interessante observar que as concentrações destes elementos químicos (Si, Al e Fe) estão variando significativamente de acordo com o ponto examinado. Ao incorporar a cal hidratada ao material compactado na condição de umidade ótima, verifica-se estabilização dos picos de Al e Si em valores bastante similares e o surgimento dos picos de Ca, Ti e Mg. O Ca é decorrente da incorporação da cal, quanto ao Ti e Mg, são apenas traços que já compunham o solo e se evidenciaram após a incorporação da cal.

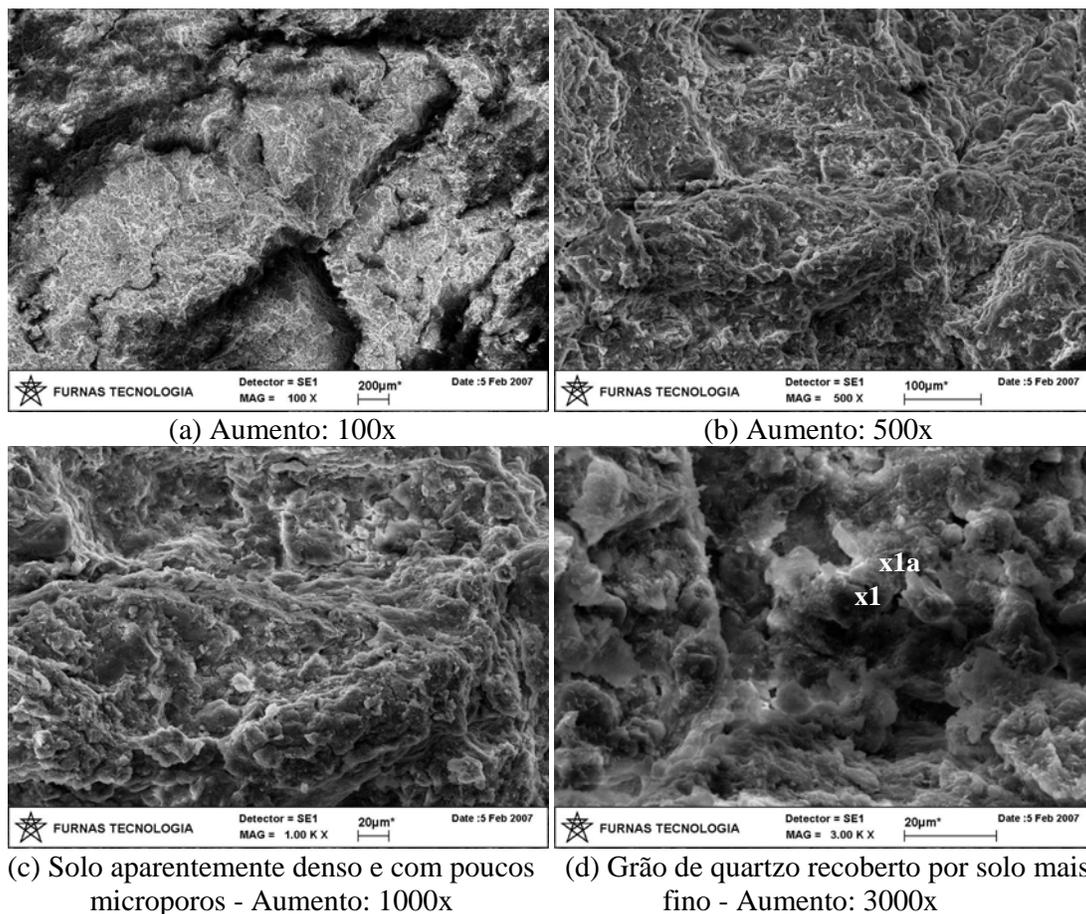
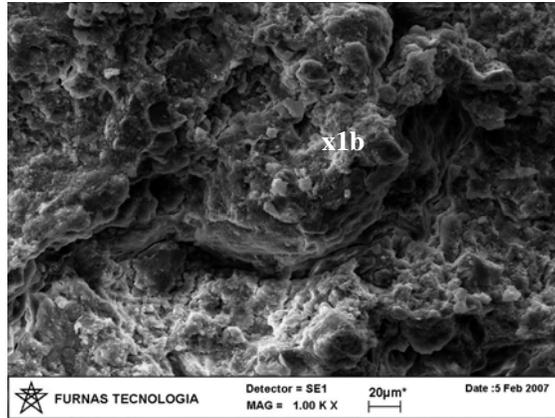
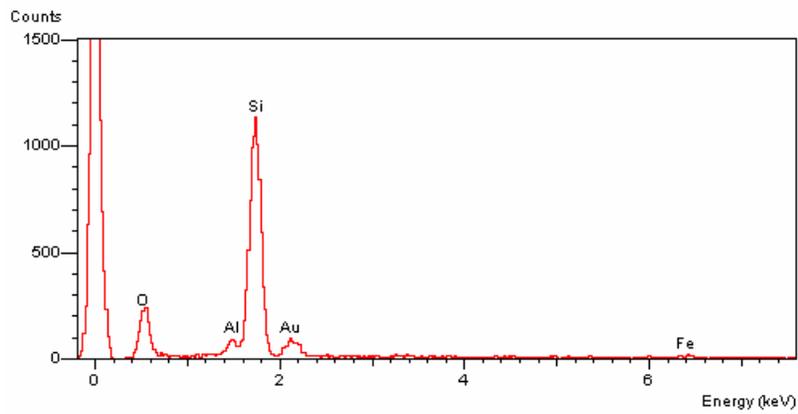


Figura 5.24 - Microscopia de Varredura do Solo HB12 Compactado na Energia PN.

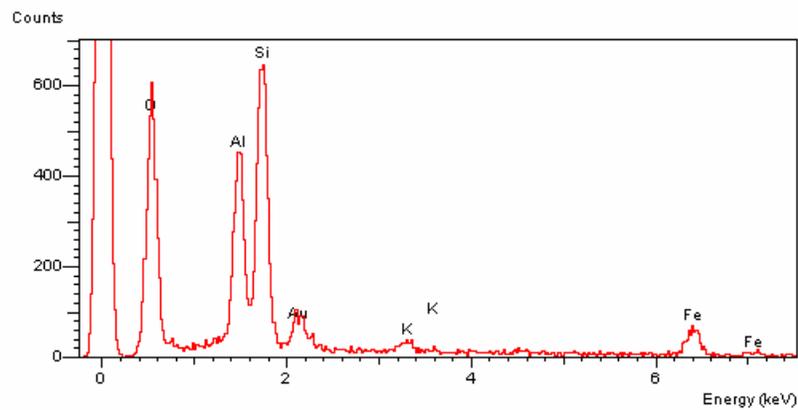


(e) Microanálise x1b – Detalhe de formação de grumos.  
Aumento: 5000x

Figura 5.24 - Microscopia de Varredura do Solo HB12 Compactado na Energia PN -  
Continuação.

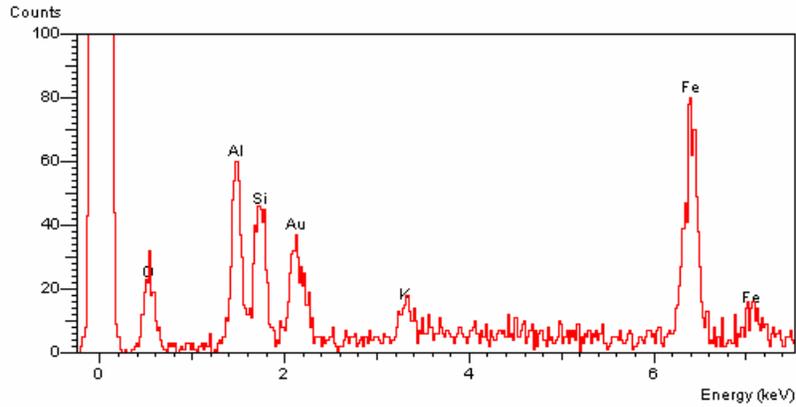


(a) Microanálise x1 - No grão de quartzo.



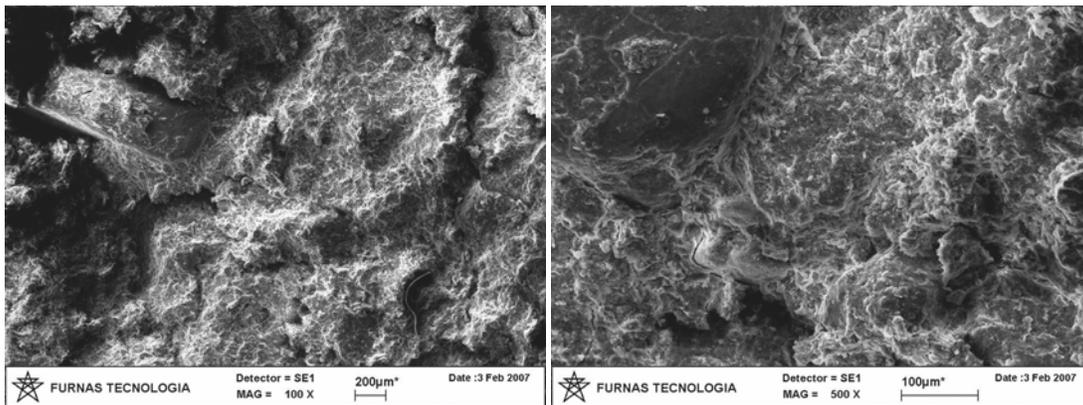
(b) Microanálise x1a – Na massa de solo mais fino. Prováveis illita+caulinita.

Figura 5.25 - Microanálise do Solo HB12 Compactado na Energia PN.



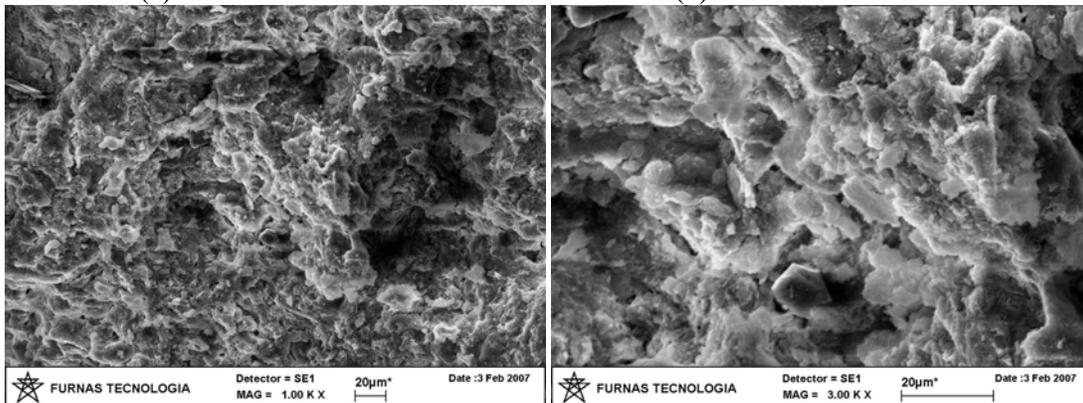
(c) Microanálise x1b – Na massa de solo mais fino.

Figura 5.25 - Microanálise do Solo HB12 Compactado na Energia PN - Continuação.



(a) Aumento: 100x

(b) Aumento: 500x



(c) Solo compacto, tendência em formar grumos e vista dos microporos  
Aumento: 1000x

(d) Aumento: 3000x

Figura 5.26 - Microscopia de Varredura do Solo HB12 Estabilizado e Compactado na Energia PN.

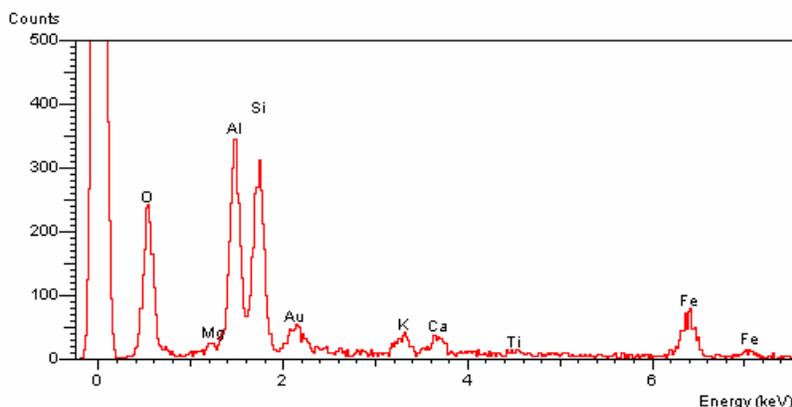


Figura 5.27 – Microanálise do Solo HB12 Estabilizado e Compactado na Energia PN – Análise realizada na massa do solo. Prováveis illita+caulinita.

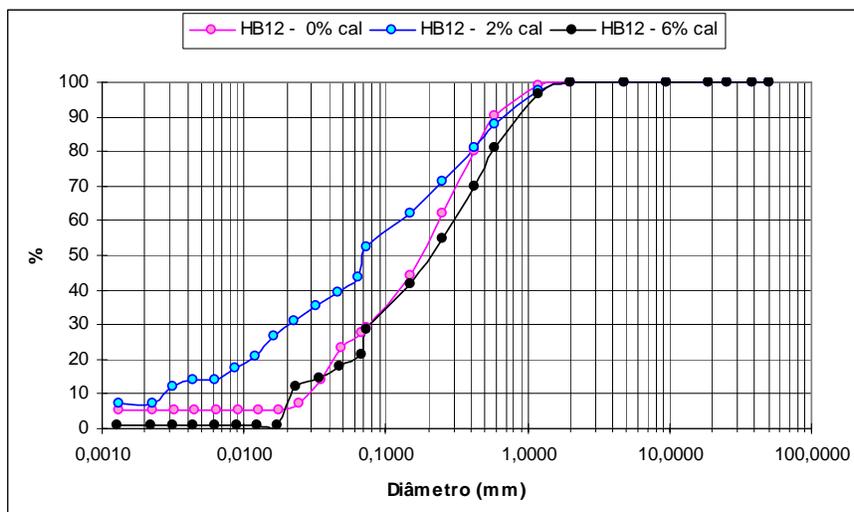


Figura 5.28 – Curvas Granulométricas do Solo HB12.

Foram ainda estudados os solos usados como camada de base e subbase dos trechos experimentais estudados por Rezende (2003). Tais amostras tendo sido denominadas de solo HBR1 e HBR2. O solo HBR1 sendo obtido no trecho experimental da BR-105 e o HBR2 no trecho experimental da BR-441.

Rezende (2003) realizou microscopias de varredura do material HBR1 compactado em 3 teores de umidades de compactação para o solo natural (17%, 19,8% e 24%) e ainda, também em 3 umidades (17%, 20,7% e 23%) considerando a incorporação da cal hidratada.

A Figura 5.29(a) mostra o detalhe do contato entre um grão de quartzo e o plasma. O aparecimento do espaço entre os dois materiais se deve provavelmente ao processo de desidratação da amostra para metalização e realização das imagens. Já na Figura 5.29(b)

verifica-se a existência de um grão de quartzo, de um agregado e de uma raiz presentes na amostra de solo fino; além disso, aparecem outros agregados menores.

O estudo desse solo é, no entanto, particularmente importante porque foram realizadas imagens de amostras compactadas em diferentes umidades com e sem a adição de cal. No geral, observa-se que o aumento da umidade de compactação conduz à destruição dos agregados e fechamento dos poros existentes no solo compactado no estado natural (Figuras 5.30). Ao se adicionar 2% de cal se tem em muito maior intensidade a destruição dos agregados e fechamento dos poros no solo compactado, ficando a influência da umidade menos marcante (Figura 5.31). A Figura 5.32 mostra que a adição de 2% de cal a esse solo gera a sua desagregação podendo o mesmo voltar a agregar-se para maiores percentuais como mostrado para 8% de cal nessa figura.

Na análise de EDS foi verificada presença de cálcio distribuída de maneira uniforme no plasma do solo estabilizado, não existindo pontos de concentração de Ca.

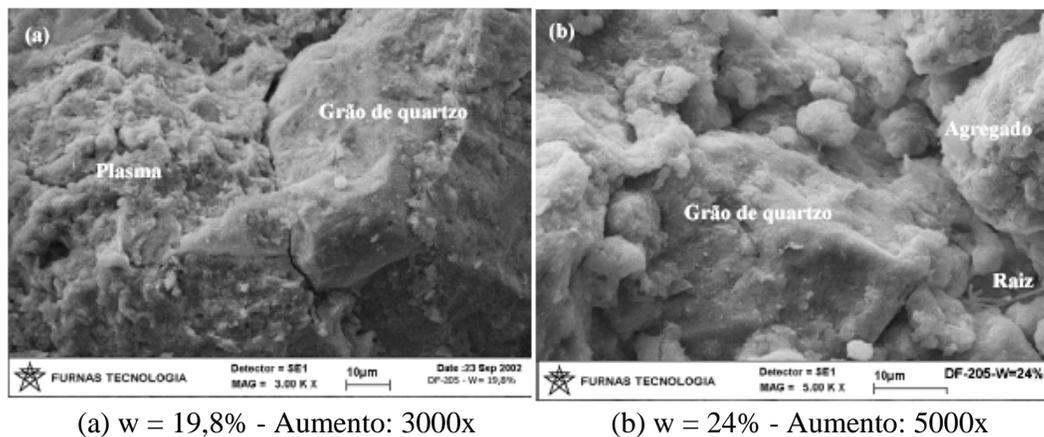
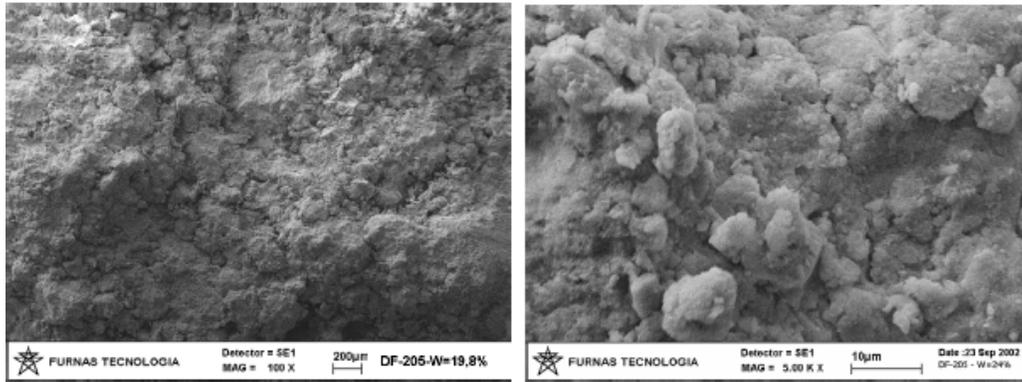


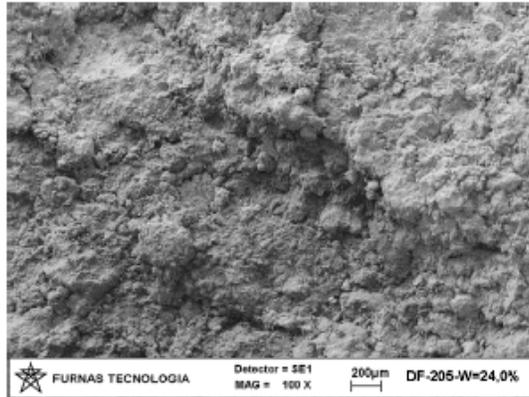
Figura 5.29 – Detalhes observados Microscopicamente para o Solo Fino (HBR1) – Rezende, (2003).





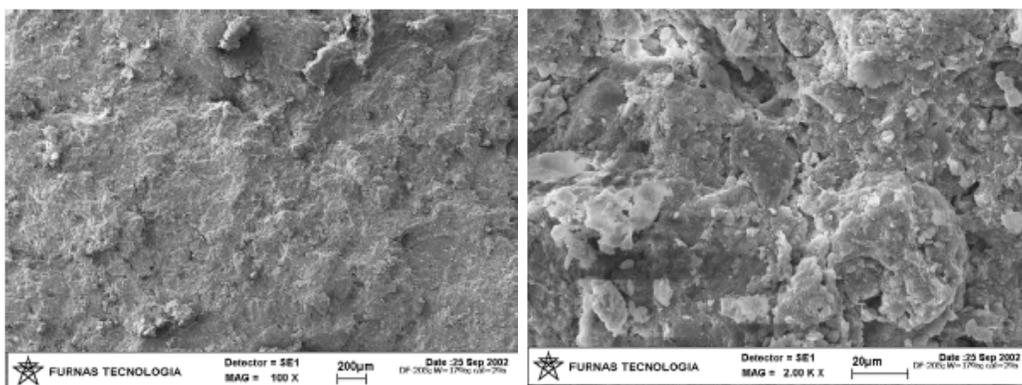
(b) Solo Fino na wót (19,8%)  
Aumento: 100x

(c) Solo Fino na wót (19,8%)  
Aumento: 5000x



(d) Solo Fino no ramo úmido (24%)  
Aumento: 100x.

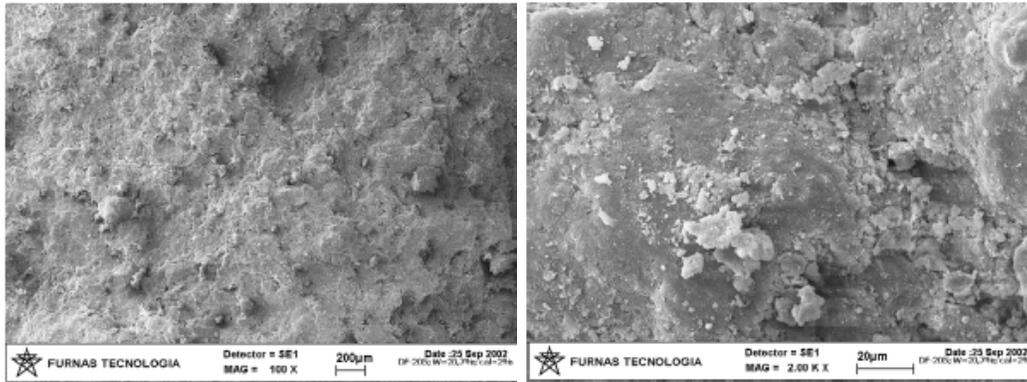
Figura 5.30 – Solo Fino em Diferentes Umidades de Compactação - Continuação Rezende, (2003).



(a) Ramo seco – Aumento: 100x

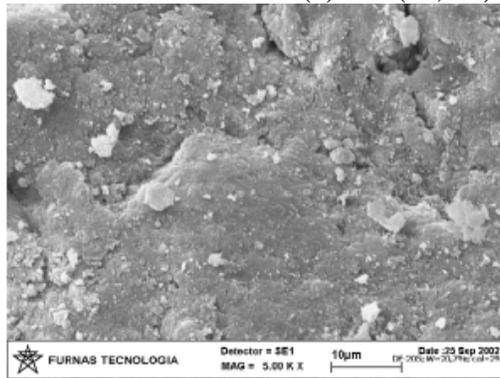
(b) Ramo seco – Aumento: 2000x

Figura 5.31 – Solo-Cal no Ramo Seco (w = 17%).  
Rezende, (2003).

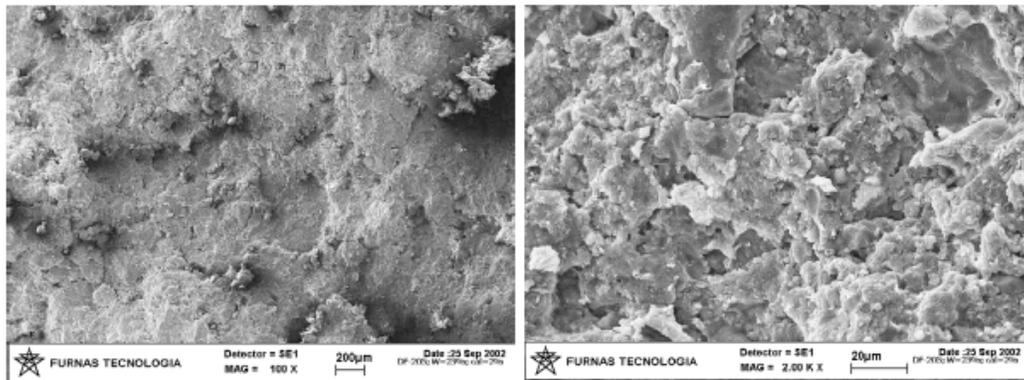


(c) wót (20,7%) – Aumento: 100x

(d) wót (20,7%) – Aumento: 2000x



(e) wót (20,7%) – Aumento: 5000x



(f) Ramo úmido (23%) – Aumento: 100x

(g) Ramo úmido (23%) - Aumento: 2000x

Figura 5.31 – Solo-Cal no Ramo Seco (w = 17%) - Continuação Rezende, (2003).

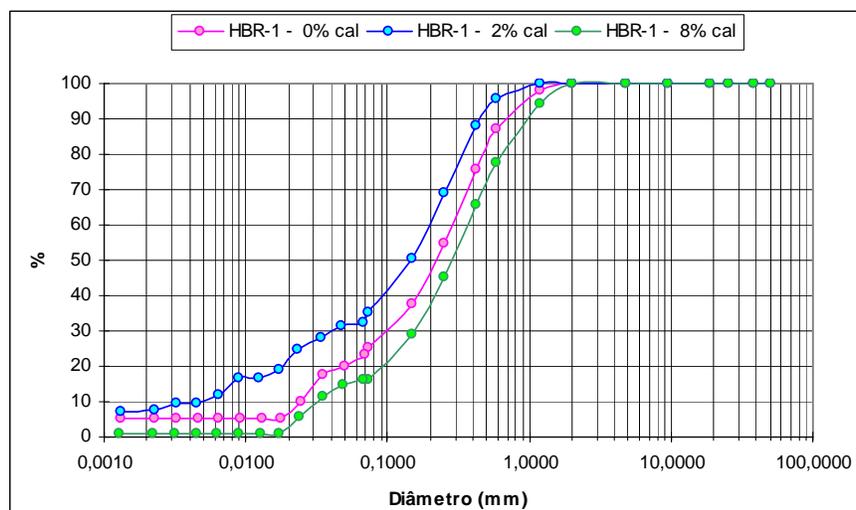


Figura 5.32 – Curvas Granulométricas do Solo HBR1.

De forma semelhante ao solo HBR1, para o solo HBR2 foram realizadas microscopias do material compactado em 3 teores de umidades de compactação para o solo natural (20%, 23% e 26%) e 3 teores de umidades, para a incorporação de 3% de cal (23%, 27,2% e 31%) e ainda, mais três considerando 6% de cal (23%, 27,6% e 30%).

Na Figura 5.33(a) observa-se a existência de um grão de quartzo e o detalhe das ligações entre os agregados e, na Figura 5.33(b) tem-se em detalhe os agregados que apresentaram na análise química acoplada, picos de alumínio, sílica e ferro.

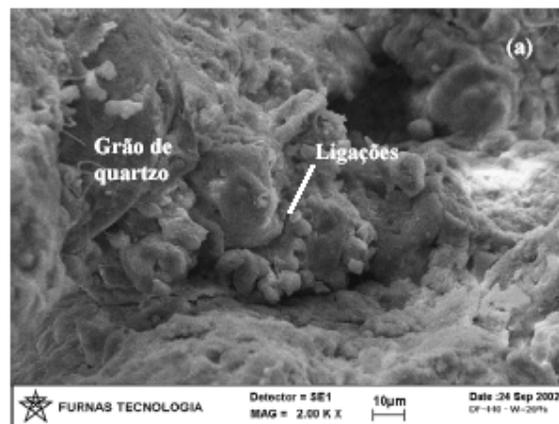
Observa-se para esse solo, menor influência que para o solo HBR1 quando do aumento da umidade de compactação na estrutura do solo natural (Figuras 5.34), tendendo a ocorrer estruturas fechadas e relativamente similares.

Para a mistura do solo com 3% de cal, se verifica certo aparecimento de macroporosidade embora as estruturas permaneçam relativamente fechadas e semelhantes, não se observando influência muito marcante da variação da umidade de compactação (Figuras 5.35). É possível observar, no entanto, que no ramo seco ( $w = 23\%$ ) quase não existem vazios e o plasma parece ser formado por uma pasta bem homogênea. E, com o aumento do teor de umidade, começam a aparecer separações na estrutura.

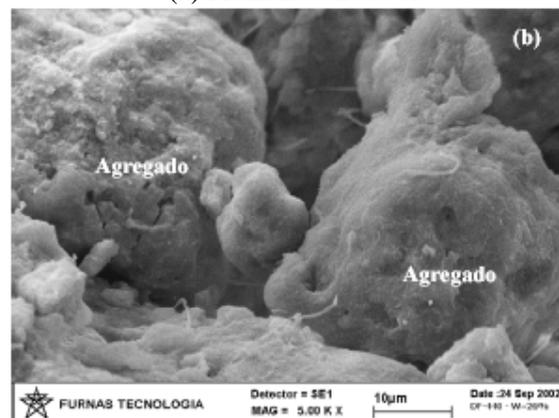
Para a mistura solo-cal (6%) observam-se claramente a agregação do solo, com maior presença de macroporosidade, esta aumentando com o teor de umidade de compactação (Figuras 5.36). No ramo seco ( $w = 23\%$ ) os agregados aparecem em menor quantidade (Figura 5.36(a)), mas, à medida que se aumenta o teor de umidade, a quantidade desses

agregados parece ser maior (Figuras 5.36(b), 5.36(c)). Analisando-se a incorporação de diferentes teores de cal na granulometria desse solo é possível perceber a ocorrência de agregação para 6% de cal (Figura 5.38). Assim, pode-se concluir que para 3% de cal esse solo se desagrega voltando a agregar com 6%.

Comparando as microestruturas das amostras dos solos HBR1 e HBR2 estabilizados com cal, observam-se efeitos aparentemente distintos tanto da influência do teor de umidade de compactação como do teor de cal incorporada. Enquanto para o solo HBR1 verifica-se a nítida presença dos agregados no solo natural com diminuição da macroporosidade, à medida que se aumenta o teor de umidade de compactação, no solo HBR2 ela é pouco marcante. No entanto, nos dois solos praticamente inexistente a presença de agregados para baixos teores de cal.

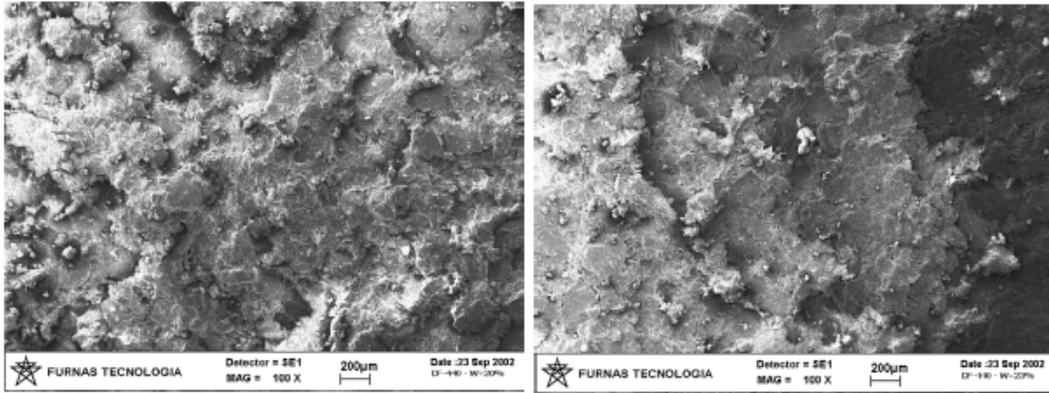


(a) Aumento: 2000 x



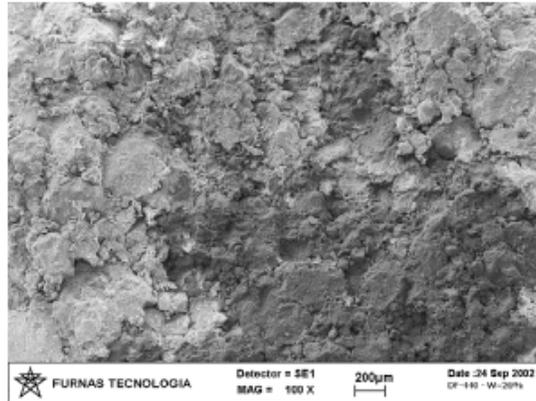
(b) Aumento: 5000 x

Figura 5.33 – Solo Fino HBR2  
Rezende (2003).



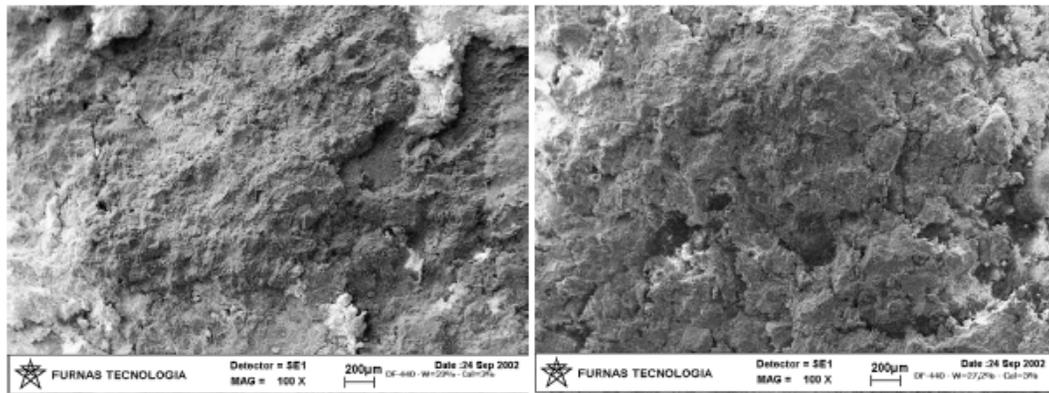
(a) Ramo seco ( $w = 20\%$ )

(b) umidade ótima ( $w_{ót} = 23\%$ )



(c) Ramo úmido ( $w = 26\%$ )

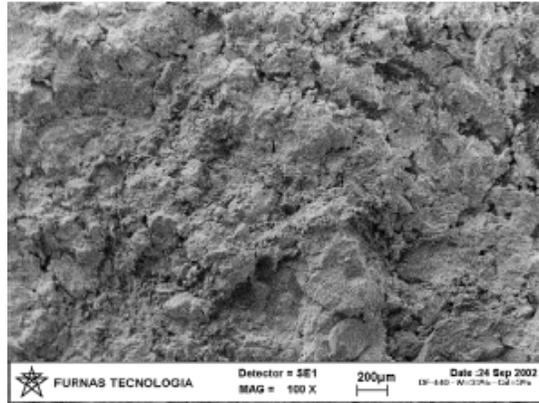
Figura 5.34 – Microscopia de Varredura – Solo HBR2 - Aumento de 100x  
Rezende, (2003).



(a) Ramo seco ( $w = 23\%$ )

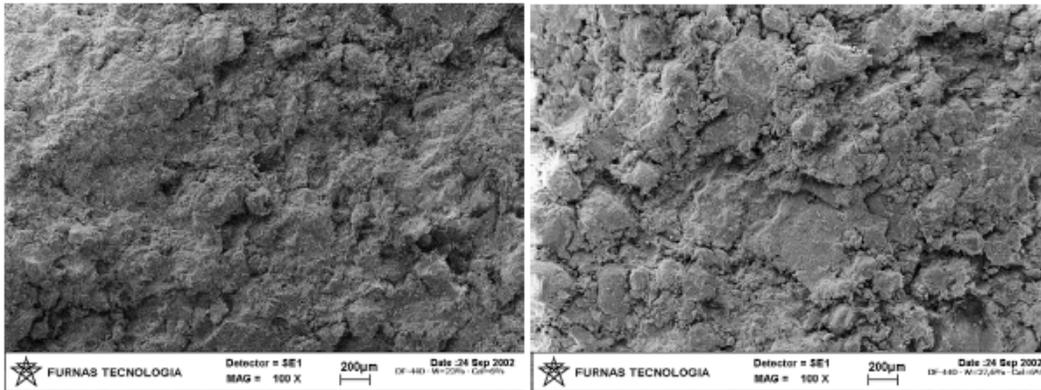
(b) umidade ótima ( $w_{ót} = 27,2\%$ )

Figura 5.35 – Microscopia de Varredura – Solo-cal (3%) - Aumento de 100x  
Rezende, (2003).



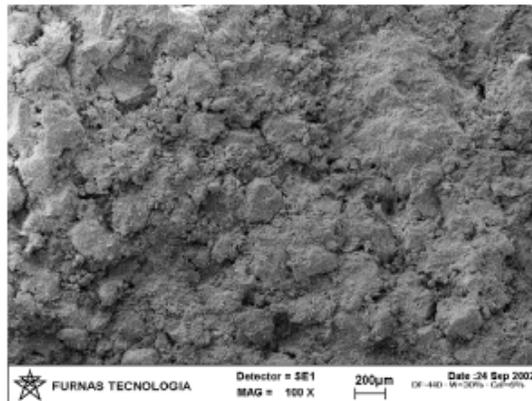
(c) Ramo úmido ( $w = 31\%$ )

Figura 5.35 – Microscopia de Varredura – Solo-cal (3%) – Continuação  
Aumento de 100x - Rezende, (2003).



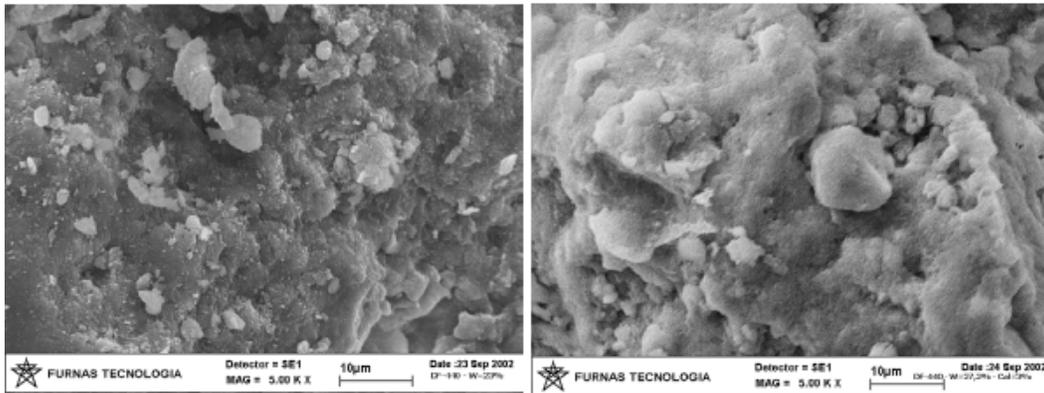
(a) Ramo seco ( $w = 23\%$ )

(b) umidade ótima ( $w_{ót} = 27,6\%$ )



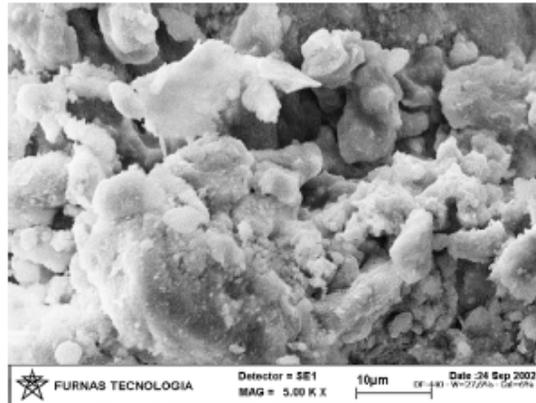
(c) Ramo úmido ( $w = 30\%$ )

Figura 5.36 – Microscopia de Varredura – Solo-cal (6%) - Aumento de 100x  
Rezende, (2003).



(a) Solo Fino - wót=23%

(b) Solo-Cal (3%) - wót = 27,2%



(c) Solo-cal (6%) - wót = 27,6%

Figura 5.37 – Microscopia de Varredura – Materiais Diversos – Aumento de 5000x  
Rezende, (2003)

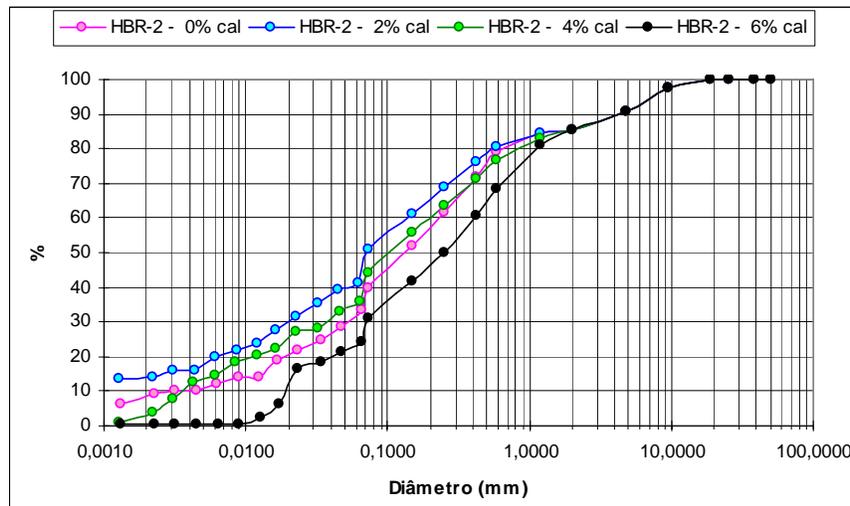


Figura 5.38 – Curvas Granulométricas do Solo HBR2.

De acordo com Cardoso (2002) a análise micromorfológica do solo ZM3 (Figura 5.39) mostrou a não existência de agregados de argila. Os nódulos são resultantes do preenchimento de vazios dos solos por hematita. Estes são típicos, com forma subangular, isotrópicos, ausentes de fraturamento ou alguma orientação. Os grãos de quartzo representam a quase a totalidade do material sólido ( $\pm 80\%$ ), são subangulosos a raramente subarredondados, lisos e, não apresentam orientação e sinais de corrosão, porém alguns são fraturados. Os contatos podem ser realizados por meio de pontes e filmes de argila. Os vazios estão em torno de 15%.

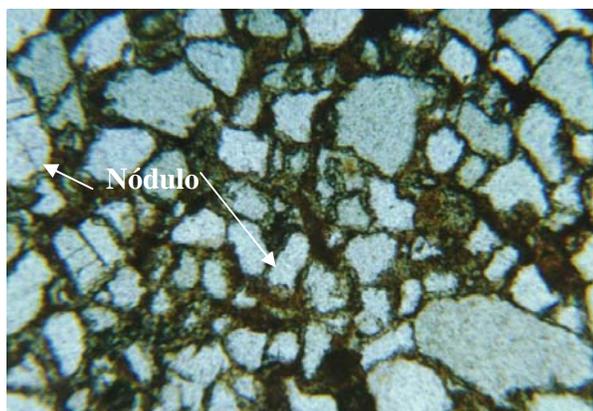


Figura 5.39 - Microfotografias do Solo ZM3 em Estado Natural (Indeformado) mostrando Grãos de Quartzo Dispersos e, Vazios Compactos, onde alguns são preenchidos por Nódulos de Hematita. Aumento: 90x.  
Cardoso, (2002).

A Figura 5.40 mostra a predominância dos grãos de quartzo envoltos na matriz argilosa. Ao efetuar a microscopia do material para ampliação de 100 vezes (Figura 5.40(a)) verifica-se a presença predominante da macroporosidade entre os grãos de quartzo. Para maiores ampliações verifica-se melhor a presença da matriz argilosa envolvendo e fazendo o elo entre os grãos de quartzo (Figura 5.40(d)). Para o material com cal incorporada é possível visualizar uma estrutura mais fechada (Figura 5.42(a)). No entanto, percebe-se que a cal age na matriz argilosa proporcionando sua agregação. Dado o elevado teor de quartzo presente no solo esse efeito praticamente não se faz sentir nas análises granulométricas (Figura 5.44).

As Figuras 5.41 e 5.43 apresentam respectivamente os espectros de raios-x das amostras natural e estabilizada com 6% de cal. Com base nestas análises, verifica-se a existência de Al, Si, K, Ti e Fe no material natural (Figura 5.41). Ao incorporar a cal hidratada (Figura 5.43), ocorre aparecimento do Ca, indicando a incorporação da cal.

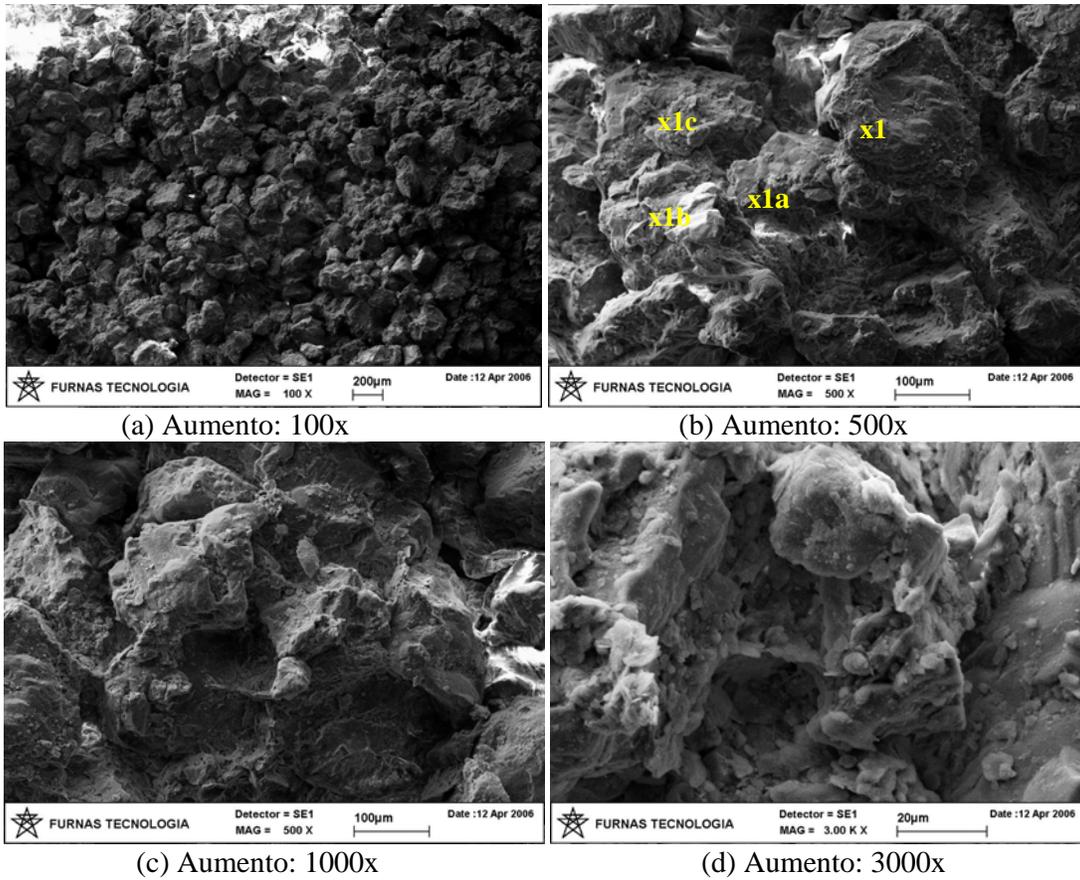
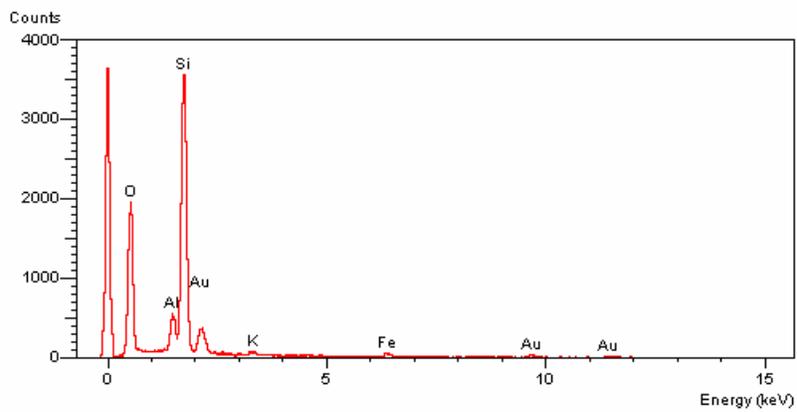
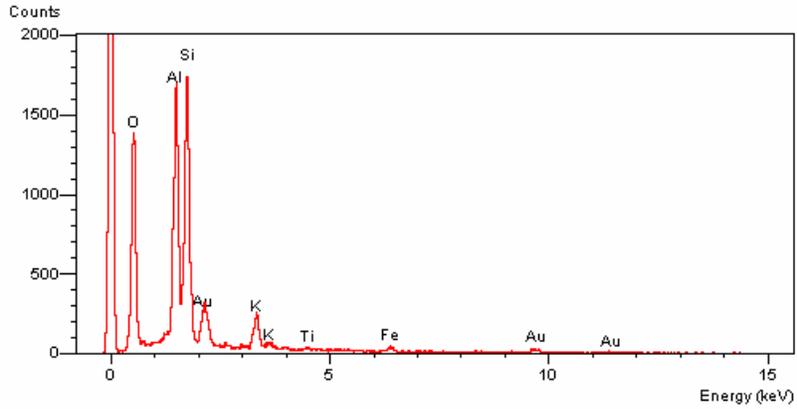


Figura 5.40 - Microscopia de Varredura do Solo ZM3 Compactado na Energia PN.

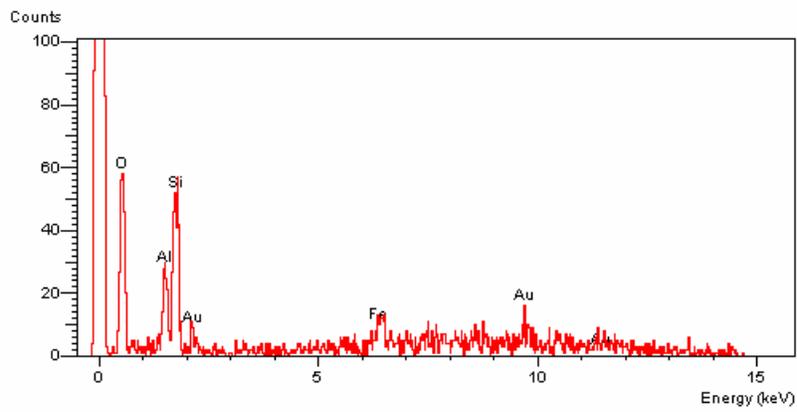


(a) Microanálise x1 - No cristal de quartzo (com provável contaminação de illita).

Figura 5.41 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo ZM3.

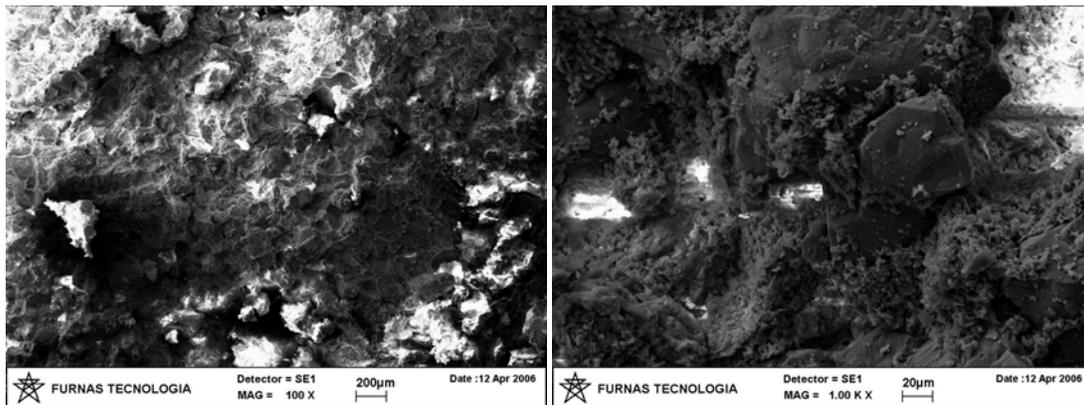


(b) Microanálise x1a - No cristal. Argilomineral (provável illita e caulinita).



(c) Microanálise x1b - No cristal. Argilomineral (provável caulinita).

Figura 5.41 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo ZM3 - Continuação.



(a) Aumento: 100x

(b) Aumento: 1000x

Figura 5.42 - Microscopia de Varredura do Solo ZM3 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.

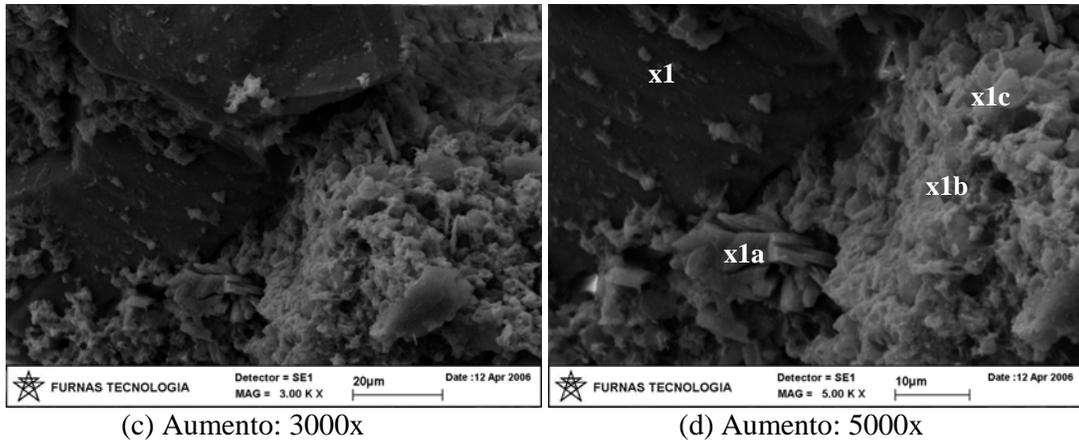


Figura 5.42 - Microscopia de Varredura do Solo ZM3 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN – Continuação.

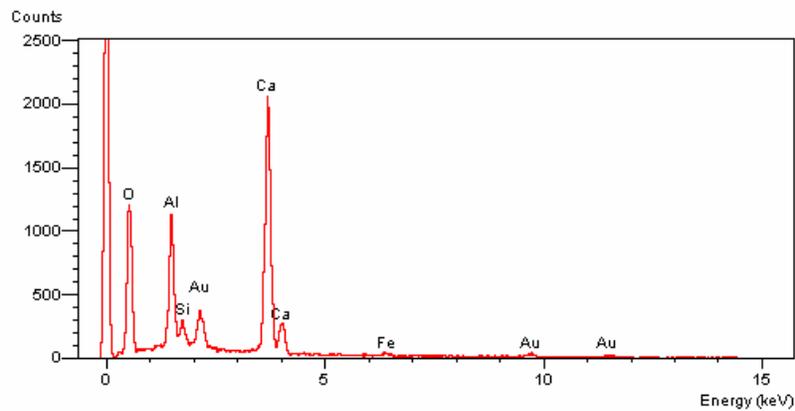
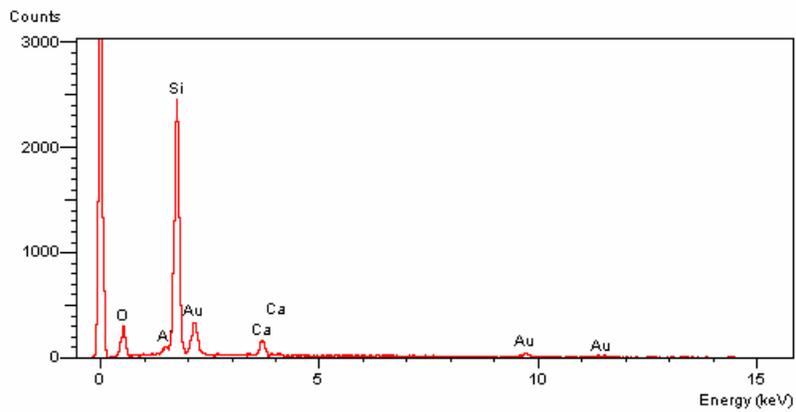
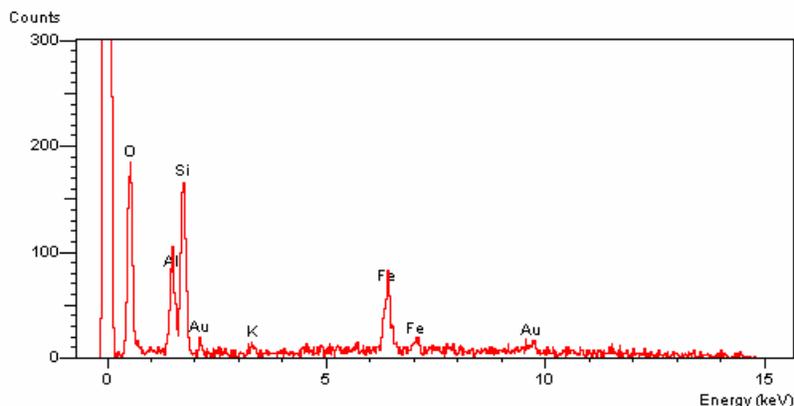


Figura 5.43 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo ZM3 Estabilizado.



(c) Microanálise x1c - Na placa na massa pulverulenta. Argilomineral (provável illita e/ou caulinita).

Figura 5.43 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo ZM3 Estabilizado - Continuação.

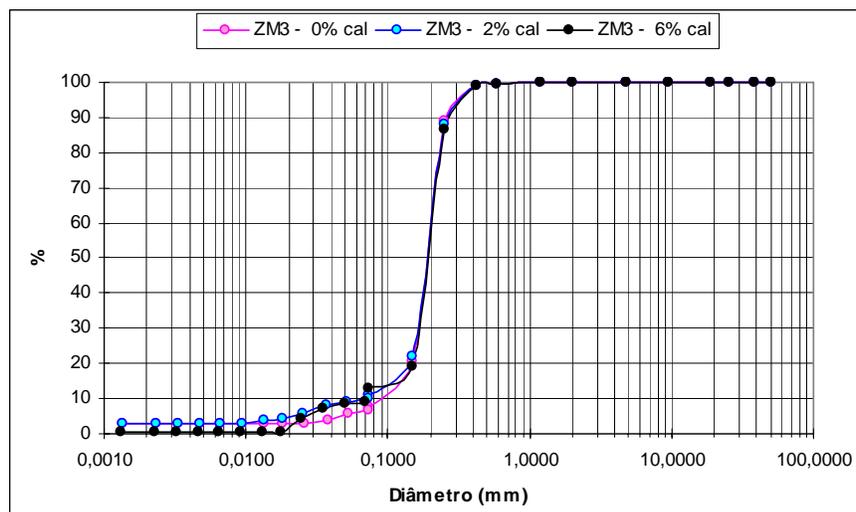


Figura 5.44 – Curvas Granulométricas do Solo ZM3.

Segundo Cardoso (2002), o solo ZM6 (Figura 5.45) não apresenta agregados de argila e, os nódulos, resultantes do preenchimento por hematita de vazios e espaços entre as foliações, são típicos, com forma arredondada, isotrópicos e com ausência de fraturamentos. Possuem orientação em função das foliações oriundas da rocha-mãe. Os grãos de quartzo não atingem a 10% do total da amostra, são angulosos a raramente arredondados; lisos e apresentam orientação em função das foliações existentes. Mostram-se levemente fraturados e corroídos. Os contatos podem ser realizados raramente por meio de pontes e filmes de argila.

Acumulações de oxi-hidróxido de Fe muito fino na matriz ocorrem em formas lineares e arredondadas.

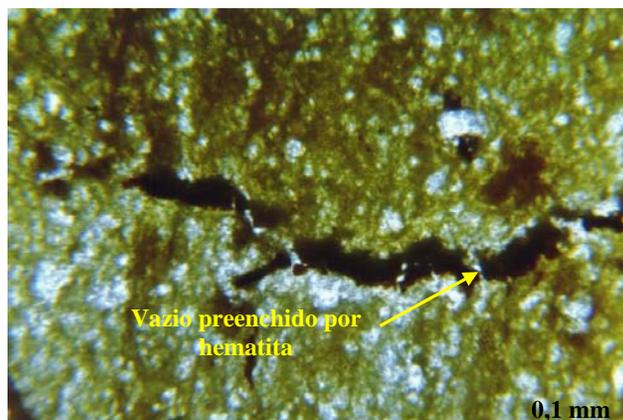


Figura 5.45 - Microscopia do Solo ZM6 obtida para Amostra Natural (Indeformada), mostrando Vazio preenchido por Hematita. Aumento: 90x. Cardoso, (2002).

A Figura 5.46 mostra a microscopia de varredura do solo ZM6 compactado na umidade ótima de compactação. Observa-se para ampliação de 500 e 1000 vezes (Figuras 5.46(a), 5.46(b)) uma tendência à homogeneidade dos poros, no entanto, para ampliação de 3000 vezes (Figura 5.46(c)) verifica-se que a estrutura é composta por micro agregados que dão origem a microporos. Ao se incorporar a cal (Figura 5.48(a)) observa-se que aparentemente a estrutura gerada é similar à apresentada pelo solo natural compactado. No entanto, ao se ampliar a imagem (Figura 5.48(b)), verifica-se que houve um maior fechamento da estrutura do material através da redução da agregação existente na amostra natural. Fato este melhor visualizado na Figura 5.48(c). Observa-se uma redução considerável nos grãos existentes na amostra natural, assim como uma redução de tamanho nos grumos ainda existentes. Tal característica indica desagregação e provável reorientação das partículas, uma vez que a incorporação de 6% de cal neste solo em específico, gerou um aumento considerável no peso específico aparente seco máximo, o que sugere redução de vazios (no caso entre agregações). As curvas granulométricas (Figura 5.50) comprovam a existência da desagregação já citada para o solo com 6% de cal incorporada.

As Figuras 5.47 e 5.49 apresentam respectivamente os espectros de raios-x das amostras natural e estabilizada com 6% de cal. As determinações foram efetuadas em diferentes pontos da estrutura do solo compactado. Com base nestas análises, verifica-se o aparecimento, no grumo do material natural, de Al, Si, K, Fe e ainda de Ti (Figura 5.47(b)). Ao incorporar 6%

de cal hidratada (Figura 5.49), houve redução nos picos de Al e Si e ainda o aparecimento do Ca. O elemento Ca é decorrente da cal incorporada, enquanto as variações de escala do Al e Si são provavelmente decorrentes da maior hidratação do material.

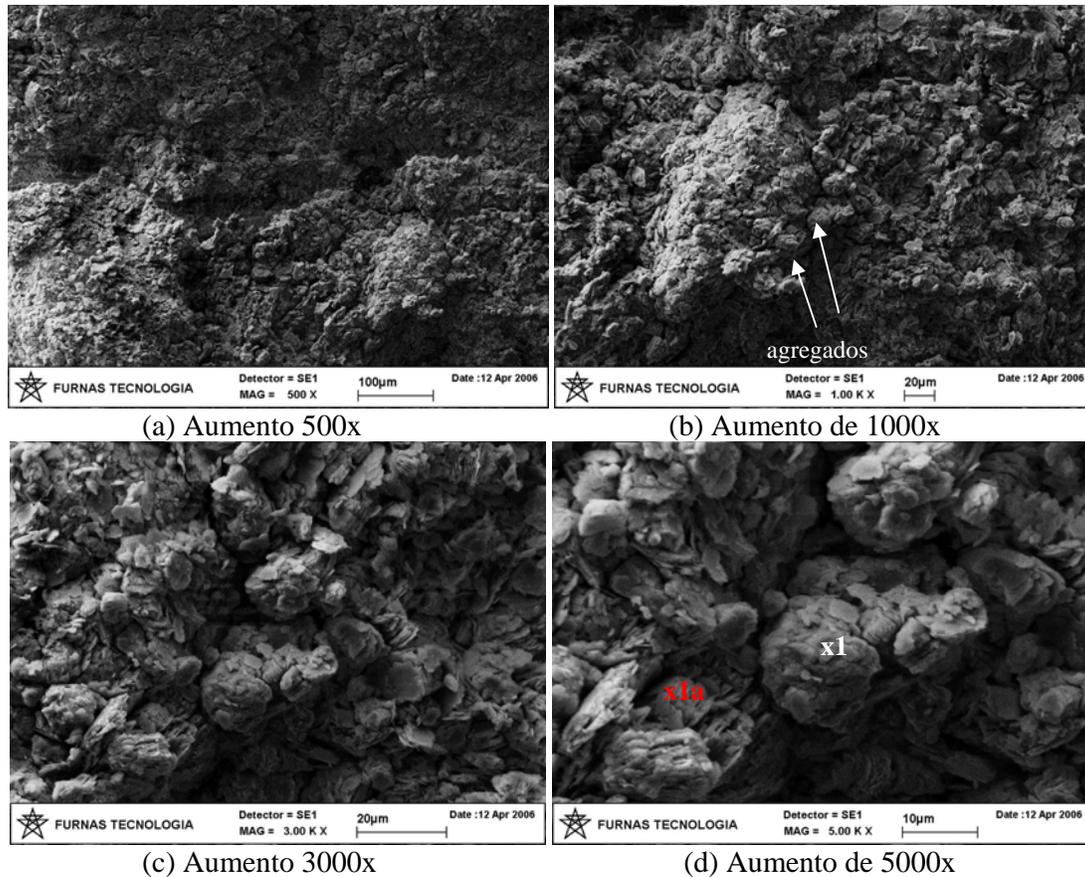
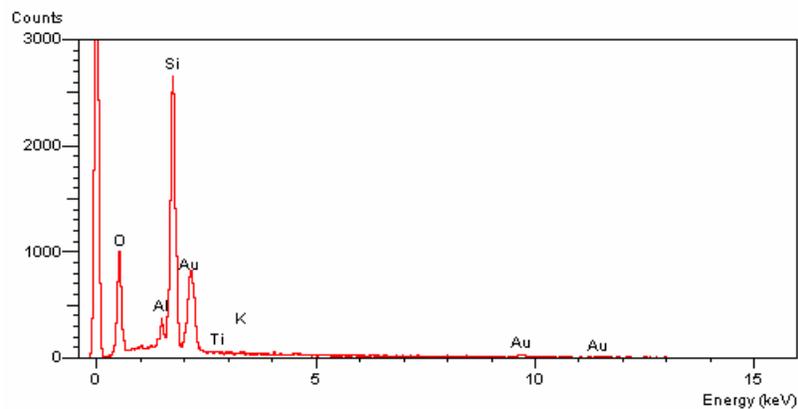
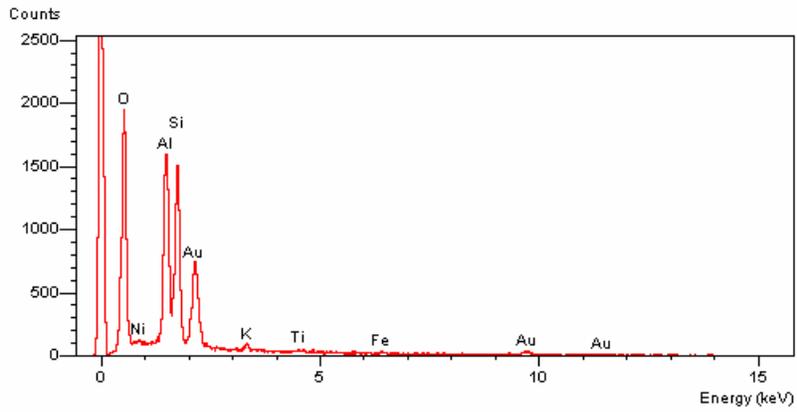


Figura 5.46 - Microscopia de Varredura do Solo ZM6 Compactado na Energia PN.



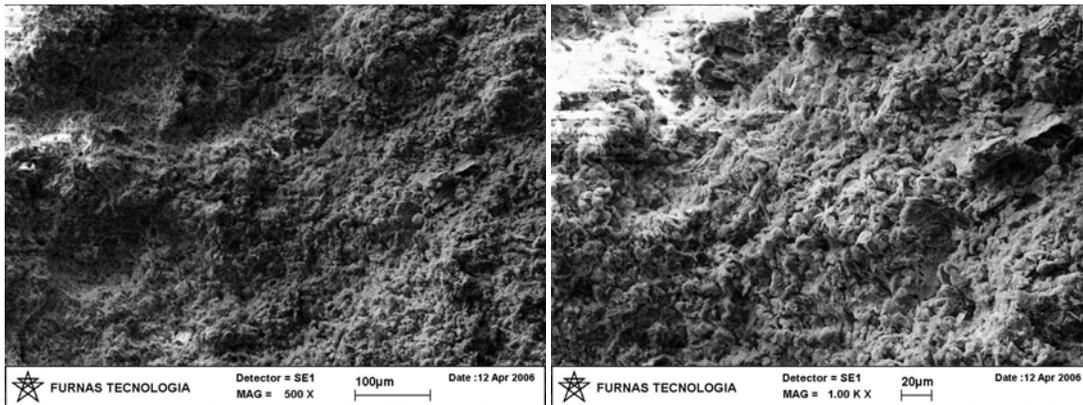
(a) Microanálise x1 - No grumo (quartzo com provável contaminação de ilita).

Figura 5.47 – Microanálise do Solo ZM6 Compactado na Energia PN.



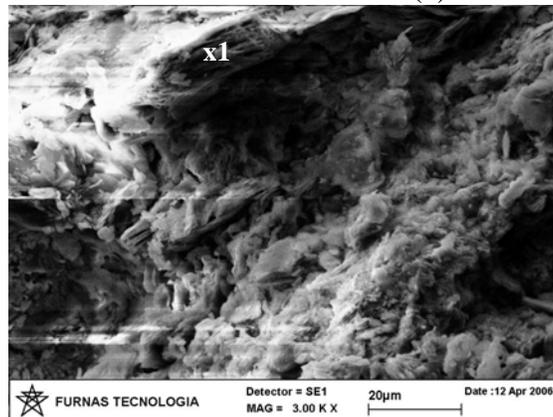
(b) Microanálise x1a - Na palheta. Argilomineral (prováveis ilita e caulinita).

Figura 5.47 – Microanálise do Solo ZM6 Compactado na Energia PN - Continuação.



(a) Aumento: 500x

(b) Aumento: 1000x



(c) Aumento: 3000x

Figura 5.48 - Microscopia de Varredura do Solo ZM6 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.

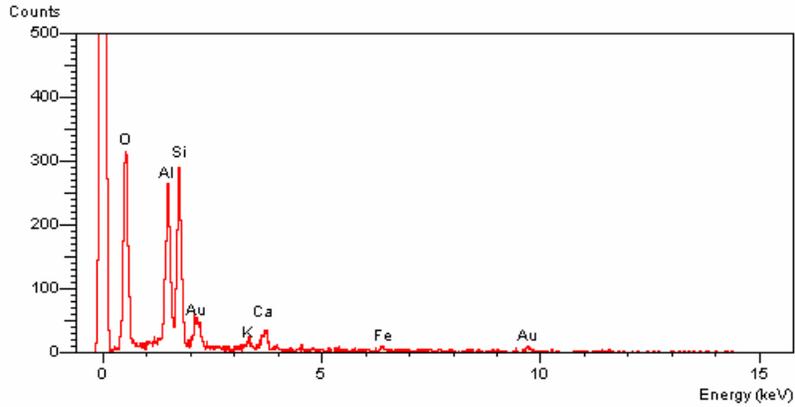


Figura 5.49 – Microanálise x1 - Na palheta. Argilomineral (prováveis illita e caulinita). Solo ZM6 Estabilizado e Compactado na Energia PN.

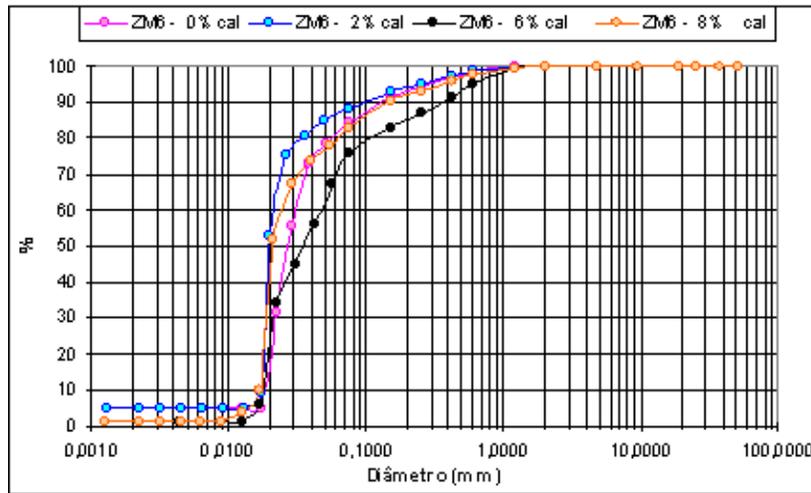


Figura 5.50 – Curvas Granulométricas do Solo ZM6.

De acordo com Cardoso (2002) o solo SF2 em estado natural (Figura 5.51) não mostra a formação de agregados de argila e, os nódulos, resultantes do preenchimento por hematita de vazios apresentam forma angulosa, são isotrópicos e não apresentam fraturamentos. Os grãos de quartzo em geral são arredondados e lisos e também não mostram fraturamentos e corrosão. Os vazios não chegam a 10% do total da lâmina, onde na grande maioria são do tipo planar e acompanham as foliações, as quais, às vezes, são preenchidas por hematita muito fina.

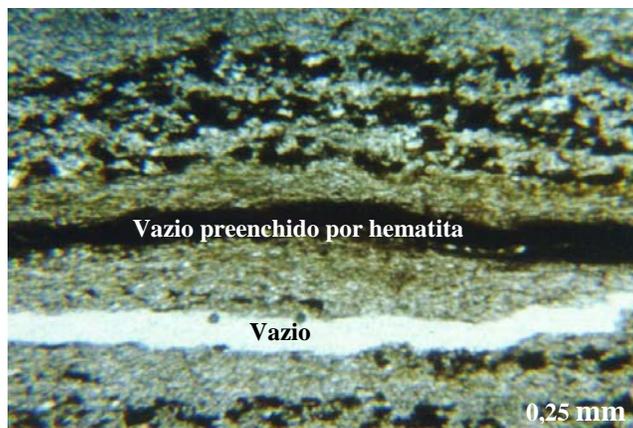


Figura 5.51 - Microfotografias do Solo SF2 em Estado Natural (Indeformado).  
Cardoso, (2002).

O processo de compactação dinâmica dá origem a uma nova reorganização estrutural do solo apresentando estrutura mais homogênea tanto para o solo natural, quanto para o material com incorporação de 6% de cal hidratada (Figura 5.52(a) e 5.54(a)). Para ampliação de até 1000 vezes, aparentemente as estruturas com e sem cal são similares, não tendo ocorrido agregação ou desagregação no material. No entanto, para a imagem aumentada em 3000 vezes observa-se que o solo natural apresenta estrutura mais homogênea que o com 6% de cal incorporada, com destaque para a Figura 5.54(c). Essa limitada agregação verificada para 6% de cal não equivale perfeitamente para o que apontam os resultados de análise granulométrica (Figura 5.56), talvez pelo efeito desagregador da compactação diante de uma eventual fragilidade dos agregados formados.

As Figuras 5.53 e 5.55 apresentam respectivamente os espectros de raios-x das amostras natural e estabilizada com 6% de cal. Com base nestas análises, verifica-se a presença de O, Si, Al, Na, K e Fe, muito embora os picos destas últimas três ocorrências não se apresentem significativos. Ao proceder a incorporação da cal hidratada, verifica-se o aparecimento do Ca e Ti, esse último provavelmente já existente no solo e o cálcio é fruto da incorporação da cal.

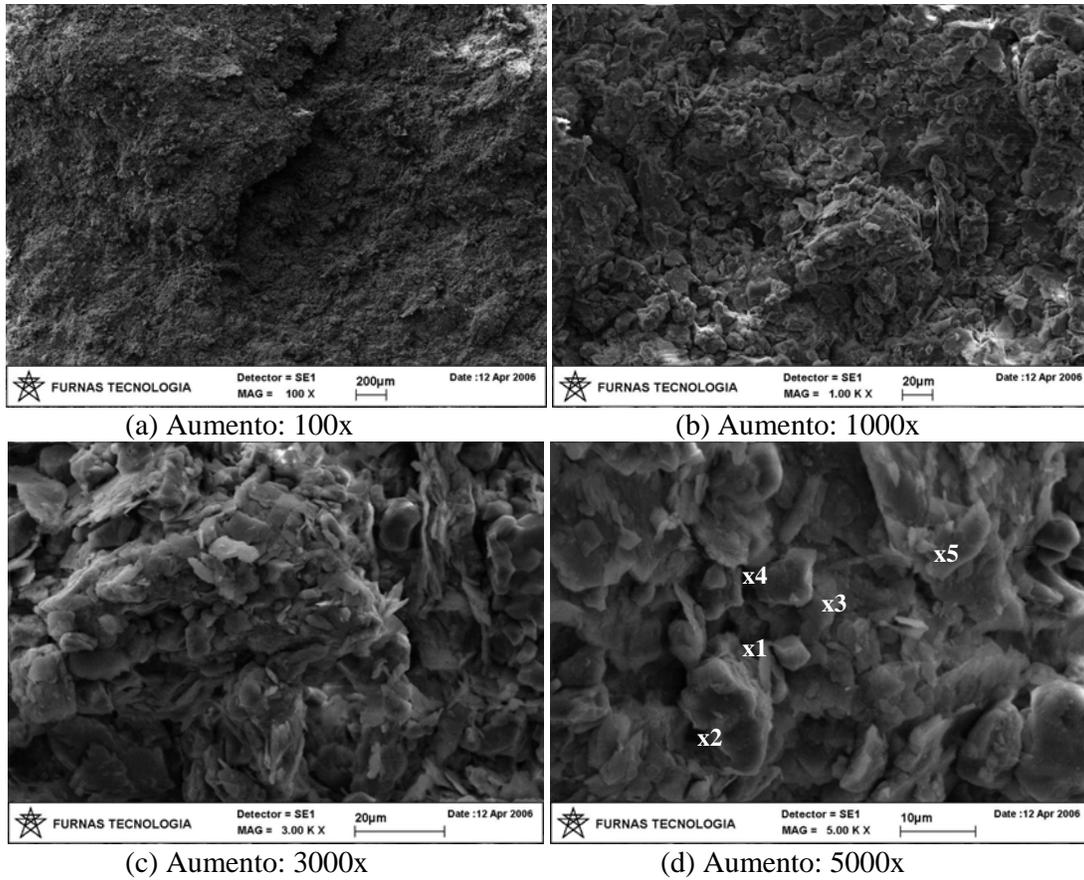
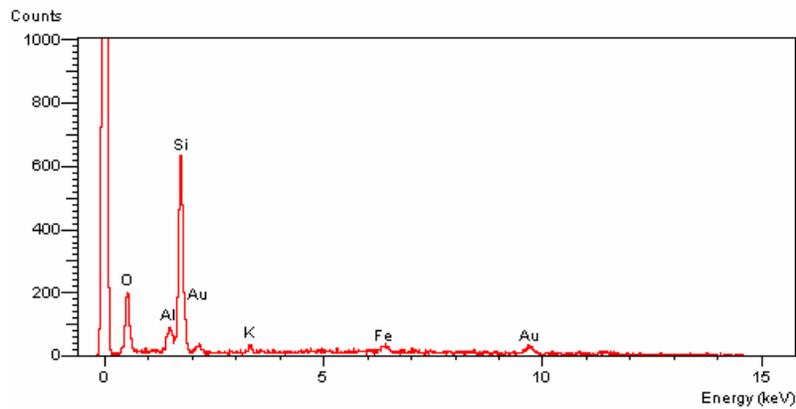
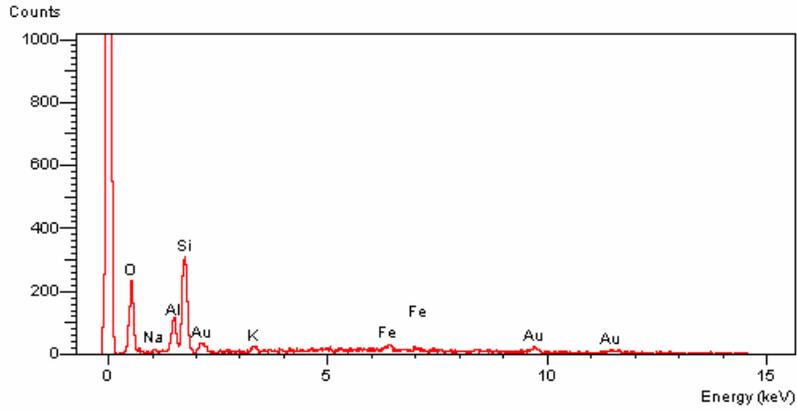


Figura 5.52 - Microscopia de Varredura do Solo SF2 Compactado na Energia PN.



(a) Microanálise x1 - Cristal de quartzo com superfície com argilomineral (provável illita).

Figura 5.53 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo SF2.



(b) Microanálise x2 - Cristal de quartzo com superfície com argilomineral (provável illita).

Figura 5.53 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo SF2 – Continuação.

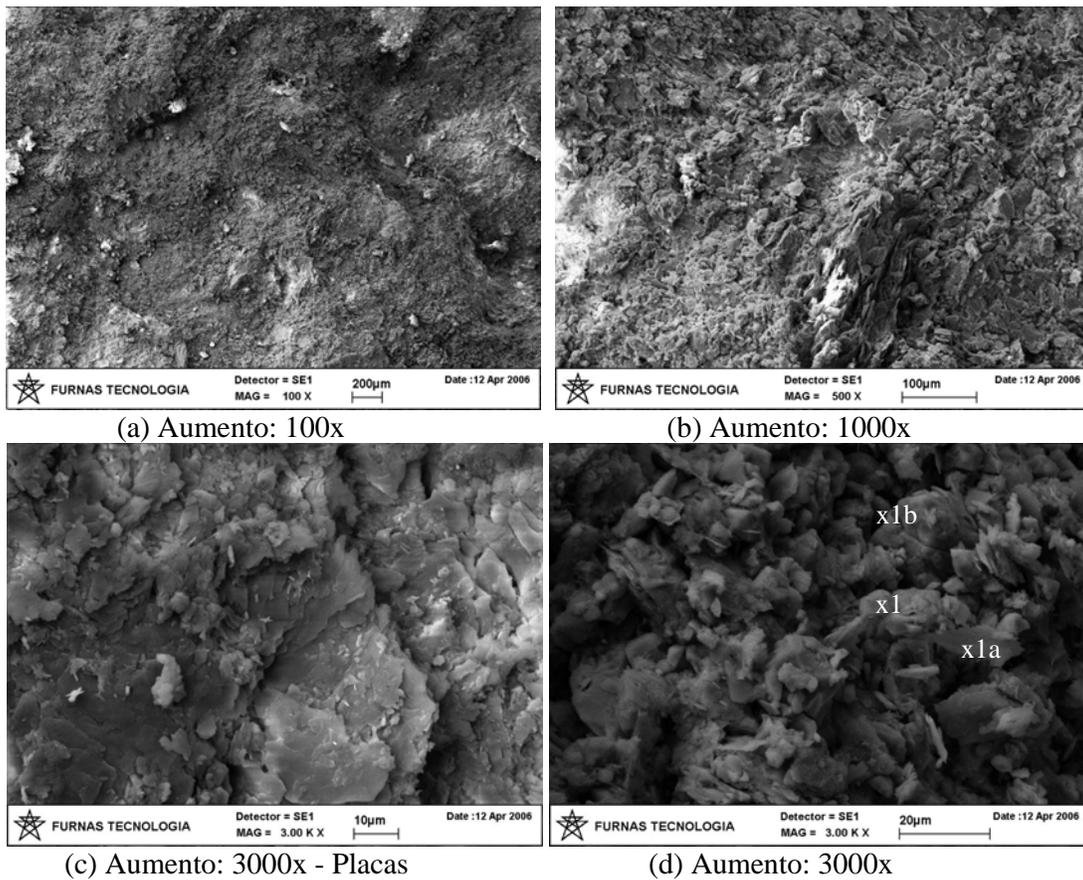
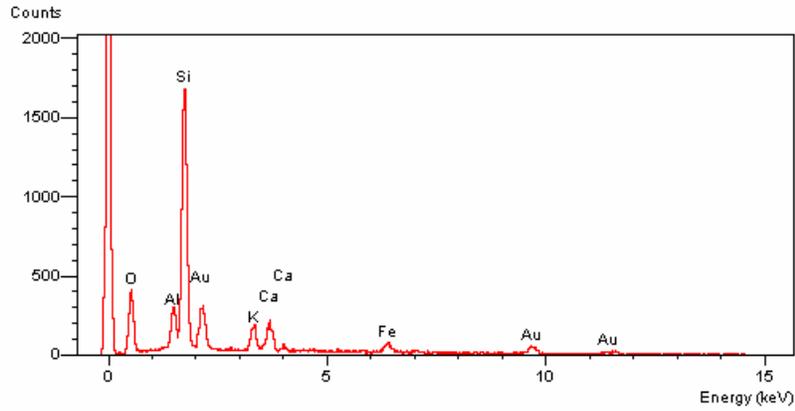
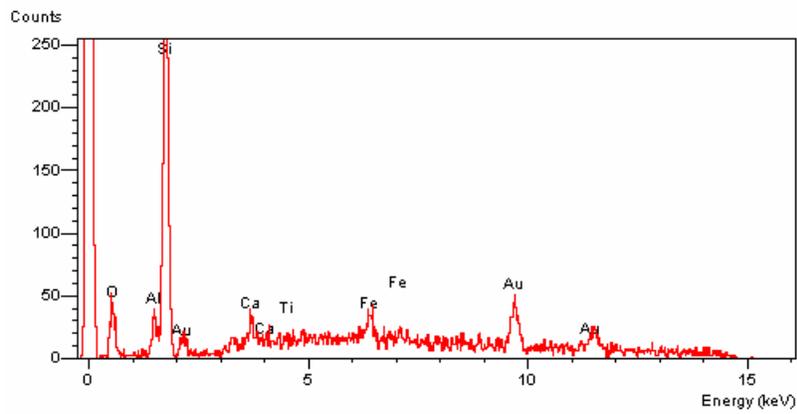


Figura 5.54 - Microscopia de Varredura do Solo SF2 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.



(a) Microanálise 1 – Parte Pulverulenta.



(b) Microanálise 2 - Cristal de quartzo.

Figura 5.55 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo SF2 Estabilizado.

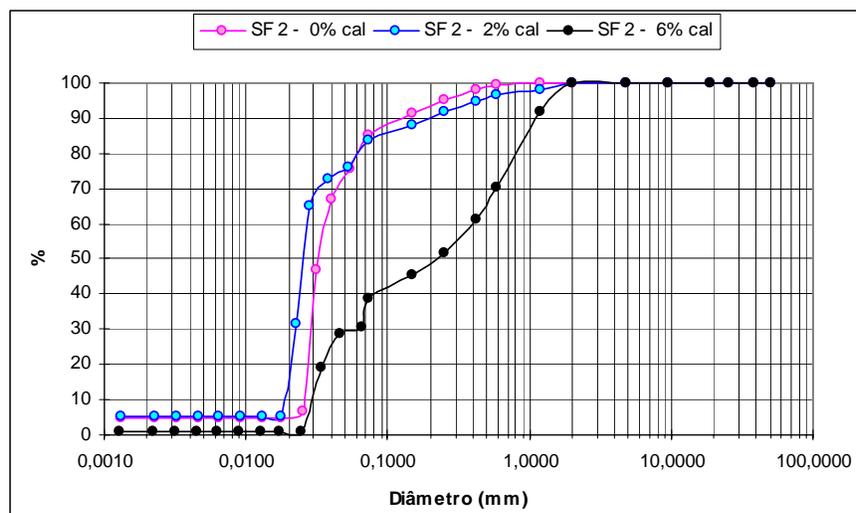


Figura 5.56 – Curvas Granulométricas do Solo SF2.

De acordo com Cardoso (2002), no solo SF4 (Figura 5.57) natural não há formação de agregados de argila. No entanto, há formação de microagregados, constituídos por grânulos com forma esferoidal, lisos a pouco rugosos e orientação inexistente. Os nódulos, resultantes do preenchimento por hematita de vazios, são típicos, com forma angulosa, isotrópicos e com ausência de fraturamentos. Os grãos de quartzo são muito finos e formam aproximadamente 30% do total da amostra. Em geral são arredondados, lisos e apresentam orientação segundo a clivagem ardosiana e ainda, estes não mostram fraturamentos e corrosão. Os vazios não atingem 10% do total da lâmina, onde na grande maioria são do tipo planar e acompanham as foliações.

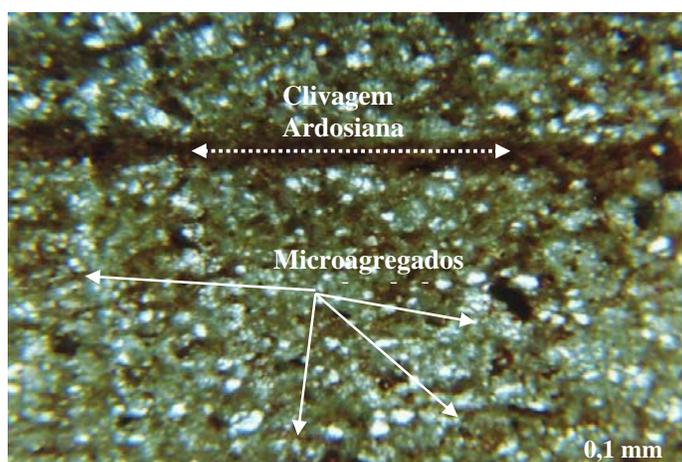


Figura 5.57 - Fotomicrografia do Solo SF4 referente à LD com Corte Perpendicular à Clivagem Ardosiana - Aumento: 90x.  
Cardoso, (2002).

A Figura 5.58 mostra o predomínio de uma estrutura composta por micro agregados, quando da compactação. Para ampliação de até 1000 vezes (Figura 5.58(b)) verifica-se uma estrutura mais fechada, tendendo a homogeneidade apesar de serem visíveis pequenos grumos e certa presença de macroporos (Figura 5.58). Ao se incorporar a cal (Figura 5.60(a)) observa-se que aparentemente a textura gerada é similar à apresentada pelo solo natural compactado, destacando-se, no entanto, certa tendência à orientação das partículas (Figura 5.60(c), 5.60(d)). Tal característica pode indicar uma desagregação e reorientação das partículas, uma vez que a incorporação de 6% de cal neste solo em específico, gerou um pequeno aumento no peso específico seco máximo, o que sugere redução de vazios. Segundo as curvas granulométricas mostradas na Figura 5.62 a cal praticamente não altera a textura do solo por meio de agregações ou desagregações.

As Figuras 5.59 e 5.61 apresentam respectivamente os espectros de raios-x das amostras natural e estabilizada com 6% de cal. Estas análises foram realizadas em diferentes pontos da estrutura do solo. Com base nestas figuras, verifica-se a presença no material natural de Al, Si, K, Fe e ainda de Ti (Figura 5.59(b)). Ao incorporar a cal hidratada aparecem o Na e o Ca, sendo que provavelmente o sódio já existia no solo e o cálcio é oriundo da cal. Para este solo supõe-se que o papel das reações químicas se localizem em patamar de interferência na estrutura inferior ao gerado pelo processo de compactação, ainda tendo-se que considerar que talvez o percentual de cal incorporado não tenha sido o ideal para que as reações ocorram na sua totalidade.

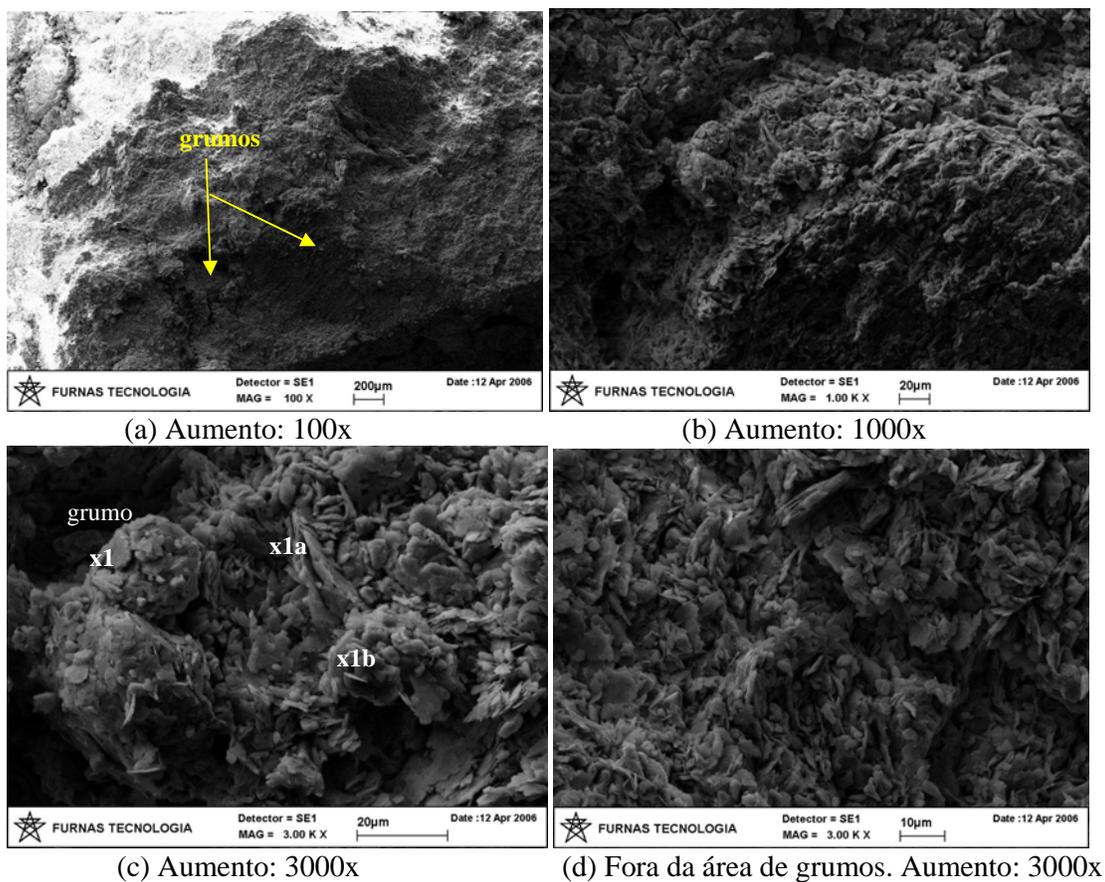
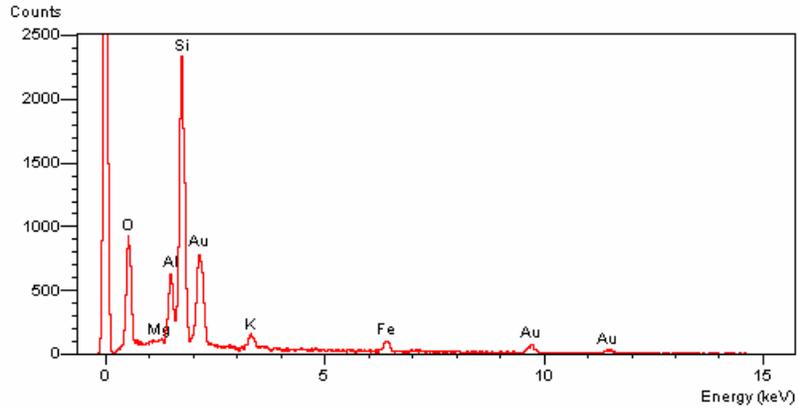
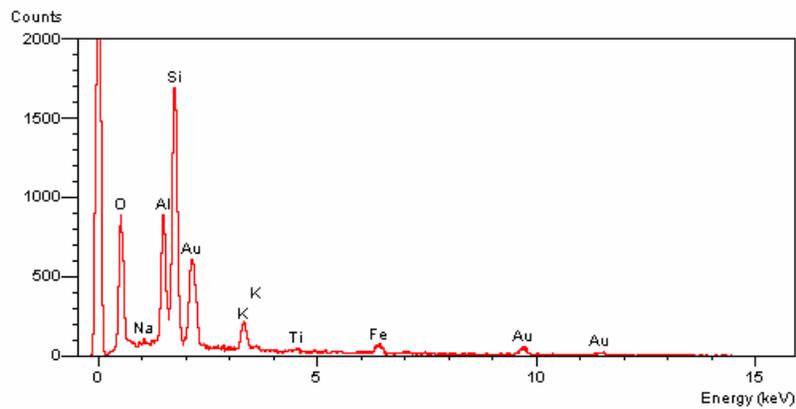


Figura 5.58 - Microscopia de Varredura do Solo SF4 Compactado na Energia PN.

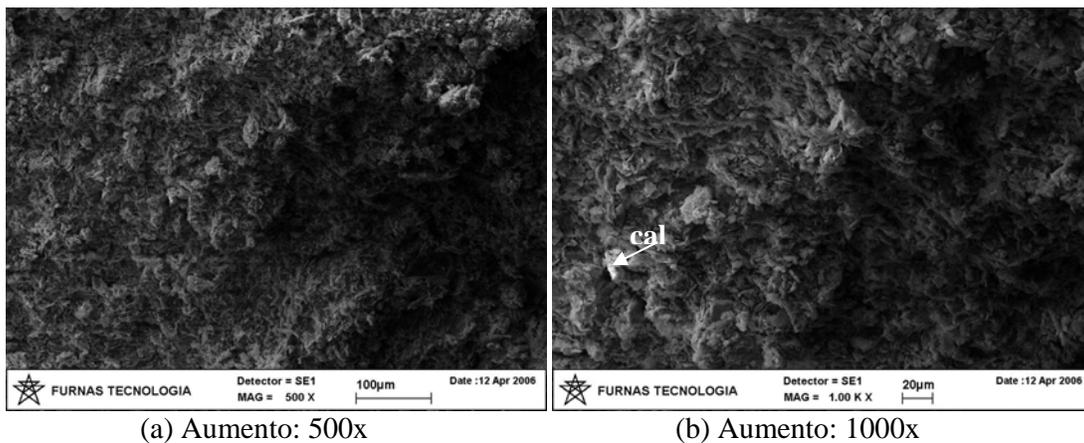


(a) Microanálise x1 - No grumo. Cristal de quartzo + argilomineral (provável illita)



(b) Microanálise x1b - Na palheta. Argilomineral (provável illita).

Figura 5.59 - Microanálise do Solo SF4 Compactado na Energia PN.



(a) Aumento: 500x

(b) Aumento: 1000x

Figura 5.60 - Microscopia de Varredura do Solo SF4 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.

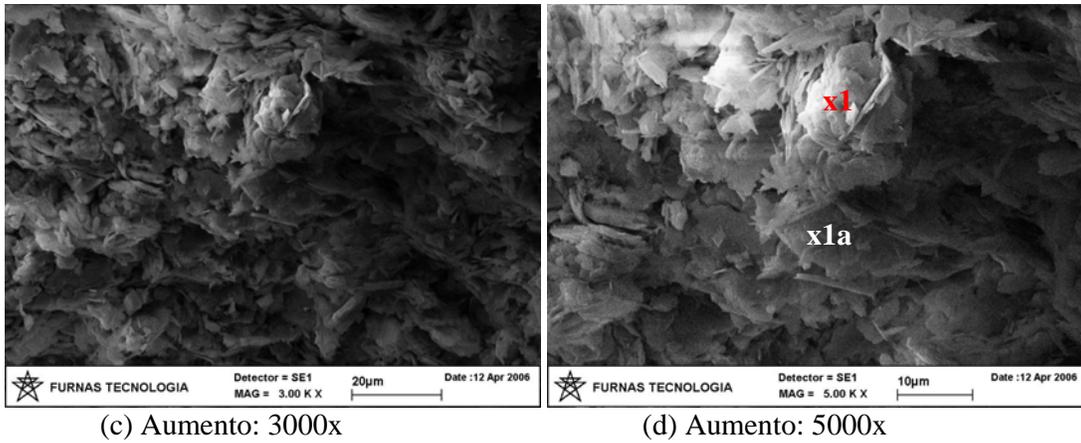
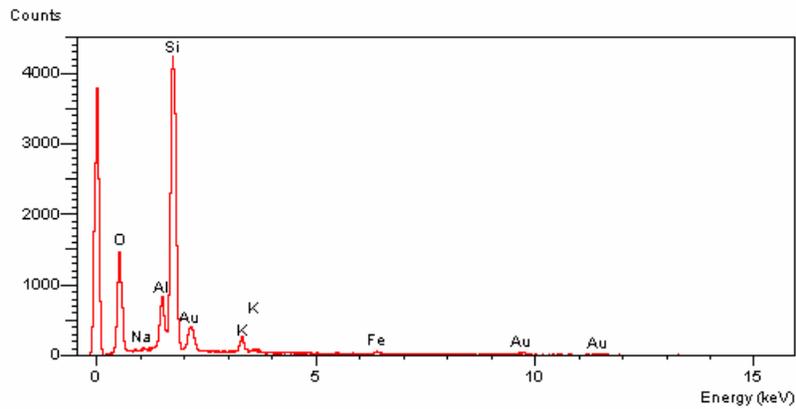
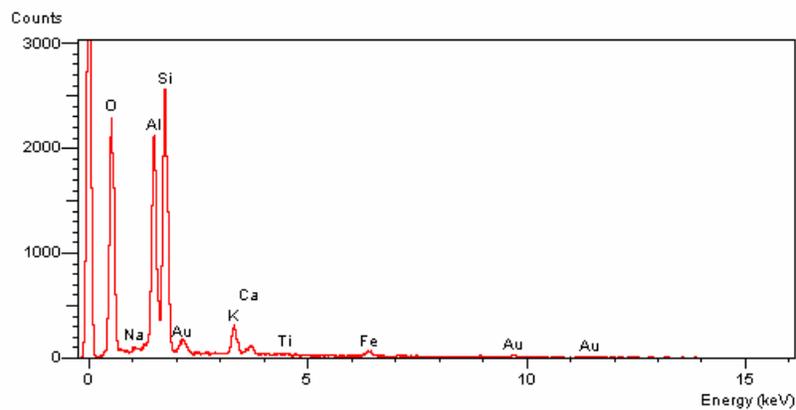


Figura 5.60 - Microscopia de Varredura do Solo SF4 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN - Continuação.



(a) Microanálise x1- No grumo. Cristal de quartzo + argilomineral (provável illita).



(b) Microanálise x1a - No grumo. Argilomineral (provável illita e caulinita).

Figura 5.61 - Microanálise do Solo SF4 Estabilizado e Compactado na Energia PN.

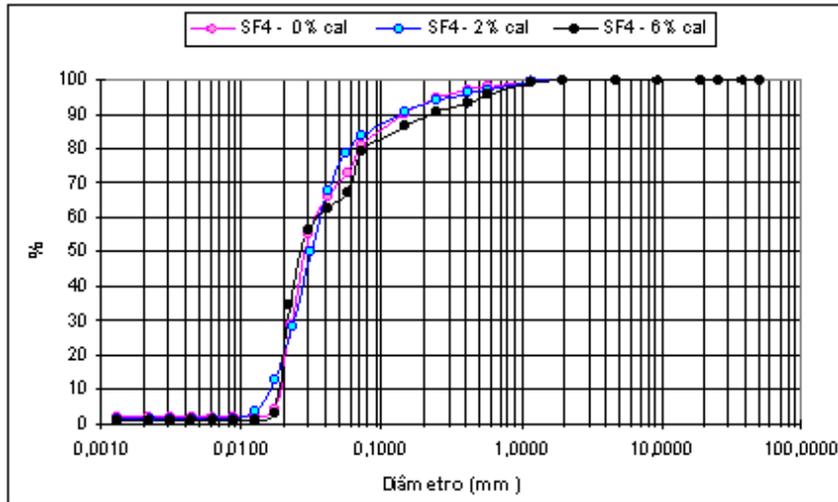


Figura 5.62 – Curvas Granulométricas do Solo SF4.

De acordo com Cardoso (2002), o solo SF8 (Figura 5.63) apresenta raríssimos microagregados esferoidais de argila. Os nódulos existentes são resultantes do preenchimento por hematita de vazios dos solos. Estes possuem forma subangular, são isotrópicos e, ausentes de fraturamento ou alguma orientação, não representando 1% do total da amostra.

Os grãos de quartzo formam a grande maioria do material sólido ( $\pm 65\%$  do total do solo). São subangulosos a raramente subarredondados, lisos e não apresentam orientação e sinais de corrosão, porém alguns são fraturados. Os contatos são realizados por meio de pontes e filmes de argila, mas os grãos de quartzo também podem estar englobados pelo plasma. Os vazios estão em torno de 25%, não apresenta foliações o que confirma a homogeneidade do solo.

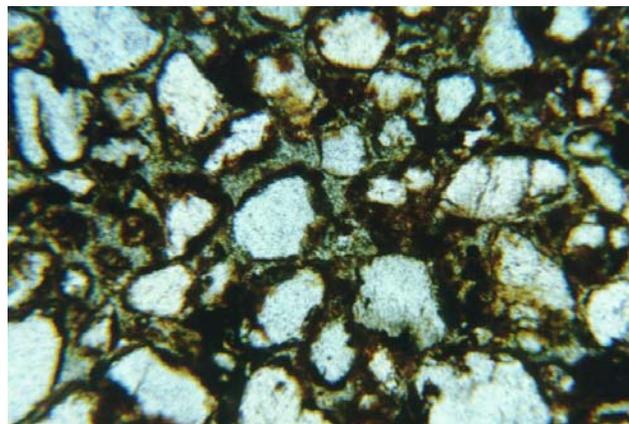


Figura 5.63 - Microfotografias do Solo SF8 em Estado Natural (Indeformado). Cardoso, (2002).

O processo de compactação dinâmica aparentemente não gera uma nova reorganização estrutural do solo mesmo para o material com incorporação de 6% de cal hidratada (Figura 5.64(a) e 5.66(a)), o que já era esperado devido à textura arenosa do solo, não tendo sido observada qualquer alteração granulométrica (Figura 5.68). No entanto, comparando-se as Figuras 5.66(d) e 5.66(d) percebe-se a nítida diferença proporcionada pela cal no material de cobertura dos grãos de quartzo.

As Figuras 5.65 e 5.67 apresentam respectivamente os espectros de raios-x das amostras natural e estabilizada com 6% de cal hidratada. Com base nestas figuras, verifica-se a presença de O, Si, Al, C, K e Fe, muito embora os picos destas últimas três ocorrências não se apresentem significativos. Ao proceder a incorporação da cal hidratada, verifica-se a ocorrência do Ca e Ti, o Ca proveniente da cal hidratada e o Ti provavelmente já existente no solo.

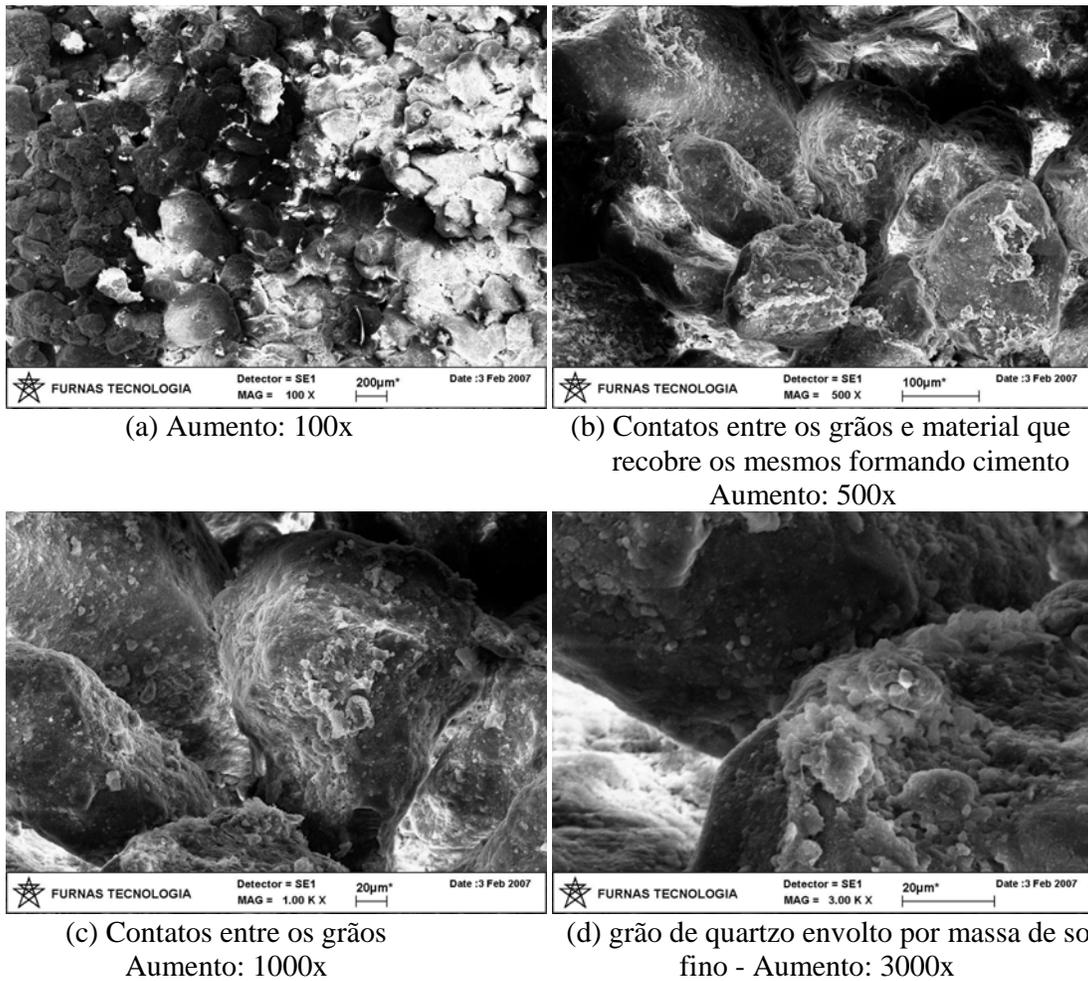
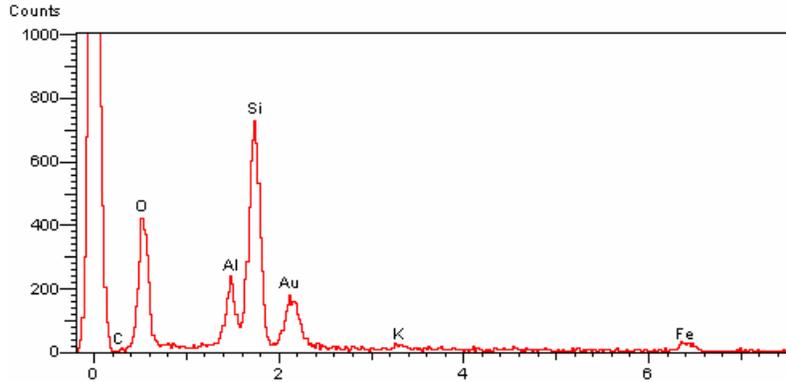
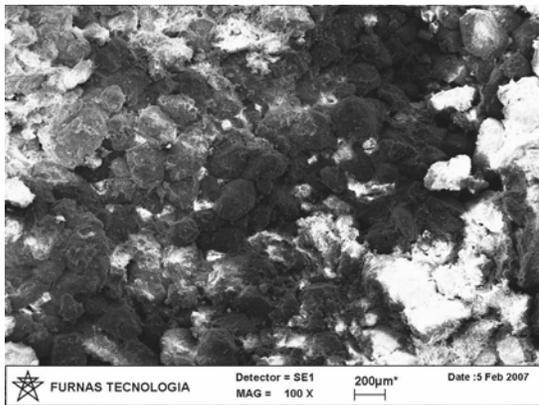


Figura 5.64 - Microscopia de Varredura do Solo SF8 Compactado na Energia PN.

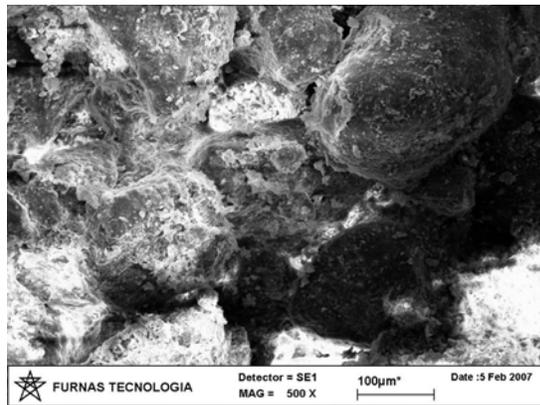


(a) Microanálise x1 – No grão de quartzo recoberto por possível illita

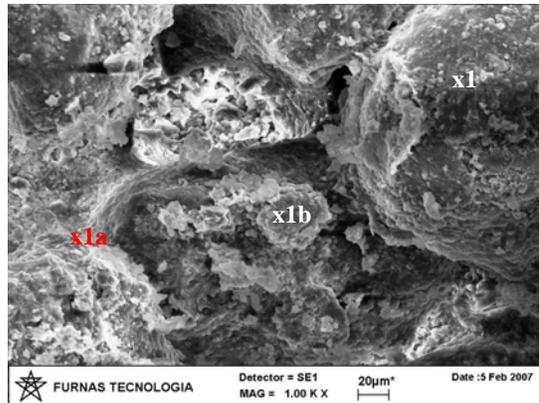
Figura 5.65 – Microanálise na Estrutura do Solo SF8.



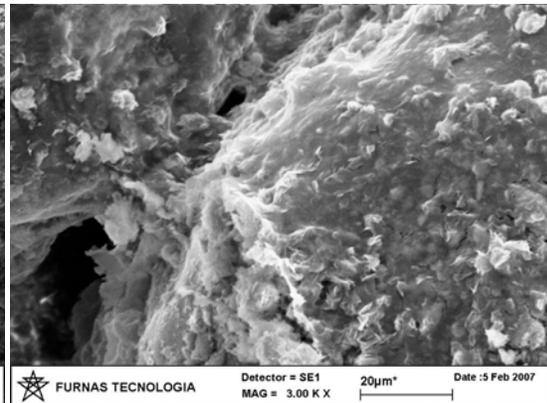
(a) Aumento: 100x



(b) Material granular, subarredondado e com material mais fino recobrimdo-o  
Aumento: 500x

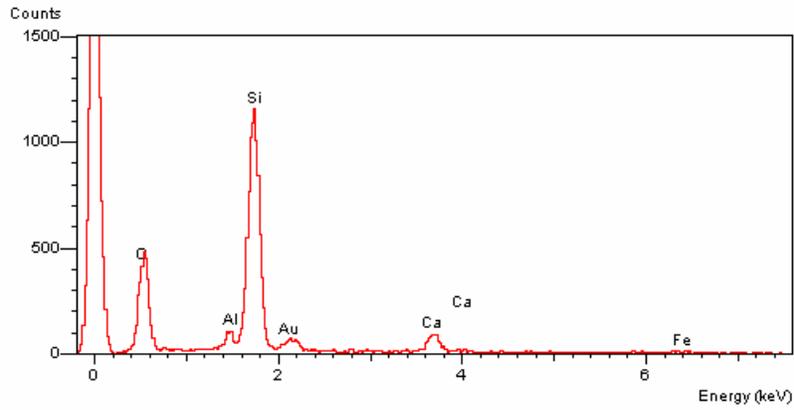


(c) Detalhe dos contatos entre os grãos  
Aumento: 1000x

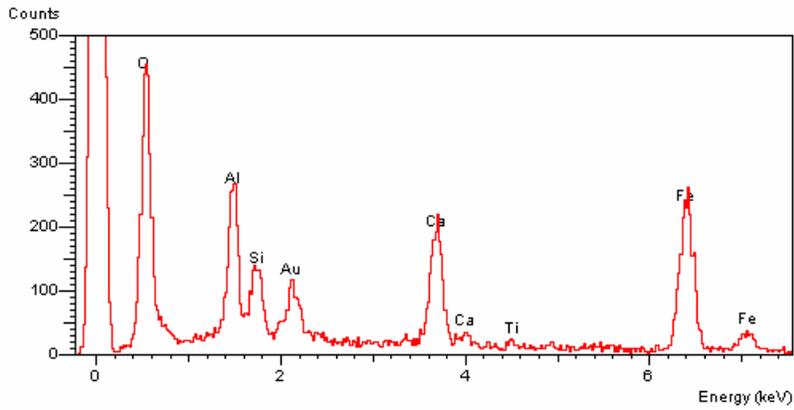


(d) Detalhe dos contatos entre os grãos  
Aumento: 3000x

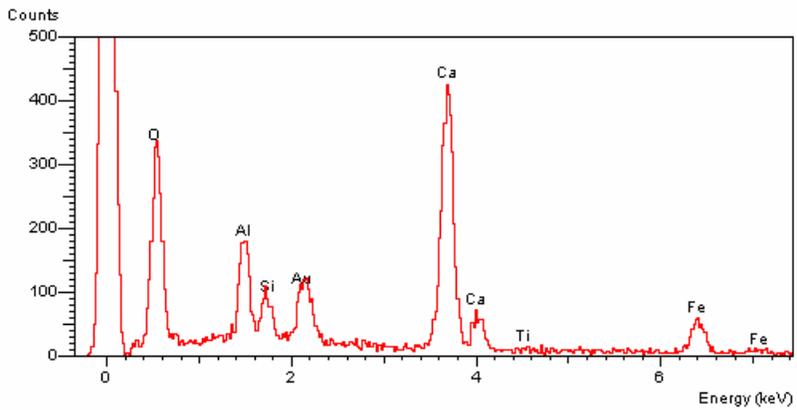
Figura 5.66 - Microscopia de Varredura do Solo SF8 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.



(a) Microanálise x1 – Grão de quartzo



(b) Microanálise x1a – Massa de solo mais fina. Prováveis hidróxido de cálcio+caulinita.



(c) Microanálise x1b – Massa de solo mais fina. Prováveis hidróxido de cálcio+caulinita.

Figura 5.67 – Microanálise em Pontos Distintos da Estrutura do Solo SF8 Estabilizado.

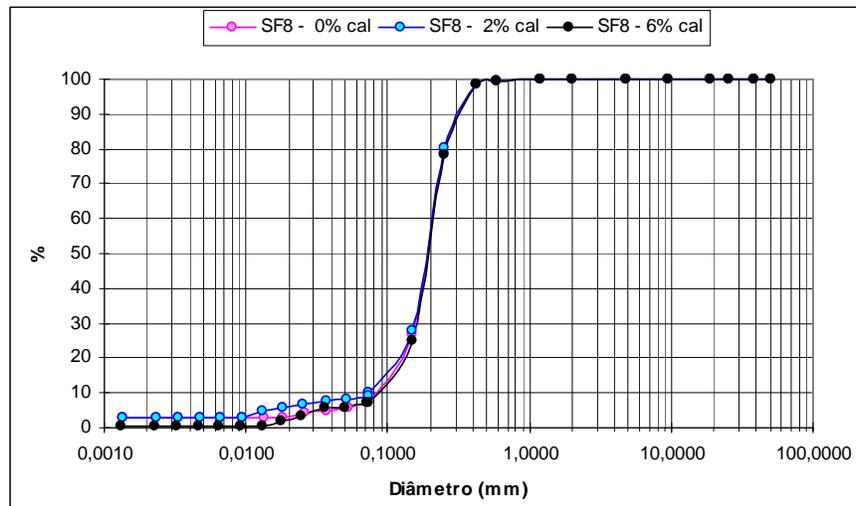


Figura 5.68 – Curvas Granulométricas do Solo SF8.

De acordo com Cardoso (2002), o solo SF13 não forma agregados de argila (Figura 5.69). Os nódulos, resultantes do preenchimento por hematita de vazios e principalmente espaços entre as foliações, são típicos com forma angulosa a arredondada, isotrópicos e com ausência de fraturamentos. Estes representam menos de 3% do total da amostra. Os grãos de quartzo são muito finos e formam aproximadamente 20% do total da amostra, sendo em geral arredondados e lisos, não apresentando fraturamentos e corrosão. Os vazios não chegam a 10% do total da lâmina, onde na grande maioria acompanham as foliações, as quais, às vezes, são preenchidas por hematita muito fina. Cavidades de até 0,03 mm são raramente encontradas. Existem foliações em forma fechada (xistosidades), em distintas direções, onde duas delas são as mais proeminentes e orientam a grande maioria dos minerais.

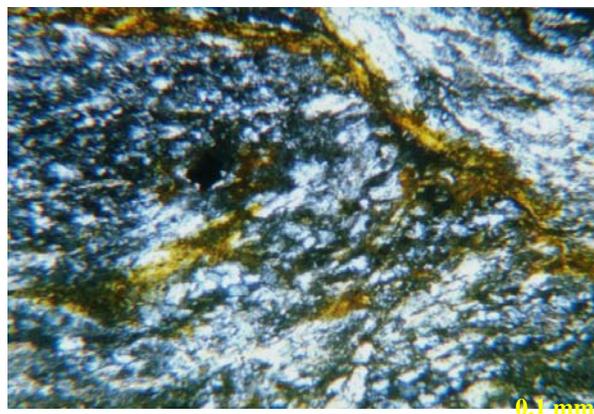


Figura 5.69 – Microscopia do Solo SF13 no Estado Indeformado, mostrando os Minerais Orientados Segundo as Foliações - Aumento: 90x. Cardoso, (2002).

A Figura 5.70 mostra o predomínio de uma estrutura composta por microagregados, muito embora sejam também notáveis algumas macroagregações. Para ampliação de 3000 vezes (Figura 5.70(d)) verifica-se certo empilhamento entre as placas de argilominerais e ainda os vazios existentes entre os agregados. Ao se incorporar a cal (Figura 5.72(a)) observa-se que aparentemente a estrutura gerada é mais fechada que a apresentada pelo solo natural compactado, característica esta confirmada ao se ampliar a imagem em 1000x e 3000x (Figuras 5.72(c), 5.72(d)). Tal característica pode indicar certa desagregação seguida de agregação e posterior reorientação das partículas durante o processo de compactação. A Figura 5.74 mostra que, granulometricamente, o solo sofre pequena desagregação com a incorporação de 2% de cal e ligeira agregação ao se incorporar 6% de cal.

As Figuras 5.71 e 5.73 apresentam os espectros de raios-x das amostras natural e estabilizada com 6% de cal. Com base nestas figuras, verifica-se a presença no material natural, de O, Al, Si, K e Fe, muito embora os picos dos dois últimos sejam pouco significativos. Ao incorporar a cal hidratada (Figura 5.73), tem-se o aparecimento do Ca.

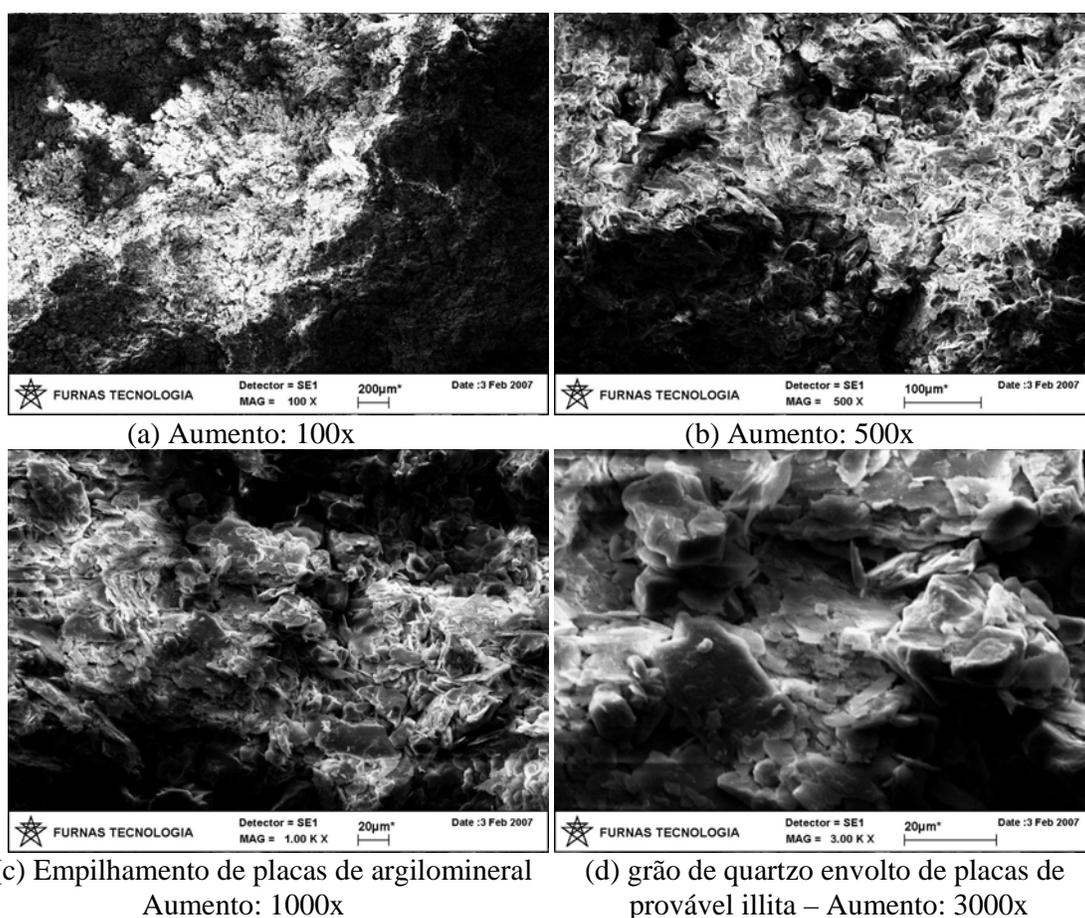
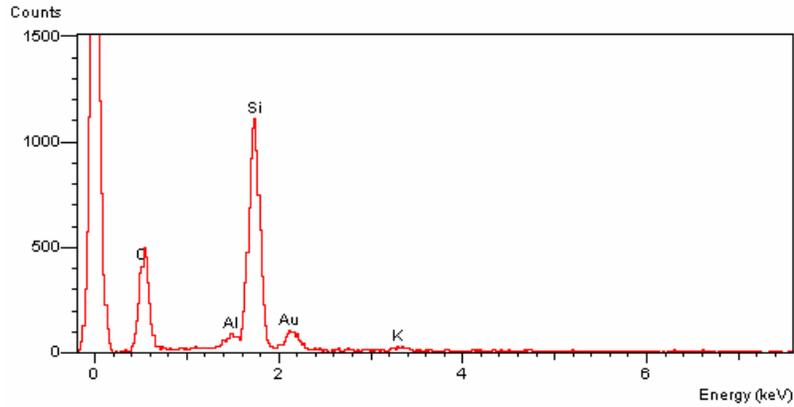
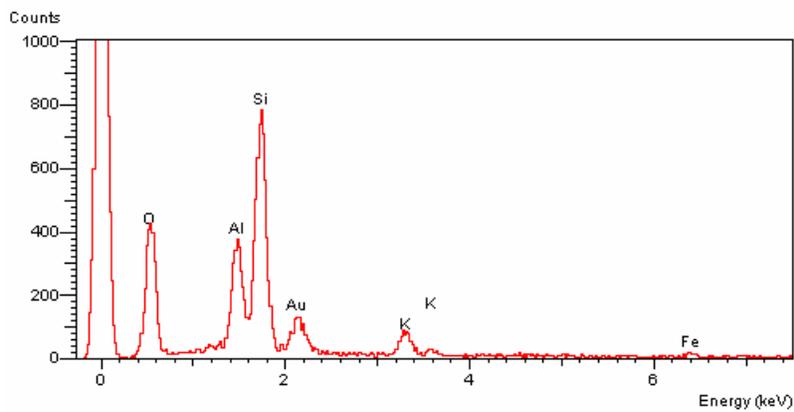


Figura 5.70 - Microscopia de Varredura do Solo SF13 Compactado na Energia PN.

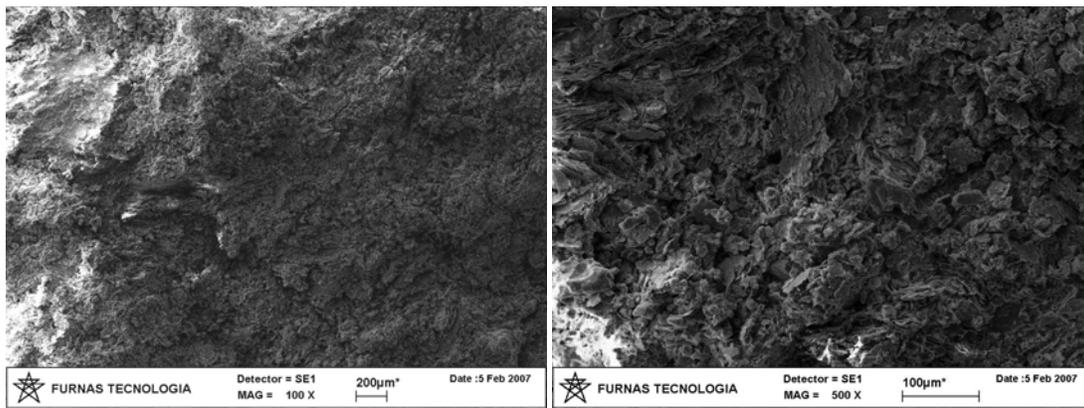


(a) Microanálise x1 - No grão de quartzo recoberto por possível illita.



(b) Microanálise x1b - Na placa da possível illita.

Figura 5.71 - Microanálise do Solo SF13 Compactado na Energia PN.



(a) Aumento: 100x

(b) Aumento: 500x

Figura 5.72 - Microscopia de Varredura do Solo SF13 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN.

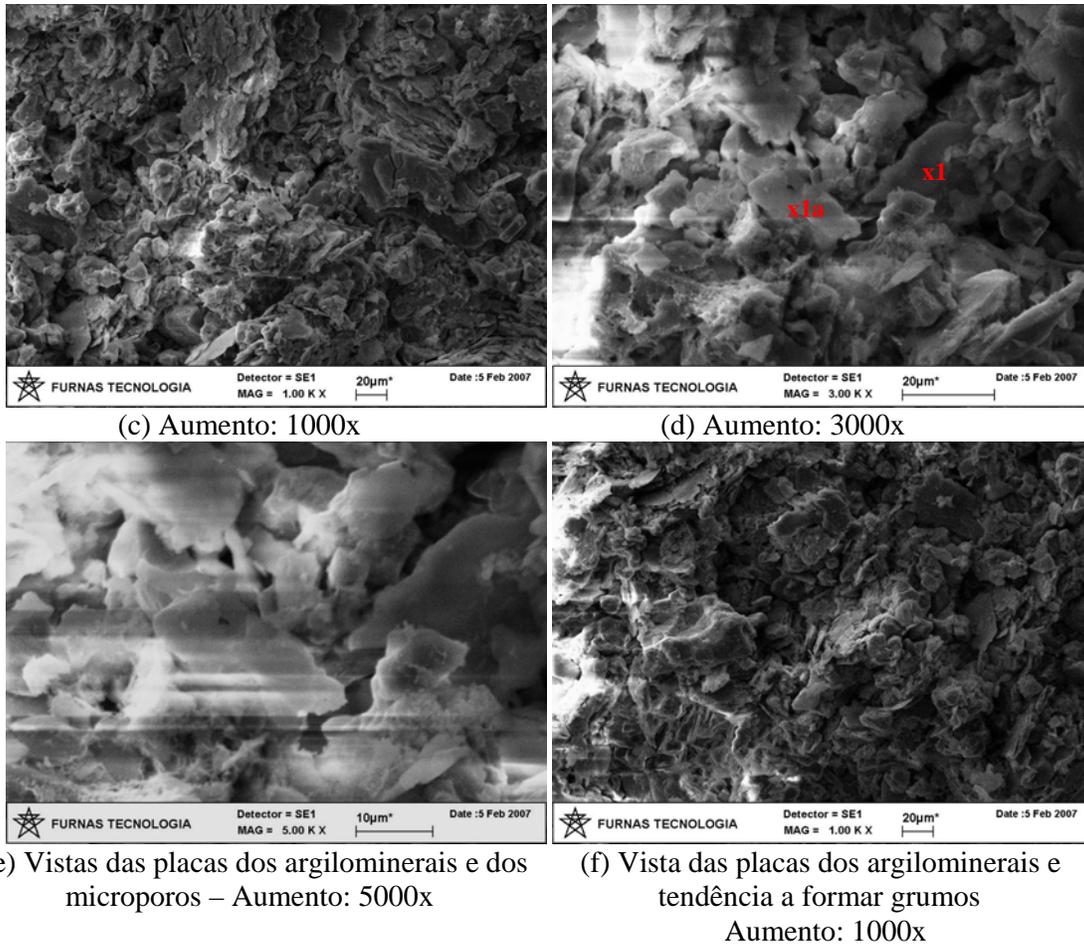
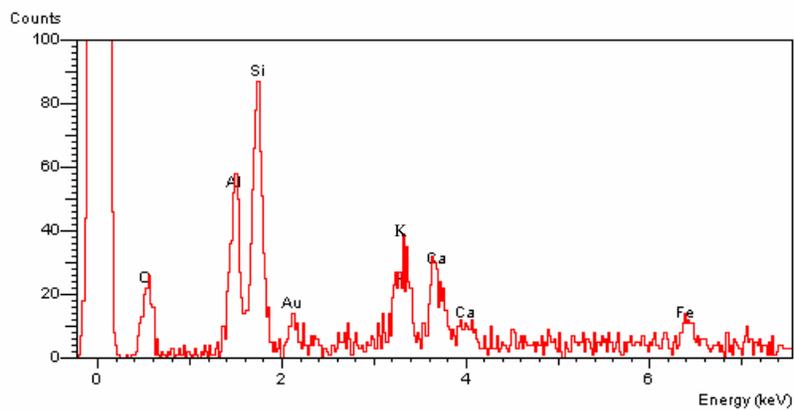
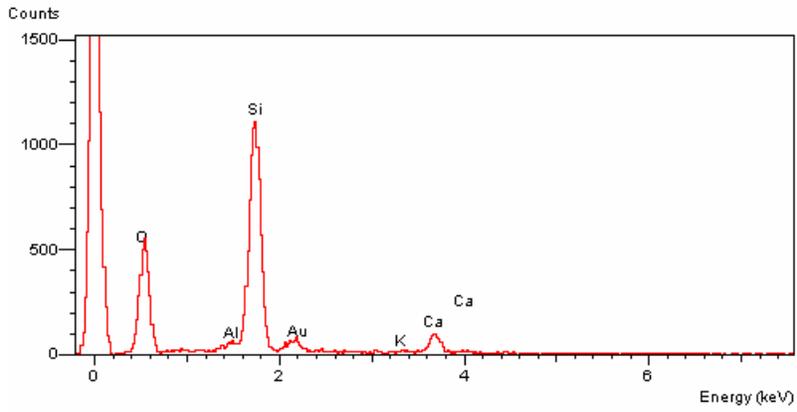


Figura 5.72 - Microscopia de Varredura do Solo SF13 Estabilizado com 6% de Cal Hidratada e Compactado na Energia PN - Continuação.



(a) Microanálise x1 - Na placa do argilomineral.

Figura 5.73 - Microanálise do Solo SF13 Estabilizado e Compactado na Energia PN.



(b) Microanálise x1a - No grão de quartzo.

Figura 5.73 - Microanálise do Solo SF13 Estabilizado e Compactado na Energia PN – Continuação.

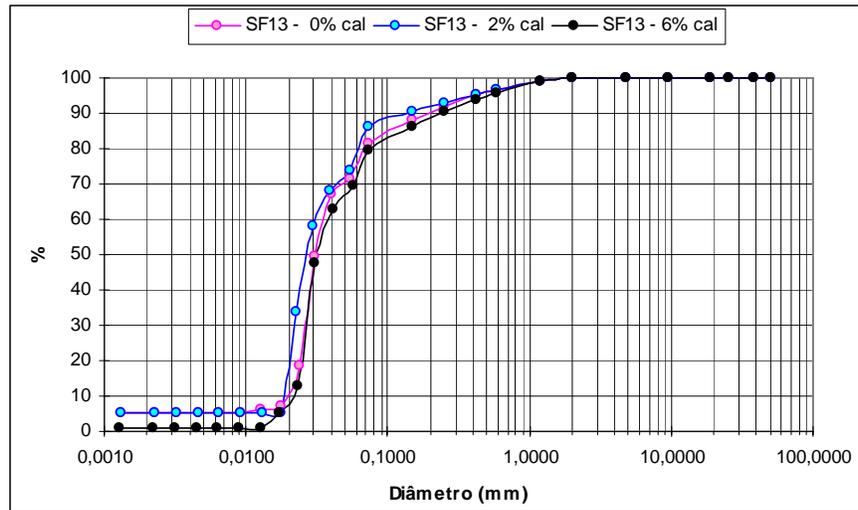


Figura 5.74 – Curvas Granulométricas do Solo SF13.

## 6 – CURVAS DE COMPACTAÇÃO

Foram realizados ensaios de Mini-Compactação (DNER-ME 254/94) nas energias Proctor normal (P.N.) e Proctor intermediária (P.I.), tendo-se por finalidade a determinação das curvas de compactação (anexo II) representativas de todos os materiais estudados. A obtenção das curvas de compactação apresentou-se essencial no desenvolvimento dos estudos posteriormente realizados. Estes ensaios foram realizados para as amostras naturais (0% cal) e, com cal incorporada nos teores de 2%, 4% e 6%. Para os solos denominados SF2, SF4, HB10 foram ainda trabalhadas amostras com 8% e 10% de cal incorporada.

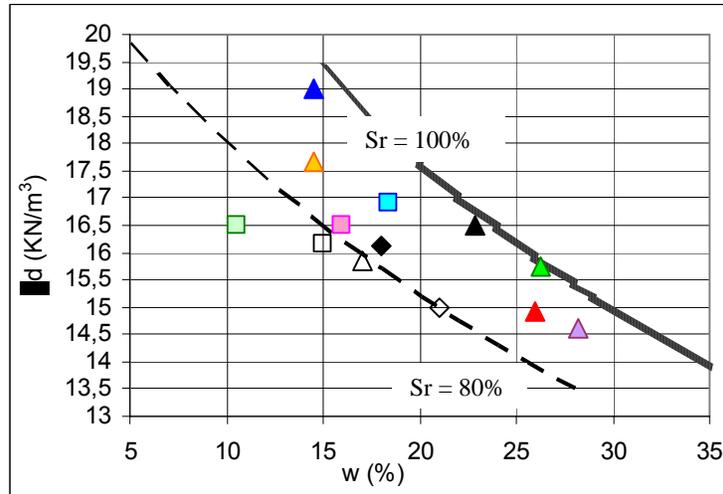
As curvas de compactação mostradas no anexo II mostram que, de modo geral, os solos menos intemperizados apresentam curvas mais achatadas que os intemperizados. Cabendo destacar que geralmente solos com curvas mais achatadas permitem a adoção de faixas de umidade mais amplas na compactação de campo.

As Figuras 6.1(a) e 6.1(b) apresentam os resultados de  $w_{ót}$  e  $\gamma_{dmáx}$  com 0% de cal incorporada para o conjunto de solos estudados. De maneira geral constata-se que os parâmetros de mini-compactação obtidos para os solos HB apresentam valores superiores de  $w_{ót}$  em relação aos horizontes ZM e SF, se considerado o mesmo peso específico aparente seco. Aparentemente este comportamento se encontra ligado ao teor de argila presente nos materiais (Figura 4.3 e Tabela 6.1), o que justificaria estes se apresentarem mais próximos à linha de saturação total ( $S_r=100\%$ ). A Figura 6.1(a) mostra resultados de  $w_{ót}$  próximas para os maiores teores de argila apresentados na Tabela 4.3, o que se verifica para todos os horizontes. No entanto, na energia intermediária (Figura 6.1(b)) ocorre um distanciamento do solo HB7, o que pode ter sido ocasionado pela desestruturação mais efetiva quando do aumento da energia de compactação. Observa-se ainda que os solos ZM e SF apresentam saturação inferior, se localizando mais próximos da curva de saturação  $S_r = 80\%$ .

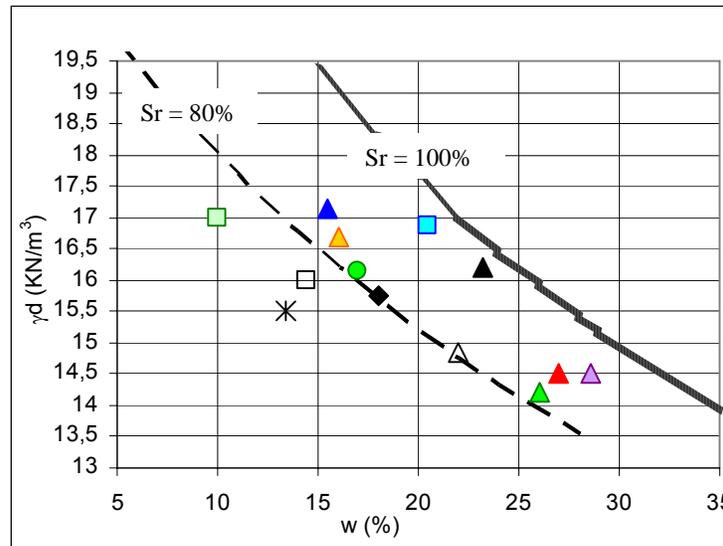
É importante ressaltar que as curvas de saturação apresentadas nas Figuras 6.1(a) e 6.1(b) representam uma curva média. Optou-se por tal consideração, uma vez que as curvas de saturação obtidas para cada tipo de solo não diferem significativamente, portanto, tornando válidas análises a partir de curvas de saturação médias.

Observa-se que os solos HB9b e HB7, de maiores percentuais de argila, igual a 73,6% e 47%, respectivamente, apresentam os valores mais elevados de  $w_{ót}$  dentre todos os tipos de solos estudados. No entanto, para teor de argila aproximadamente igual e inferior a 40% , este comportamento não se mantém. Comportamento este que também não se verifica na energia

P.I. Constata-se, portanto, que não é apenas a textura que condiciona o comportamento desses materiais. Há outros fatores, tais como o estado da mineralogia e forma de organização que interferem nesse comportamento mecânico.



(a) P.N.- 0% cal



(b) P.I. - 0% cal

| LEGENDA |     |   |     |   |      |   |      |
|---------|-----|---|-----|---|------|---|------|
| △       | HB7 | ▲ | HB9 | ▲ | HB10 | ▲ | HB11 |
| ◇       | ZM3 | ◆ | ZM6 | ▲ | HB12 | ▲ | HBR1 |
| □       | SF2 | ■ | SF4 | ■ | SF8  | ■ | SF13 |
|         |     |   |     |   |      |   | ▲    |
|         |     |   |     |   |      |   | HBR2 |

Figura 6.1 – Parâmetros de Mini-Compactação.

De forma a caracterizar o comportamento dos horizontes estudados quando da incorporação da cal, apresentar-se-á ainda os resultados ótimos obtidos para todos os solos

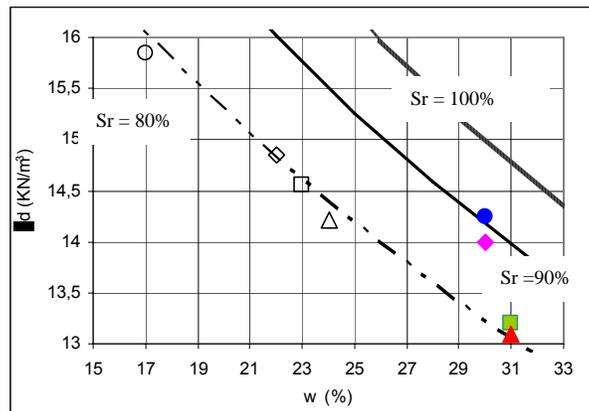
trabalhados. Neste contexto, as Figuras 6.2 a 6.14 apresentam os resultados de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e  $w\acute{o}t$  para todos os solos trabalhados representativos dos horizontes HB, ZM e SF, lembrando que as curvas de compactação destes solos se encontram no anexo II.

As Figuras citadas mostram que ao reagir com a cal os materiais apresentam comportamentos diferenciados em relação ao solo não tratado dentro de um mesmo horizonte de classificação e granulometrias similares. Tais comportamentos se encontram mais evidenciados na energia normal, onde aparentemente algumas características da estrutura original do solo foram preservadas devido à baixa desestruturação sofrida pelos materiais quando da compactação.

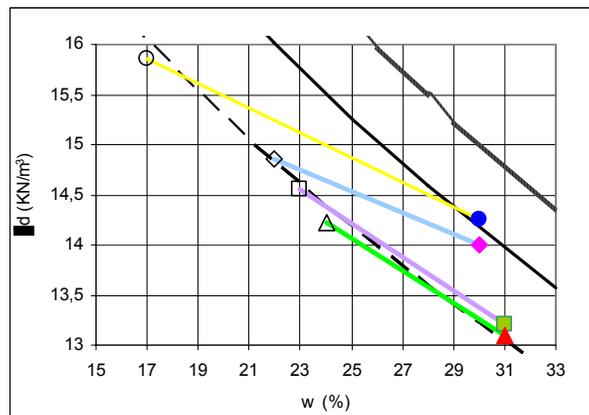
Em relação aos Latossolos (HB) (Figura 6.2 a 6.8) com a cal incorporada, de maneira geral e em relação ao solo natural, pode-se afirmar que, houve tendência a achatamento das curvas de compactação com decréscimo de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ), mas em relação à  $w\acute{o}t$  o comportamento de acréscimo de umidade ótima com a incorporação de cal, não é uma constante. As Figuras mostram a existência de 2 tendências comportamentais, com predominância à redução de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e acréscimo de  $w\acute{o}t$  com a incorporação da cal. Comportamento este verificado nas duas energias de compactação. Verifica-se que os solos HBR1 e HBR2 (Figuras 6.7(a) e 6.8(a)) apresentam comportamentos similares àqueles visualizados na energia intermediária, o que não condiz com os demais Latossolos, que em alguns casos apresentam decréscimos de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  sem modificação na  $w\acute{o}t$  e, em outros, decréscimos de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e da  $w\acute{o}t$ . No solo HB7 (Figura 6.2(a)), se verifica decréscimos de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  sem modificação na  $w\acute{o}t$ , para os valores de 0% e 2% ( $w\acute{o}t=30\%$ ) e ainda, para os teores de 4% e 6% ( $w\acute{o}t=31\%$ ). Tal comportamento é idêntico ao do solo HB11 (Figura 6.5(a)) para os teores de 0% e 2% ( $w\acute{o}t=17\%$ ) sendo que, com 4% e 6% de cal incorporada, ocorre acréscimo de  $w\acute{o}t$  e queda de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ . Por outro lado, o solo HB9b (Figura 6.3(a)) distingue-se por apresentar variações consideráveis em termos de decréscimo de  $w\acute{o}t$  com a incorporação de 2% de cal e, a partir daí manter este valor constante ( $w\acute{o}t=28\%$ ). Comportamento este diferenciado no solo HB10 (Figura 6.4(a)), uma vez que para este a  $w\acute{o}t$  praticamente não apresenta variação com a incorporação da cal, existindo variações consideráveis apenas em termos de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ , visualizadas entre o material sem cal ( $\gamma_{dm\acute{a}x} = 17,09 \text{ kgf/m}^2$ ) e os pontos com diferentes teores de cal incorporada (valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,14$  (2% a 8% de cal) a  $14,5 \text{ kgf/m}^2$  (10% de cal)). No solo HB12 (Figura 6.6(a)) observa-se comportamento atípico aos demais, uma vez que ao se incorporar cal (2%) a  $w\acute{o}t$  aumenta e o

$\gamma_{dm\acute{a}x}$  caem bruscamente para, a seguir ocorrer comportamento inverso ao se incorporar maiores percentuais.

Ao avaliar o comportamento destes materiais em relação à linha 3tima determinada para os materiais sem cal incorporada (Figuras 6.2(b) a 6.8(b)), observa-se ainda que, ocorre uma tend4ncia geral ao afastamento (com o teor de cal), cuja direção varia de acordo com as caracter3sticas de cada solo. A exceção a tal comportamento se faz notar apenas para o solo HB12 com 4% e 6% de cal incorporada.



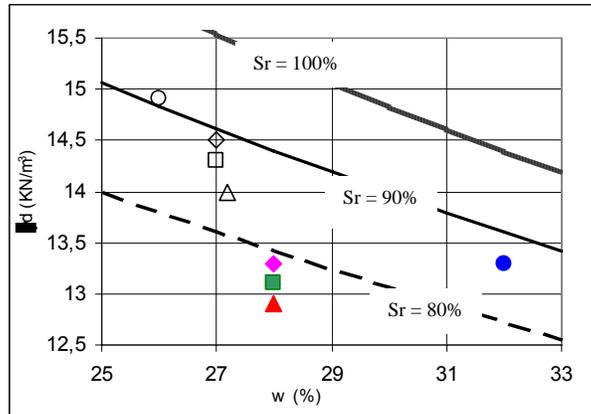
(a) Parâmetros de Mini-Compactação



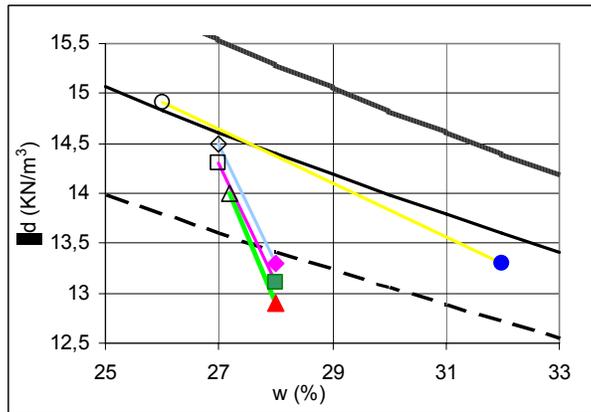
(b) Linhas 3timas

| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha 3tima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha 3tima - 2% de cal |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha 3tima - 4% de cal |
| ▲ 6% cal - P.N. | △ 6% cal - P.I. | — Linha 3tima - 6% de cal |

Figura 6.2 – Mini-Compactação do Solo HB7



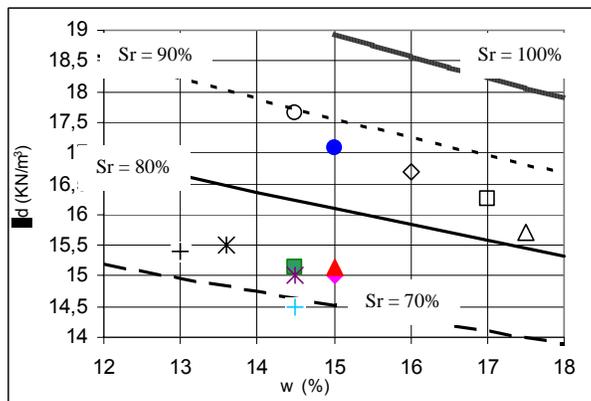
(a) Parâmetros de Mini-Compactação



(b) Linhas Ótimas

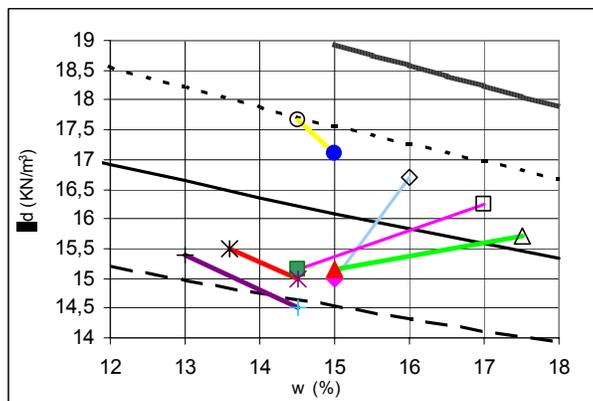
| LEGENDA   |                  |
|---|------------------|
| ● 0% cal - P.N.   | ○ 0% cal - P.I.  |
| ◆ 2% cal - P.N.   | ◇ 2% cal - P.I.  |
| ■ 4% cal - P.N.   | □ 4% cal - P.I.  |
| ▲ 6% cal - P.N.   | △ 6% cal - P.I.  |
| * 8% cal - P.N.   | * 8% cal - P.I.  |
| + 10% cal - P.N.  | + 10% cal - P.I. |
| — Linha ótima - 0% de cal<br>— Linha ótima - 2% de cal<br>— Linha ótima - 4% de cal<br>— Linha ótima - 6% de cal<br>— Linha ótima - 8% de cal<br>— Linha ótima - 10% de cal |                  |

Figura 6.3 – Mini-Compactação do Solo HB9b.



(a) Parâmetros de Mini-Compactação

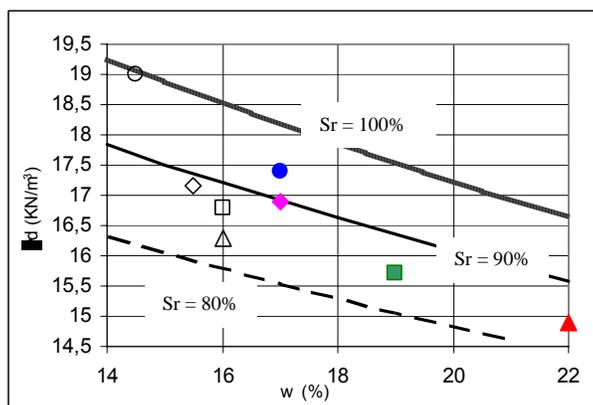
Figura 6.4 – Mini-Compactação do Solo HB10.



(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA          |                  |                            |  |  |  |
|------------------|------------------|----------------------------|--|--|--|
| ● 0% cal - P.N.  | ○ 0% cal - P.I.  | — Linha ótima - 0% de cal  |  |  |  |
| ◆ 2% cal - P.N.  | ◇ 2% cal - P.I.  | — Linha ótima - 2% de cal  |  |  |  |
| ■ 4% cal - P.N.  | □ 4% cal - P.I.  | — Linha ótima - 4% de cal  |  |  |  |
| ▲ 6% cal - P.N.  | △ 6% cal - P.I.  | — Linha ótima - 6% de cal  |  |  |  |
| * 8% cal - P.N.  | * 8% cal - P.I.  | — Linha ótima - 8% de cal  |  |  |  |
| + 10% cal - P.N. | + 10% cal - P.I. | — Linha ótima - 10% de cal |  |  |  |

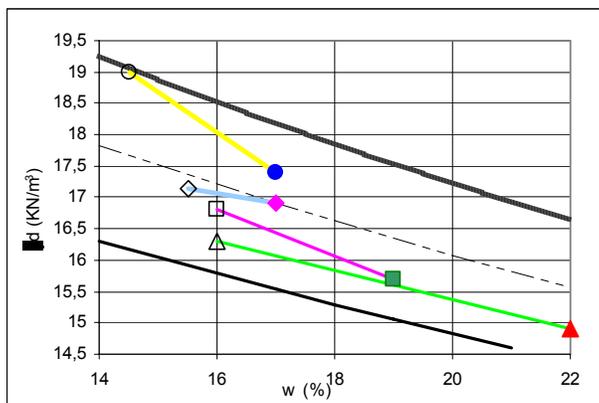
Figura 6.4 – Mini-Compactação do Solo HB10 - Continuação.



(a) Parâmetros de Mini-Compactação

| LEGENDA         |                 |                           |  |  |  |
|-----------------|-----------------|---------------------------|--|--|--|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |  |  |  |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |  |  |  |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |  |  |  |
| ▲ 6% cal - P.N. | △ 6% cal - P.I. | — Linha ótima - 6% de cal |  |  |  |

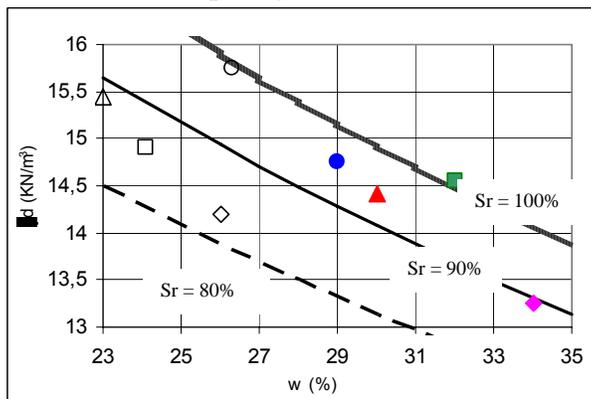
Figura 6.5 – Mini-Compactação do Solo HB11.



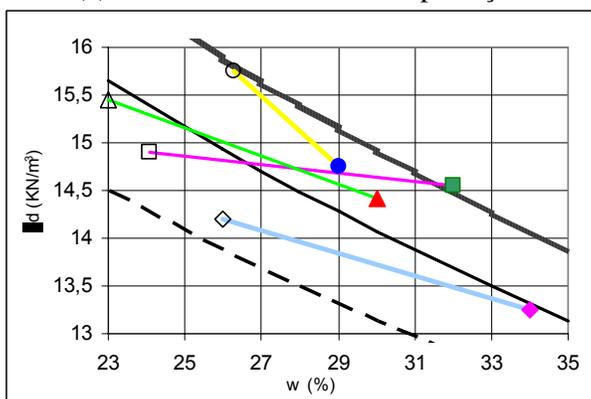
(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA         |                 |                           |  |  |  |
|-----------------|-----------------|---------------------------|--|--|--|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |  |  |  |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |  |  |  |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |  |  |  |
| ▲ 6% cal - P.N. | △ 6% cal - P.I. | — Linha ótima - 6% de cal |  |  |  |

Figura 6.5 – Mini-Compactação do Solo HB11 - Continuação.



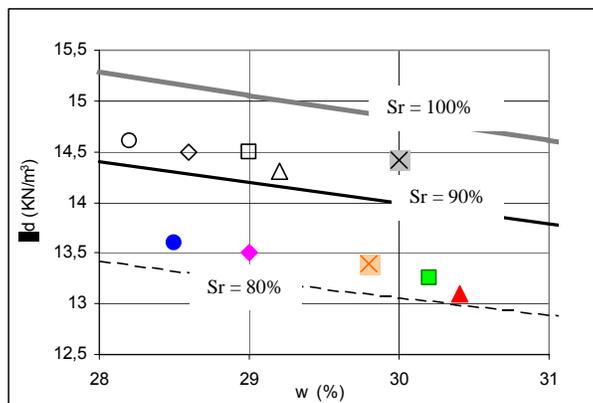
(a) Parâmetros de Mini-Compactação.



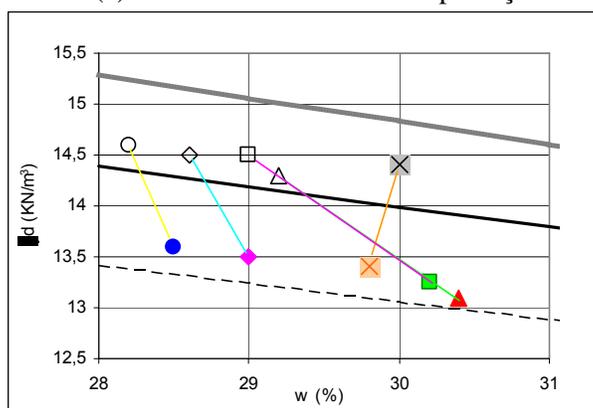
(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA         |                 |                           |  |  |  |
|-----------------|-----------------|---------------------------|--|--|--|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |  |  |  |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |  |  |  |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |  |  |  |
| ▲ 6% cal - P.N. | △ 6% cal - P.I. | — Linha ótima - 6% de cal |  |  |  |

Figura 6.6 – Mini-Compactação do Solo HB12.



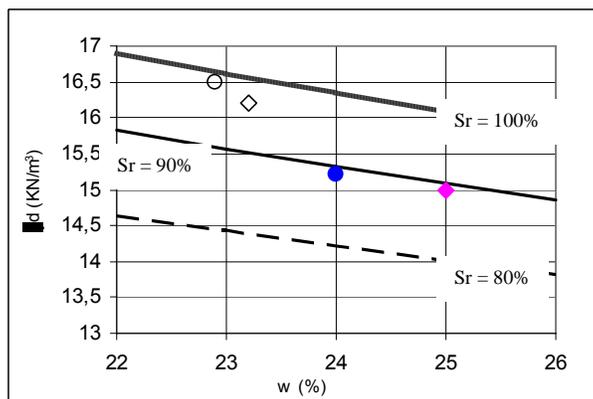
(a) Parâmetros de Mini-Compactação



(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |
| × 3% cal - P.N. | × 3% cal - P.I. | — Linha ótima - 3% de cal |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |
| ▲ 6% cal - P.N. | △ 6% cal - P.I. | — Linha ótima - 6% de cal |

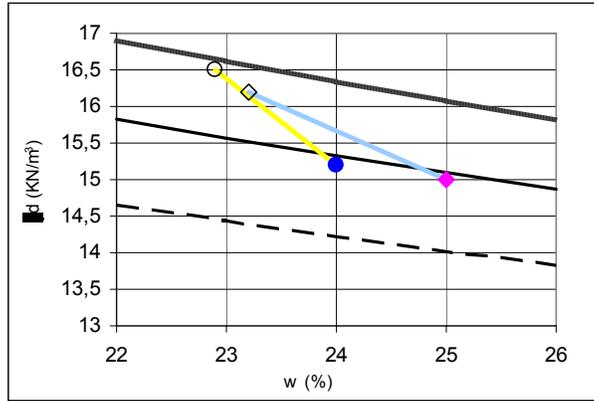
Figura 6.7 – Mini-Compactação do Solo HBR1.



(a) Parâmetros de Mini-Compactação.

| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |

Figura 6.8 – Mini-Compactação do Solo HBR2.

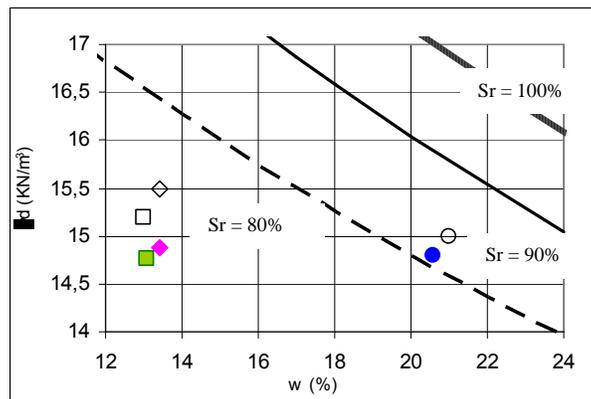


(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA         |                 |                           |  |
|-----------------|-----------------|---------------------------|--|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |  |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |  |

Figura 6.8 – Mini-Compactação do Solo HBR2 - Continuação.

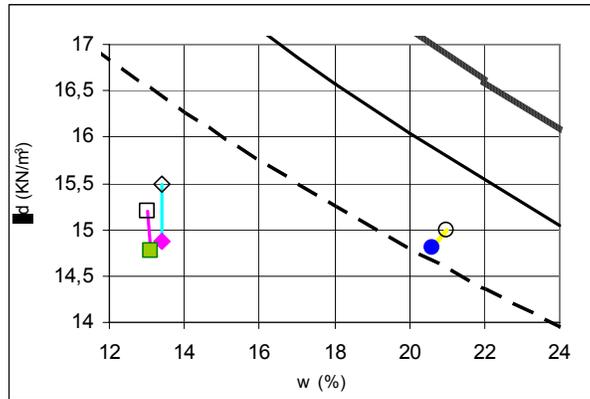
Na zona mosqueada (ZM) (Figuras 6.9 e 6.10) verificam-se comportamentos similares aos apresentados nos horizontes HB. O solo ZM3 aproxima-se do comportamento do HB9, na energia normal e, o solo ZM6 do comportamento do HB7 na energia intermediária. Uma importante observação é que de forma similar aos solos HB a incorporação da cal conduz a um afastamento da linha ótima obtida sem a cal incorporada. Nota-se ainda que ao contrário dos solos HB observa-se tendência similar dos pontos obtidos nos dois níveis de energia apresentarem a mesma distribuição, o que conduz à idéia da menor influência da agregação.



(a) Parâmetros de Mini-Compactação.

| LEGENDA         |                 |                           |  |
|-----------------|-----------------|---------------------------|--|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |  |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |  |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |  |

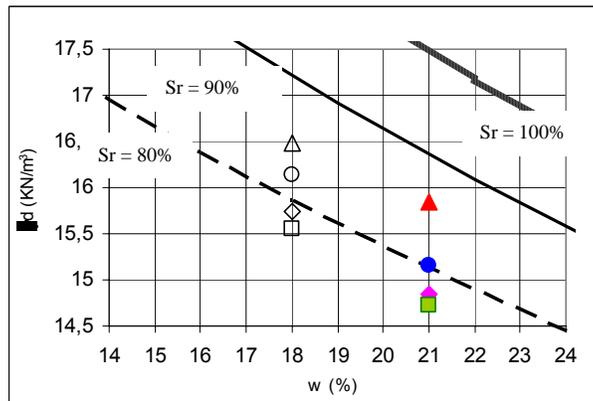
Figura 6.9 – Mini-Compactação do Solo ZM3.



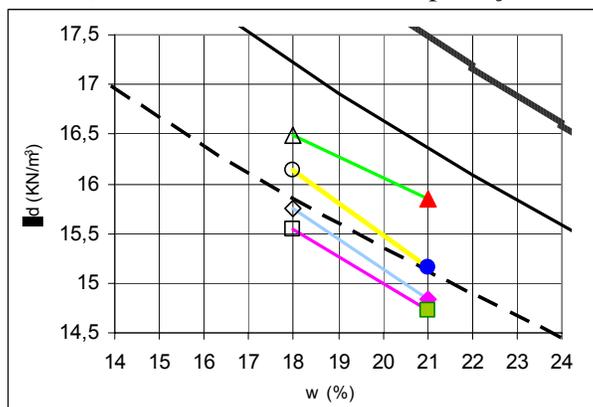
(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |

Figura 6.9 – Mini-Compactação do Solo ZM3 - Continuação.



(a) Parâmetros de Mini-Compactação

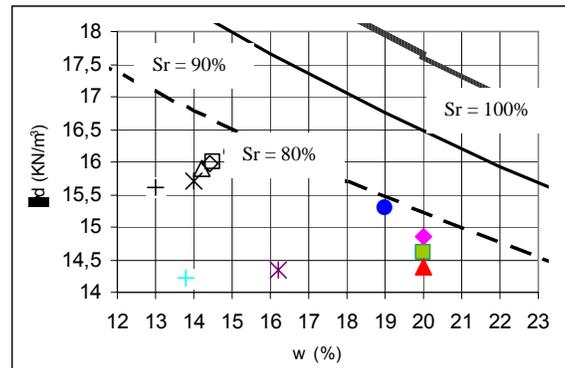


(b) Linhas Ótimas

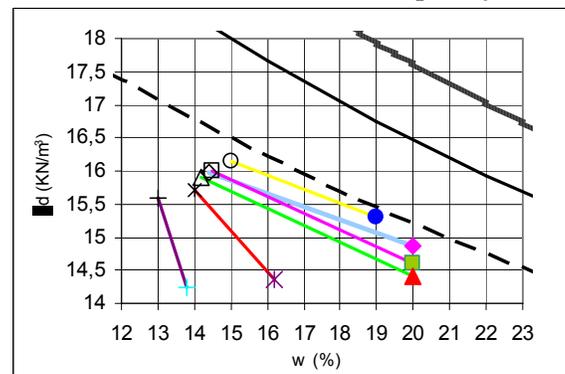
| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |
| ▲ 6% cal - P.N. | △ 6% cal - P.I. | — Linha ótima - 6% de cal |

Figura 6.10 – Mini-Compactação do Solo ZM6.

No horizonte denominado (SF) (Figuras 6.11 a 6.14) observam-se comportamentos distintos segundo o solo. O solo SF2 ocorre tendência a wót e o  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  diminuírem com o teor de cal incorporado. No solo SF4 o comportamento de variação de wót e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  com o teor de cal se inverte ao passar da energia normal para a intermediária. No solo SF8 também ocorre alguma sorte de inversão ao se variar à energia de compactação.



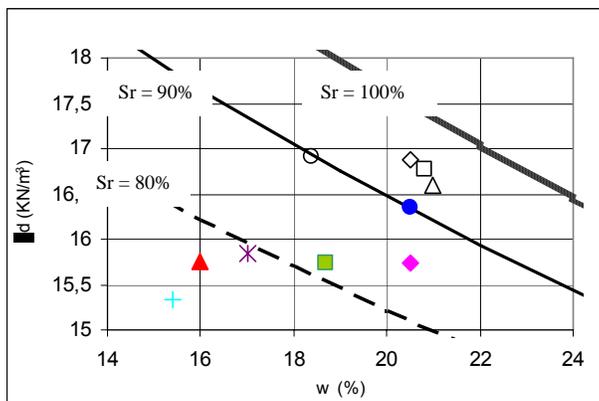
(a) Parâmetros de Mini-Compactação



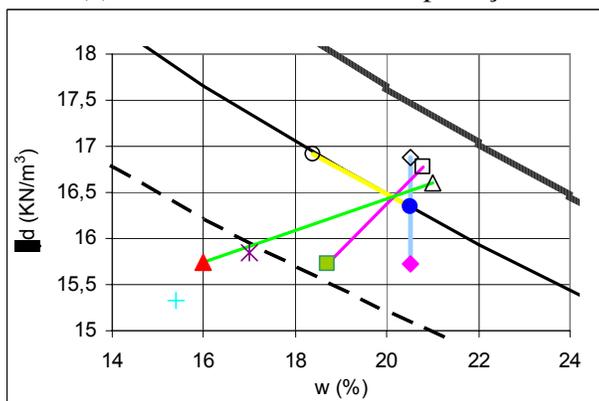
(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA          |                  |   |
|------------------|------------------|---|
| ● 0% cal - P.N.  | ○ 0% cal - P.I.  | — Linha ótima - 0% de cal<br>— Linha ótima - 2% de cal<br>— Linha ótima - 4% de cal<br>— Linha ótima - 6% de cal<br>— Linha ótima - 8% de cal<br>— Linha ótima - 10% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N.  | ◇ 2% cal - P.I.  |   |
| ■ 4% cal - P.N.  | □ 4% cal - P.I.  |   |
| ▲ 6% cal - P.N.  | △ 6% cal - P.I.  |   |
| * 8% cal - P.N.  | * 8% cal - P.I.  |   |
| + 10% cal - P.N. | + 10% cal - P.I. |   |

Figura 6.11 – Mini-Compactação do Solo SF2.



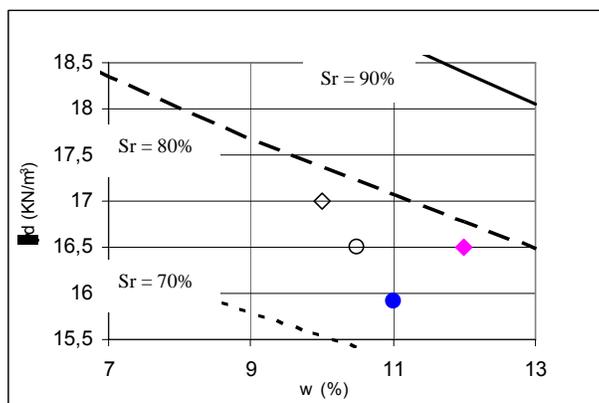
(a) Parâmetros de Mini-Compactação.



(b) Linhas Ótimas

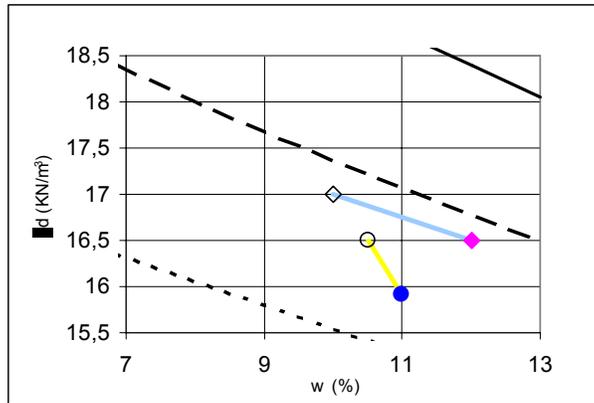
| LEGENDA          |                  |                            |
|------------------|------------------|----------------------------|
| ● 0% cal - P.N.  | ○ 0% cal - P.I.  | — Linha ótima - 0% de cal  |
| ◆ 2% cal - P.N.  | ◇ 2% cal - P.I.  | — Linha ótima - 2% de cal  |
| ■ 4% cal - P.N.  | □ 4% cal - P.I.  | — Linha ótima - 4% de cal  |
| ▲ 6% cal - P.N.  | △ 6% cal - P.I.  | — Linha ótima - 6% de cal  |
| * 8% cal - P.N.  | * 8% cal - P.I.  | — Linha ótima - 8% de cal  |
| + 10% cal - P.N. | + 10% cal - P.I. | — Linha ótima - 10% de cal |

Figura 6.12 – Mini-Compactação do Solo SF4.



(a) Parâmetros de Mini-Compactação.

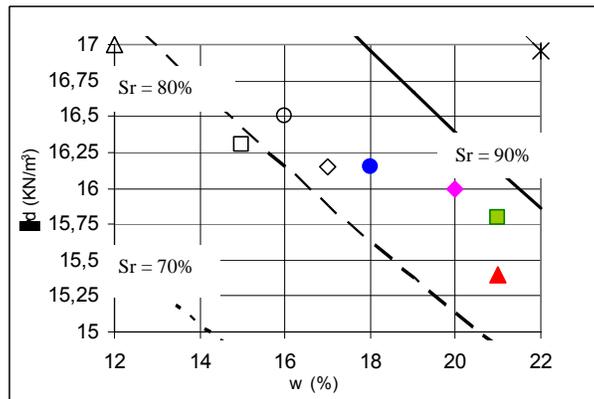
| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |



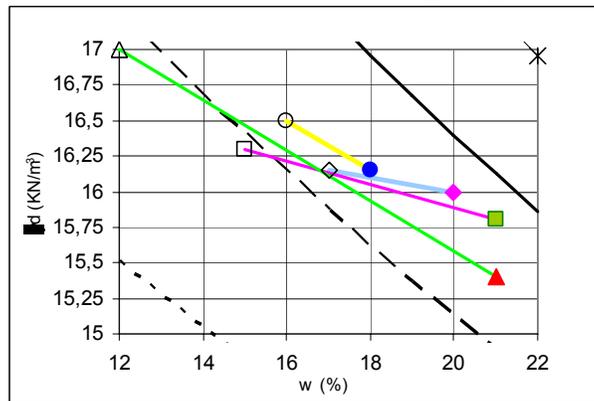
(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |

Figura 6.13 – Mini-Compactação do Solo SF8 - Continuação.



(a) Parâmetros de Mini-Compactação



(b) Linhas Ótimas

| LEGENDA         |                 |                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| ● 0% cal - P.N. | ○ 0% cal - P.I. | — Linha ótima - 0% de cal |
| ◆ 2% cal - P.N. | ◇ 2% cal - P.I. | — Linha ótima - 2% de cal |
| ■ 4% cal - P.N. | □ 4% cal - P.I. | — Linha ótima - 4% de cal |
| ▲ 6% cal - P.N. | △ 6% cal - P.I. | — Linha ótima - 6% de cal |

Figura 6.14 – Mini-Compactação do Solo SF13.

Aparentemente os resultados demonstram que, com o aumento da energia de compactação as diferentes reações causadas pela incorporação da cal em composições mineralógicas e granulométricas diferenciadas, resultam em tendências de variação de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e  $w\acute{o}t$ , que variam de solo para solo, embora predomine a tendência geral de queda de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e aumento de  $w\acute{o}t$  com a incorporação de cal. Citando-se ainda que este comportamento esta mais evidente no horizonte HB. De acordo com Eades & Grim (1966) *apud* Nunez (1991), quando do relato de resultados de reações entre hidróxido de cálcio e diversos argilominerais, a caulinita e a cal reagem facilmente, enquanto a illita e a montmorilonita exigem maior teor de cal para início das reações. Considerando esta observação, ao analisar em conjunto os parâmetros de compactação apresentados e os resultados granulométricos (Tabela 4.3), mineralógicos (Tabela 5.4) e químicos (Tabela 5.2), nota-se que a mudança de comportamento na compactação se encontra associada à junção destes três parâmetros e não apenas a composição mineralógica. Este fato pode ser exemplificado ao comparar os solos HB7 e HB9, de teores de caulinita altos e baixos teores de illita. Da mesma forma, avaliando-se apenas do ponto de vista textural, comportamentos similares deveriam ocorrer entre os solos ZM6 e SF2; o que também seria realidade para os solos HB7, ZM6, ZM3 e SF13 do ponto de vista da CTC.

Sendo assim, em conformidade com Nóbrega (1991) há diversos fatores que interferem no comportamento mecânico e hídrico dos solos, tais como a textura, a mineralogia a sua forma de organização e a composição química dos mesmos. Fato este que pode ser comprovado através do resumo dos parâmetros granulométricos, mineralógicos, químicos e de comportamento mecânico apresentados na Tabela 6.1. A importância de tal Tabela também se prende em destacar que na medida em que se acresce a energia de compactação à importância da estabilização química com a cal hidratada, em termos comportamentais, praticamente não se evidencia.

Tabela 6.1 – Resumo de Análises Física, Mineralógica, Química e Efeito da Cal em Relação ao Material Natural.

| Amostra | Análise Granulométrica<br>Com defloculante |              |              |               | Mineralogia |      |      |      |                 |                  |               |                 | Química |      | Proctor Normal |            |            | Proctor Intermediário |            |            |
|---------|--|--------------|--------------|---------------|-------------|------|------|------|-----------------|------------------|---------------|-----------------|---------|------|----------------|------------|------------|-----------------------|------------|------------|
|         | Pedr.<br>(%)                               | Areia<br>(%) | Silte<br>(%) | Argila<br>(%) | wL          | wP   | IP   | la   | Gibbsita<br>(%) | Caulinita<br>(%) | Illita<br>(%) | Goethita<br>(%) | Δ pH    | CTC  | 2%             | 4%         | 6%         | 2%                    | 4%         | 6%         |
|         |  |              |              |               |             |      |      |      |                 |                  |               |                 |         |      | wót ↓ γd ↓     | wót ↓ γd ↓ | wót ↓ γd ↓ | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wót ↑ γd ↓ |
| HB9     | 0,0  | 11,4         | 15,0         | 73,6          | 48,0        | 38,0 | 10,0 | 0,14 | 30,7            | 45,1             | 1,9           | 1,6             | -0,5    | 1,23 | wót ↓ γd ↓     | wót ↓ γd ↓ | wót ↓ γd ↓ | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wót ↑ γd ↓ |
| HB7     | 0,0  | 20,0         | 33,0         | 47,0          | 40,0        | 32,0 | 8,0  | 0,17 | 23,1            | 31               | 2,4           | 3,6             | -0,6    | 0,84 | wót ↑ γd ↓     | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ |
| HBR2    | 0,0  | 7,1          | 55,1         | 37,8          | 50,1        | 38,2 | 11,9 | 0,31 |                 |                  |               |                 | -0,2    | 5,62 | wót ↑ γd ↓     |            |            | wót ↑ γd ↓            |            |            |
| HBR1    | 0,1  | 5,6          | 60,4         | 34,0          | 55,6        | 36,2 | 19,4 | 0,57 |                 |                  |               |                 | -0,9    | 7,21 | wót ↑ γd ↓     | wót ↑ γd ↓ | wót ↑ γd ↓ | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ |
| HB12    | 0,0  | 13,7         | 54,2         | 32,1          | 45,0        | 30,0 | 15,0 | 0,47 | 5,5             | 26,5             | 21,9          | 3,4             | -1,35   | 6,01 | wót ↑ γd ↓     | wót ↓ γd ↑ | wót ↑ γd ↑ | wót ↓ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ |
| HB10    | 0,0  | 71,0         | 7,0          | 22,0          | NP          | NP   | NP   | NP   | 6,3             | 16,9             | 2,2           | 0,8             | -0,45   | 2,19 | wót ↓ γd ↓     | wót ↓ γd ↓ | wót ↓ γd ↓ | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ |
| HB11    | 0,0  | 67,4         | 7,8          | 24,8          | NP          | NP   | NP   | NP   | 18,2            | 9,2              | 0             | 1,8             | 0,2     | 1,72 | wót ↑ γd ↓     | wót ↑ γd ↓ | wót ↑ γd ↓ | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ |
| SF4     | 0,0  | 27,2         | 52,5         | 20,3          | 36,0        | 21,0 | 15,0 | 0,74 | 6,6             | 24,1             | 26,8          | 1,7             | -0,65   | 1,52 | wót = γd ↓     | wót ↓ γd = | wót ↓ γd = | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ |
| ZM6     | 0,0  | 11,0         | 80,3         | 8,7           | 38,0        | 21,0 | 17,0 | 1,95 | 3,4             | 46,8             | 3,7           | 1,5             | -0,9    | 0,82 | wót = γd ↓     | wót = γd ↓ | wót = γd ↓ |                       |            |            |
| SF 2    | 0,0  | 13,8         | 77,9         | 8,3           | 42,0        | 20,0 | 22,0 | 2,65 | 2,3             | 26,3             | 17,1          | 2               | -0,69   | 1,39 | wót ↑ γd ↓     | wót = γd ↓ | wót = γd ↓ | wót ↓ γd ↓            | wót ↓ γd ↓ | wót ↓ γd ↓ |
| ZM3     | 0,0  | 93,0         | 0,8          | 6,2           | NP          | NP   | NP   | NP   | 1,3             | 5,1              | 3,2           | 0,1             | -0,1    | 0,83 | wót ↓ γd =     | wót ↓ γd = |            | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ |            |
| SF8     | 0,0  | 91,3         | 2,6          | 6,1           | NP          | NP   | NP   | NP   | 2,1             | 11,2             | 0             | 1,5             | -0,3    | 3,04 | wót ↑ γd ↑     |            |            | wót ↓ γd ↑            |            |            |
| SF13    | 0,0  | 13,0         | 82,0         | 5,0           | NP          | NP   | NP   | NP   | 1,2             | 18,6             | 26,3          | 3               | -0,5    | 0,89 | wót ↑ γd ↓     | wót ↑ γd ↓ | wót = γd ↓ | wót ↑ γd ↓            | wót ↑ γd ↓ | wó t↑ γd ↓ |

A Tabela 6.2, por sua vez, vêm sintetizar os valores de  $w_{ót}$  e  $\gamma_{dmáx}$  representados graficamente nas Figuras 6.2 a 6.14 apresentados anteriormente.

Tabela 6.2 - Valores de  $w_{ót}$  e  $\gamma_{dmáx}$  obtidos no Ensaio de mini-Compactação

| Material       | Energia |                                      |               |                                      |
|----------------|---------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
|                | Normal  |                                      | Intermediária |                                      |
|                | wót (%) | $\gamma_{dmáx}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | wót (%)       | $\gamma_{dmáx}$ (kN/m <sup>3</sup> ) |
| HB7            | 30      | 14,25                                | 17            | 15,85                                |
| HB7 + 2% cal   | 30      | 14,0                                 | 22            | 14,85                                |
| HB7 + 4% cal   | 31      | 13,2                                 | 23            | 14,55                                |
| HB7 + 6% cal   | 31      | 13,10                                | 24            | 14,22                                |
| HB9            | 32      | 13,3                                 | 26            | 14,91                                |
| HB9 + 2% cal   | 28      | 13,3                                 | 27            | 14,5                                 |
| HB9 + 4% cal   | 28      | 13,1                                 | 27            | 14,3                                 |
| HB9 + 6% cal   | 28      | 12,9                                 | 27,2          | 14,0                                 |
| HB10           | 15      | 17,09                                | 14,5          | 17,65                                |
| HB10 + 2% cal  | 15      | 15,0                                 | 16            | 16,7                                 |
| HB10 + 4% cal  | 14,5    | 15,14                                | 17            | 16,25                                |
| HB10 + 6% cal  | 15      | 15,14                                | 17,5          | 15,71                                |
| HB10 + 8% cal  | 14,5    | 15,0                                 | 13,6          | 15,5                                 |
| HB10 + 10% cal | 14,5    | 14,5                                 | 13            | 15,4                                 |
| HB11           | 17      | 17,4                                 | 14,5          | 19,0                                 |
| HB11 + 2% cal  | 17      | 16,9                                 | 15,5          | 17,15                                |
| HB11 + 4% cal  | 19      | 15,7                                 | 16            | 16,8                                 |
| HB11 + 6% cal  | 22      | 14,9                                 | 16            | 16,3                                 |
| HB12           | 29      | 14,75                                | 26,3          | 15,75                                |
| HB12 + 2% cal  | 34      | 13,25                                | 26            | 14,2                                 |
| HB12 + 4% cal  | 32      | 14,55                                | 24,1          | 14,9                                 |
| HB12 + 6% cal  | 30      | 14,42                                | 23            | 15,45                                |
| HBR1           | 28,5    | 13,60                                | 28,2          | 14,60                                |
| HBR1 + 2% cal  | 29      | 13,50                                | 28,6          | 14,50                                |
| HBR1 + 3% cal  | 30,2    | 13,25                                | 30            | 14,41                                |
| HBR1 + 6% cal  | 30,4    | 13,10                                | 29,2          | 14,30                                |
| HBR2           | 24      | 15,2                                 | 22,9          | 16,50                                |
| HBR2 + 2% cal  | 25      | 15,0                                 | 23,2          | 16,20                                |
| ZM3            | 20,6    | 14,8                                 | 21,0          | 15,0                                 |
| ZM3 + 2% cal   | 13,4    | 14,88                                | 13,4          | 15,5                                 |
| ZM3 + 4% cal   | 13,1    | 14,77                                | 13,0          | 15,2                                 |
| ZM6            | 21,0    | 15,15                                | 18,0          | 16,13                                |
| ZM6 + 2% cal   | 21,0    | 14,84                                | 18,0          | 15,75                                |
| ZM6 + 4% cal   | 21,0    | 14,72                                | 18,0          | 15,55                                |
| ZM6 + 6% cal   | 21,0    | 15,85                                | 18,0          | 16,49                                |
| SF2            | 19      | 15,3                                 | 15            | 16,15                                |
| SF2 + 2% cal   | 20      | 14,86                                | 14,4          | 15,98                                |
| SF2 + 4% cal   | 20      | 14,6                                 | 14,5          | 16,0                                 |
| SF2 + 6% cal   | 20      | 14,4                                 | 14,2          | 15,91                                |
| SF2 + 8% cal   | 16,2    | 14,35                                | 14            | 15,70                                |

|               |      |       |      |       |
|---------------|------|-------|------|-------|
| SF2 + 10% cal | 13,8 | 14,23 | 13   | 15,60 |
| SF4           | 20,5 | 16,35 | 18,4 | 16,91 |
| SF4 + 2% cal  | 20,5 | 15,73 | 20,5 | 16,88 |
| SF4 + 4% cal  | 18,7 | 15,73 | 20,8 | 16,77 |
| SF4 + 6% cal  | 16,0 | 15,75 | 21,0 | 16,6  |
| SF4 + 8% cal  | 17,0 | 15,84 | -    | -     |
| SF4 + 10% cal | 15,4 | 15,33 | -    | -     |
| SF8           | 11,0 | 15,92 | 10,5 | 16,5  |
| SF8 + 2% cal  | 12,0 | 16,5  | 10,0 | 17,0  |
| SF13          | 18   | 16,15 | 16   | 16,5  |
| SF13 + 2% cal | 20   | 16,0  | 17   | 16,15 |
| SF13 + 4% cal | 21   | 15,8  | 15   | 16,3  |
| SF13 + 6% cal | 21   | 15,4  | 12   | 17,0  |

## 7 – CURVAS CARACTERÍSTICAS

Objetivando a associação de níveis de saturação com o comportamento mecânico dos materiais é de fundamental importância a determinação das curvas características dos mesmos para os diferentes teores de umidade passíveis de ocorrer *in situ*. Sob este aspecto, considerando as variações climáticas que ocorrem nas regiões tropicais, foram determinadas curvas características para a umidade ótima, para o ramo seco e o úmido da curva de compactação.

Considerando as diferentes energias de compactação indicadas para os materiais usados como reforço de subleito, sub-base e base rodoviária, foram ainda determinadas curvas características em diferentes energias de compactação e também a partir de amostras indeformadas, com a finalidade de determinar o efeito da compactação para cada tipo de material. Sendo assim, este capítulo apresenta as curvas características obtidas para amostras compactadas dinamicamente e estaticamente, e ainda, para amostras indeformadas.

De acordo com a classificação TRB, alguns dos solos estudados não poderiam ser usados como material de construção, no entanto, sabe-se que a estabilização química é bastante eficaz para os solos finos argilosos, sendo assim optou-se por estudar a variação da resistência (mini-CBR) para todos os materiais estabilizados com diferentes percentagens de cal (2%, 4% e 6% em peso). Considerando que alguns destes solos estabilizados possam ser usados como camada de pavimento, torna-se necessária a determinação das curvas características dos mesmos, para diferentes percentuais de cal. Devido ao efeito da cal no comportamento e estrutura do solo, determinam-se ainda a sucção para diferentes tempos de estabilização ou equilíbrio.

A Tabela 7.1 mostra as condições para as quais todas as curvas características obtidas, considerando as respectivas variações de energia, umidade, tempo de equilíbrio e tipo de material. É importante ressaltar que não foi adotada a trajetória de secagem, devido à desagregação sofrida pelos corpos de prova moldados a partir de amostras indeformadas. Sendo assim, visando à eliminação de mais variações que as já adotadas, optou-se pela não execução da trajetória de secagem para os corpos de prova compactados, tendo sido usada apenas a trajetória de umedecimento (TU). É interessante ressaltar que, considerando todas as variações usadas, totalizaram-se 87 curvas características obtidas nesta pesquisa.

Tabela 7.1 – Resumo dos Ensaio Realizados.

|                | Trajetória de Execução | Tempo de Equalização | Teor de cal (%) | SOLOS ESTUDADOS |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|----------------|------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|---|---|
|                |                        |                      |                 | HB7             | HB9b | HB10 | HB11 | HB12 | HBR1 | HBR2 | ZM3 | ZM6 | SF2 | SF4 | SF8 | SF13 |   |   |
| Indeformada    | TU                     | 15 dias              | 0%              | X               | X    | X    | X    | X    |      |      |     | X   | X   | X   | X   |      | X |   |
|                | TM                     | 15 dias              | 0%              |                 |      |      | X    |      |      |      |     | X   |     |     |     |      | X |   |
| Amolgada       | TU                     | 15 dias              | 0%              | X               |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     | X    | X |   |
| Proctor Normal | wót                    | TU                   | 15 dias         | 0%              | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X   | X   | X   | X   | X   | X    | X | X |
|                | wót                    | TU                   | 15 dias         | 2%              | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X   | X   | X   | X   | X   | X    | X | X |
|                | wót                    | TU                   | 15 dias         | 6%              | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X   | X   | X   | X   | X   | X    | X | X |
|                | wót                    | TM                   | 15 dias         | 0%              |      |      |      | X    |      |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |
|                | wót                    | TM                   | 15 dias         | 2%              |      |      |      | X    |      |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |
|                | wót                    | TM                   | 15 dias         | 6%              |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót                    | TU                   | 30 dias         | 0%              |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót                    | TU                   | 30 dias         | 2%              |      |      |      | X    |      |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |
|                | wót                    | TU                   | 30 dias         | 6%              |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót                    | TM                   | 30 dias         | 0%              |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót                    | TM                   | 30 dias         | 2%              |      |      |      | X    |      |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |
|                | wót                    | TM                   | 30 dias         | 6%              |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót + Δw               | TU                   | 15 dias         | 0%              | X    | X    |      | X    |      |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |
|                | wót + Δw               | TU                   | 15 dias         | 2%              | X    | X    |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót + Δw               | TU                   | 15 dias         | 6%              |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót - Δw               | TU                   | 15 dias         | 0%              | X    | X    |      | X    |      |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |
|                | wót - Δw               | TU                   | 15 dias         | 2%              | X    | X    |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | wót - Δw               | TU                   | 15 dias         | 6%              |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |   |   |
|                | Proctor Intermediário  | wót                  | TU              | 15 dias         | 0%   |      |      |      | X    |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |
|                |                        | wót                  | TU              | 15 dias         | 2%   |      |      |      | X    |      |     |     | X   |     |     | X    |   |   |

onde:

TU – Trajetória de Umedecimento

TM – Trajetória Mista

wót - Δw – Curva obtida para a amostra compactada no ramo seco

wót + Δw – Curva obtida para a amostra compactada no ramo úmido

Ressalta-se ainda que, todas as curvas características posteriormente apresentadas se encontram em função de pF e de (ua – uw) (kPa). No decorrer deste capítulo trabalhou-se mais comumente em termos de pF, que representa o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água.

## 7.1 – EFEITO DO TIPO DE SOLO NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS (AMOSTRAS INDEFORMADAS)

De acordo com Camapum de Carvalho & Leroueil (2000), em se tratando de solos tropicais, o intemperismo e a acidez são responsáveis pela agregação de partículas cimentadas ou não por óxidos e/ou hidróxidos de alumínio e/ou ferro. Estas agregações por sua vez se ligam a outras, seja por estes cimentos ou por pontes de argila (Paixão & Camapum de Carvalho, 1994) dando origem à distribuição bimodal de poros.

Os solos com distribuição bimodal de poros apresentam dois pontos de entrada de ar, sendo o primeiro referente à entrada de ar nos macroporos, para pequenos valores de sucção, e o segundo diz respeito à entrada de ar nos microporos, para valores de sucção mais elevados. É importante observar que, nos solos tropicais os macroporos ocorrem interagregados enquanto os microporos estão predominantemente intra-agregados.

As Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 apresentam as curvas características representativas dos solos superficiais estudados. Destaca-se que, para os solos SF8, HBR1 e HBR2 não foi possível a retirada de blocos indeformados, portanto não serão apresentadas as curvas correspondentes às amostras indeformadas dos mesmos.

A distribuição de poros no solo pode ir desde uma situação em que eles sejam praticamente homogêneos, como por exemplo, para uma areia uniforme, até o caso onde ocorra a distribuição com concentrações em determinados tamanhos de poros. Sendo assim, o solo poderá ter dois (distribuição bimodal) ou mais tamanho de poros predominantes. Segundo Camapum de Carvalho & Leroueil (2000), tanto os solos tropicais como os solos argilosos compactados em laboratório (geralmente com secagem prévia) no ramo seco, apresentam uma distribuição de poros predominantemente bimodal. Em solos bem graduados, pouco intemperizados, comumente se verifica a distribuição gradual dos poros. Nos solos tropicais agregados, profundamente intemperizados, geralmente a textura é de graduação aberta e os poros se distribuem do mesmo modo, com concentrações em determinados diâmetros. Nos solos compactados, à medida que se aumenta a umidade e energia de compactação, esta distribuição tende a condição homogênea devido à deformação dos grumos, formados quando do umedecimento. As Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 ilustram as diferentes formas da curva característica, segundo a distribuição de poros do solo natural indeformado. De acordo com a Figura 7.1 os latossolos estudados (HB) apresentam curvas características distintas. Nos HB9b, HB10 e HB11 visualizam-se distribuições de poros bimodais, e ainda, tendência à homogeneidade para o solo HB12. Para o conjunto de latossolos verifica-se término de entrada de ar nos macroporos para  $S_r$  aproximadamente igual a 76% e início da entrada de ar nos microporos para grau de saturação de 16%.

No solo HB7 verificou-se 3 patamares na curva característica, indicando 3 dimensões de poros bastante distintas (distribuição trimodal). É evidente que em todos esses solos ocorrem transições entre os poros predominantes, no entanto esta parece ser mais marcante para o solo HB7. Ao avaliar este comportamento com base na análise granulométrica (Tabela 4.3), se verificam aumentos significativos dos teores de argila desses solos quando do uso do defloculante, indicando o estado agregado do solo natural, o que por sua vez aponta para a possibilidade de distribuição mal graduada dos poros. Já para o solo HB12 a granulometria se apresenta pouco sensível ao uso do defloculante, sendo propenso a uma melhor distribuição de poros e, portanto, a fornecer curva característica marcada por uma variação gradual da sucção com o grau de saturação.

Ainda no que concerne a esses latossolos, as análises mineralógicas (Tabela 5.4) mostraram que apenas o solo HB12 apresentou elevado teor de illita, o que aponta para um solo não muito intemperizado. Observação esta corroborada pelas análises granulométricas e pelo valor de  $\Delta\text{pH}$  (Tabela 5.2) obtido para este solo, o que justifica a forma diferenciada da sua curva característica.

Quanto aos solos pertencentes à zona mosqueada (Figura 7.2), se observa bimodalidade para o solo ZM3 e tendência à homogeneidade dos poros para o solo ZM6. Granulometricamente esses dois solos se diferenciam pela textura, sendo o ZM6 mais fino e uniforme que o ZM3. Mineralogicamente, enquanto no ZM3 predomina o quartzo, no ZM6 predomina a caulinita. Quimicamente, o  $\Delta\text{pH}$  do ZM6 é mais negativo que o do ZM3. Neste caso, apesar da boa graduação textural, a bimodalidade se faz presente provavelmente pela insuficiência de minerais de argila necessários para preencher os espaços vazios existentes entre os grãos de quartzo. Sendo assim, a bimodalidade do solo ZM3 é fixada pela natureza mineralógica e características estruturais do solo, conforme mostrado na Figura 5.43.

Do ponto de vista textural o solo ZM6 é bastante siltoso e, sob a ótica da mineralogia, trata-se de um solo argiloso, que apresenta alto percentual de caulinita + illita. Aparentemente o patamar que se verifica para esse solo,  $\text{pF}=5$ , está associado à presença marcante dos minerais de argila.

Os saprólitos finos (SF), de forma similar ao solo HB12, apresentam predominância de silte e percentuais consideráveis de areia. As curvas características obtidas para este grupo de solos (Figura 7.3), são indicativas de uma boa distribuição de poros. No entanto ocorrem diferenças significativas entre as curvas características dos solos SF2 e SF13. Avaliando a química (Tabela 5.2) e a mineralogia (Tabela 5.5) percebe-se grande semelhança entre os dois solos, porém, as curvas granulométricas (anexo I) mostram que o defloculante interage com os minerais de argila do solo SF13, agregando-os; ou seja, aparentemente os dois solos são compostos por minerais que apresentam grau de cristalinidade distinto. Tal característica pode ser confirmada pela natureza plástica do SF2 e não plástica do SF13 (Tabela 4.2); e ainda, é possível verificar uma porosidade natural mais fechada no solo SF13.

A análise comparativa entre esses dois solos evidencia o risco da definição da curva característica com base apenas na textura, esta devendo ser restrita apenas ao campo da estimativa.

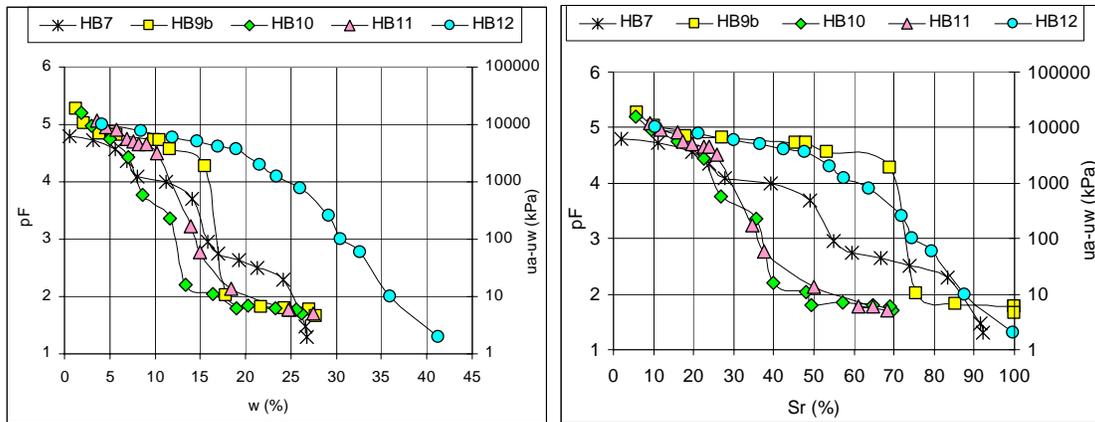


Figura 7.1 – Curvas Características dos Solos HB.

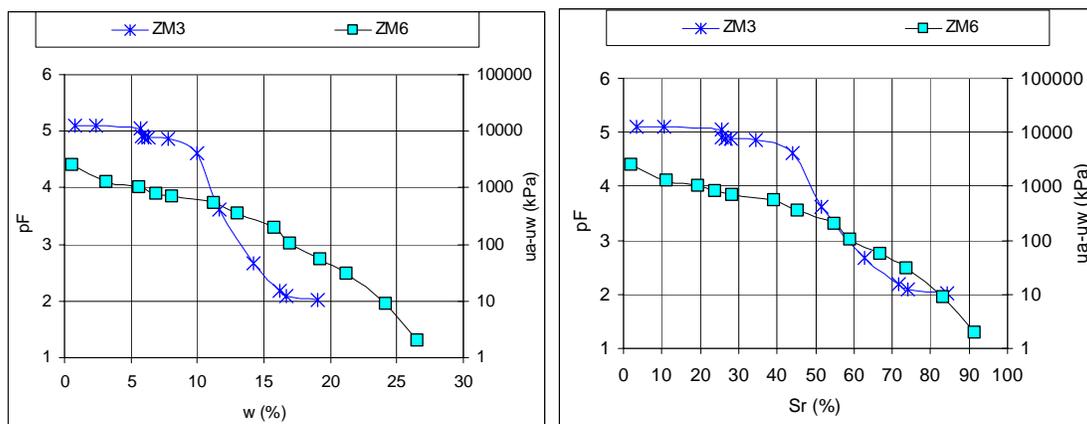


Figura 7.2 – Curvas Características dos Solos ZM.

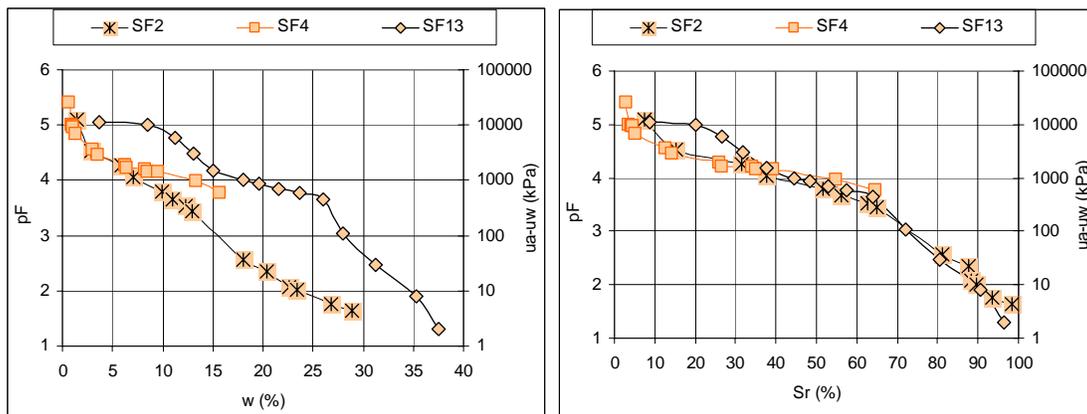


Figura 7.3 – Curvas Características dos Solos SF.

Ao plotar todas as curvas características dos solos em que foi possível a retirada de blocos (Figura 7.4), ficam em evidência alguns pontos importantes, tais como:

- Pontos de entrada de ar, seja nos poros dos solos monomodais ou nos macroporos dos solos bimodais, variando entre 2 e 10 kPa para solos de granulometria e formações distintas;

- Pontos de entrada de ar dos microporos apresentam grande variação de tensão de sucção (1000 a 10000 KPa).
- É nítida a variação comportamental apresentada nas curvas características, em termos de teor de umidade, quando ocorre modificação do tipo de solo. No entanto, ao se considerar essas curvas com a sucção em função do grau de saturação, esse comportamento não é tão evidente para os solos SF.

Segundo Aubertin *et al.* (1998) *apud* Guimarães (2002), o ponto de entrada de ar deve variar entre 0,2kPa a 1kPa para areias grossas, 1kPa a 3,5kPa nas areias médias, 3,5kPa a 7,5kPa para areias finas, 7kPa a 25kPa em siltes e mais de 25kPa para as argilas. Portanto, os resultados obtidos mostram que esta classificação não se ajusta aos solos estudados ao se considerar a análise granulométrica convencional sem o uso do defloculante. Considerando-se as distribuições granulométricas apresentadas na Tabela 4.3 observa-se que este comportamento estaria mais associado à análise granulométrica sem o uso de defloculante. De modo geral é possível ainda estimar que o comportamento esteja mais associado à condição física (presença ou não de macroporos), podendo, no entanto, ser afetado pela composição química e mineralógica do solo.

A Tabela 7.2 apresenta resultados das análises das curvas características considerando-se os pontos definidos a partir da Figura 7.4.

Tabela 7.2 - Dados das Curvas Características para Amostras Indeformadas.

| Tipo de Solo | $e_0$ | EAMA (kPa) | $B_0$ (kPa) | $w_{B_0}$ (%) | $Sr_{B_0}$ (%) | EAMI (kPa) | $w_{EAMI}$ (%) | $Sr_{EAMI}$ (%) |
|--------------|-------|------------|-------------|---------------|----------------|------------|----------------|-----------------|
| HB7          | 0,78  | 20         | 55          | 17,02         | 59,5           | 3652       | 5,6            | 19,5            |
| HB9b         | 0,76  | 4,67       | 10,47       | 17,81         | 75,35          | 6937       | 3,84           | 17,9            |
| HB10         | 1,02  | 5,2        | 10,92       | 16,42         | 47,9           | 5689,5     | 5,1            | 16,1            |
| HB11         | 1,08  | 5,16       | 13,42       | 18,43         | 50             | 3211,1     | 10,2           | 25,7            |
| HB12         | 1,12  | x          | x           | x             | x              | 3652       | 19,02          | 50,61           |
| HBR1         | ♣     | ♣          | ♣           | ♣             | ♣              | ♣          | ♣              | ♣               |
| HBR2         | ♣     | ♣          | ♣           | ♣             | ♣              | ♣          | ♣              | ♣               |
| ZM3          | 0,61  | 15,53      | 16,46       | 19,03         | 83,06          | 4087       | 9,98           | 44,65           |
| ZM6          | 0,78  | 2          | x           | x             | x              | 1005       | 5,6            | 19,5            |
| SF2          | 0,82  | 4,36       | x           | x             | x              | 3319       | 2,86           | 15,18           |
| SF4          | 0,68  | x          | x           | x             | x              | 6760       | 1,29           | 5,35            |
| SF8          | ♣     | ♣          | ♣           | ♣             | ♣              | ♣          | ♣              | ♣               |
| SF13         | 1,086 | 2          | 2           | 37,55         | 96,46          | 10025      | 8,45           | 20,15           |

onde:

$e_0$  = índice de vazios inicial;

EAMA = Pressão de entrada de ar dos macroporos;

$B_0$  = Pressão correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos;

$w_{B_0}$  = teor de umidade correspondente ao ponto  $B_0$ ;

$Sr_{B_0}$  = saturação correspondente ao ponto  $B_0$ ;

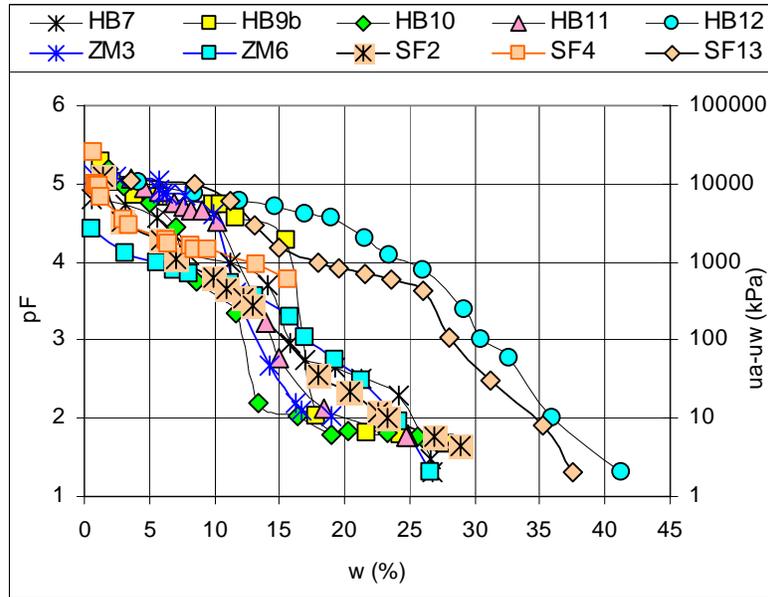
EAMI = pressão de entrada de ar nos microporos;

$w_{EAMI}$  = teor de umidade correspondente ao ponto EAMI;

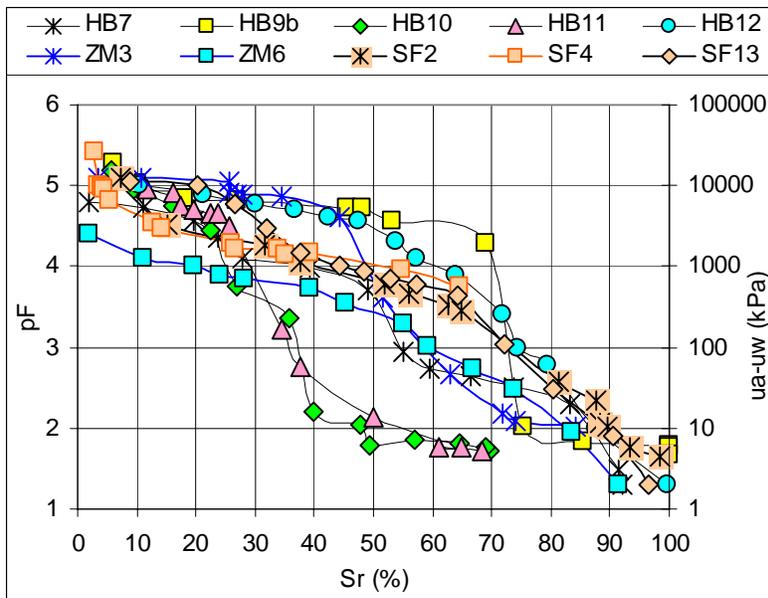
Sr EAMI = saturação correspondente ao ponto EAMI.

x = não definido

\* = curvas não determinadas.



(a)



(b)

Figura 7.4 - Curvas Características das Amostras Indeformadas (Trajetória de Umedecimento - TU)

## **7.2 – INFLUÊNCIA DA ESTABILIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA NA FORMA DA CURVA CARACTERÍSTICA**

A carência de materiais apropriados a certas obras como as de construção rodoviária impõe a necessidade de melhoria dos solos existentes. A melhoria pode se dar mediante intervenção nas propriedades ou características físicas e químicas do solo ou mesmo por ações biológicas. A estabilização pode se dar mediante correção granulométrica ou por compactação. Optou-se aqui pela análise da influência da compactação na forma da curva característica e no próprio comportamento dos solos estudados. Quanto à estabilização química, vários são os aditivos usados. Optou-se aqui pelo uso da cal hidratada cálcica.

É conhecido o papel desempenhado pela estabilização de solos com cal na melhoria do comportamento mecânico dos mesmos, no entanto, pouco estudo tem sido feito visando o entendimento da influência da sucção no comportamento destes solos estabilizados. Inicialmente, verificar-se-á o papel da compactação na curva característica dos solos naturais (com 0% de cal incorporada), para posteriormente observar se este padrão comportamental permanece igual quando da estabilização química com 2% e 6% de cal hidratada.

### **7.2.1 - Influência da Energia e da Umidade Compactação na Curva Característica**

Segundo Camapum de Carvalho & Lerouil (2000), nos solos tropicais há possibilidade de preservação das agregações naturais durante a compactação, o que ocasionaria a persistência da distribuição de poros bimodal. Como citado anteriormente, a bimodalidade pode ocorrer ainda nos solos argilosos compactados em laboratório devido à formação de grumos durante o processo de umedecimento.

Como objetivo inicial deste ítem, pretende-se verificar para o material natural (sem estabilização química), para quais tipos de solo e condições de compactação a afirmação procede. Sendo assim, este ítem contemplará 3 aspectos distintos que influem no comportamento das curvas características:

- Efeito da compactação nas energias Proctor Normal (P.N.) e Proctor Intermediário (P.I.),
- Efeito da umidade de compactação e,
- Efeito do tempo de estabilização da sucção.

Inicialmente são apresentadas as curvas características obtidas para as amostras naturais compactadas dinamicamente na energia Proctor Normal (Figuras 7.5, 7.6 e 7.7), para

diferentes umidades. Posteriormente será analisada a influência da energia de compactação e da estabilização química.

#### **7.2.1.1 - Curvas Características dos Solos Compactados nas Condições Ótimas do PN**

O material coletado referente aos 13 tipos de solo estudados foi previamente preparado (seco ao ar, destorroado e homogeneizado com água destilada) de forma a serem compactados nas respectivas condições ótimas da energia PN, obtidas no ensaio de mini-compactação. A opção pela determinação da maioria das curvas no teor de umidade ótimo de compactação (Figuras 7.5, 7.6 e 7.7), visou uma aproximação maior com o que se adota em campo, quando da compactação de uma base ou sub-base de solos argilosos lateríticos. Estas camadas são geralmente compactadas no teor de umidade ótimo, sendo aceitáveis variações de umidade em torno da ótima de +2% à -2%. No entanto, diversos autores (Rezende (2003), Nogami & Villibor (1995), Delgado (2002), etc), mostraram que o solo *in situ* raramente se encontra na umidade ótima de compactação. Sendo assim, torna-se importante verificar o efeito da variação da umidade de compactação nas formas das curvas características para umidades inferiores e superiores a ótima. É necessário destacar que a variação usada nem sempre obedeceu ao critério de variação igual a 2%, uma vez que foram obtidos diferentes valores de umidade ótima ( $w_{ót}$ ) para os diferentes tipos de solo estudados, portanto, procurou-se determinar as curvas características de forma ao teor de umidade de compactação usado coincidir para solos de diferentes composições granulométricas e horizontes. Sendo assim foi fixado apenas o limite mínimo de variação de 2% em torno da ótima.

A seguir são apresentadas as curvas características representativas dos latossolos (Figura 7.5), da zona mosqueada (Figura 7.6) e dos saprólitos (Figura 7.7) em estudo, considerando a trajetória de umedecimento e a umidade de compactação referente à ótima do Proctor Normal. Nas curvas características obtidas é possível observar que a distribuição de poros bimodal tende a persistir para os solos HB10, HB11e HBR1, desaparecendo por completo no solo HB7. Para os demais latossolos as curvas características assumem forma de uma distribuição de poros mais homogênea ou bem graduada. De modo geral para esses solos observa-se redução da macroporosidade com o processo de compactação.

No horizonte Mosqueado não há similaridade entre as curvas características (Figura 7.6), apesar de terem sido compactadas no mesmo teor de umidade. As curvas apresentam forma indicativa de bimodalidade para o solo ZM6. Para este solo tem-se apenas o fechamento dos poros deslocando o ramo ascendente da curva característica para a direita em

relação à obtida para o solo nas condições de campo. Para os solos ZM cabe destaque a grande mudança de comportamento gerada pela compactação no solo ZM3 em relação ao solo natural (Figura 7.2). Os processos de secagem, destorroamento, reumidificação e compactação do solo ZM3 possivelmente geraram a presença marcante de macroporosidade, fazendo com que o término da entrada de ar se desse para grau de saturação igual a 20%. Destaca-se ainda que o grande teor de quartzo presente nesse solo pode ser responsável por este comportamento.

Para os Saprólitos (Figura 7.7), de forma similar ao horizonte mosqueado, não há similaridade entre as curvas características. No entanto é importante destacar que para saturações baixas ( $S_r < 10\%$ ) as curvas dos solos SF2, SF4 e SF8 apresentam comportamento único. Embora não tenha sido possível determinar a curva característica da amostra indeformada SF8, os resultados obtidos para a condição compactada são bastante similares aos apresentados pela amostra ZM3 compactada. De forma generalizada, pode-se dizer que as curvas obtidas para as amostras SF2 e SF4 são próximas das obtidas para a condição de amostra indeformada. Nesses solos cabe ainda destacar o fato da curva característica obtida para o solo compactado se situar abaixo da obtida para amostra indeformada, ou seja, para o mesmo grau de saturação a sucção é menor na amostra compactada. Esses resultados são coerentes com a porosidade nas duas condições, uma vez que o índice de vazios da amostra natural é inferior ao do solo compactado. O mesmo pode ser verificado para os solos ZM3 e SF8. Mais uma vez, cabe destaque para o fato do solo SF8, a exemplo do ZM3 ser um solo rico em quartzo e apresentar grau de saturação correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos baixo (da ordem de 25%). Dos resultados apresentados depreende-se que os solos muito quartzosos apresentam, devido às cimentações naturais, melhor comportamento no estado natural não saturado.

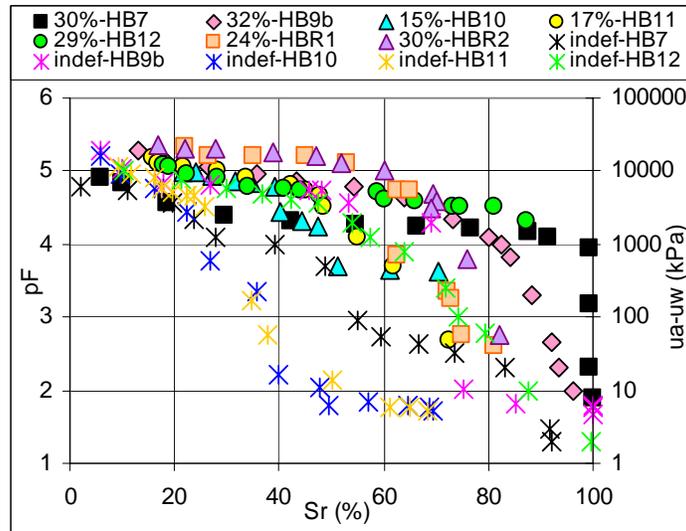


Figura 7.5 - Curvas Características Indeformadas e Compactadas dos Latossolos.

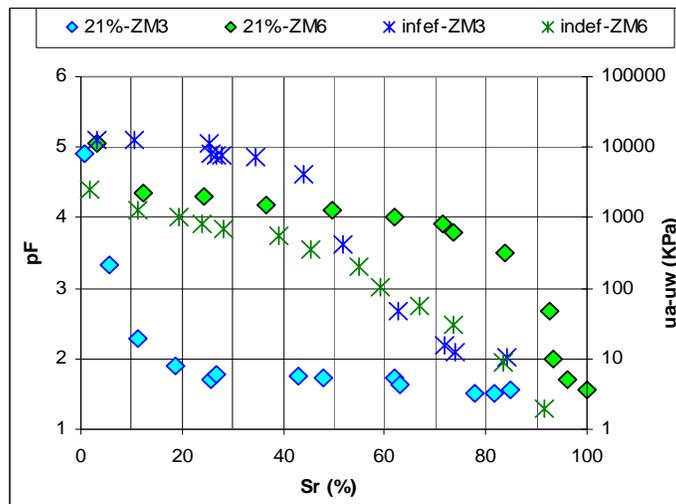


Figura 7.6 - Curvas Características Indeformadas e Compactadas dos Solos da Zona Mosqueada.

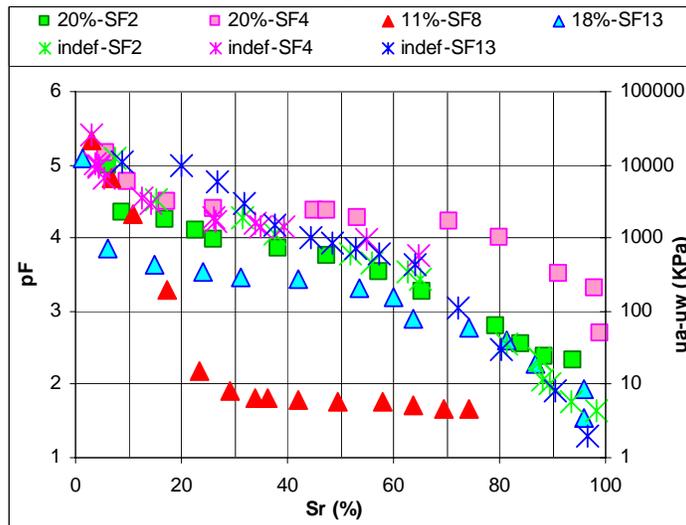


Figura 7.7 - Curvas Características Indeformadas e Compactadas dos Solos Saprolíticos.

As Figuras 7.8 a 7.12 comparam as curvas características determinadas para o ramo seco, úmido e na umidade ótima de compactação do P.N. No entanto, não foram determinadas curvas para todos os solos estudados. A seguir, são apresentadas as curvas características obtidas apenas para os solos HB7, HB9b, HB11, ZM6 e SF4. Torna-se necessário destacar que a escolha destes solos se deu por estes apresentarem os maiores teores de argila agregada, assim, objetivando-se visualizar o papel da umidade e da energia de compactação no comportamento das curvas características em decorrência da eventual destruição dos agregados durante o processo de compactação, foram esses os solos selecionados.

Na Figura 7.8 observa-se, para o solo HB7, que as curvas são coincidentes até o grau de saturação de 80%, a partir daí, a curva de 32% (ramo úmido) se distingue das demais, apresentando sucções mais baixas e refletindo certa graduação dos poros. Acredita-se que esse comportamento se deva a mecanismos de expansão do solo nessa umidade de compactação, devido à estrutura mais orientada.

Na Figura 7.9 o comportamento das curvas obtidas para o solo HB9b se distingue tanto para o ponto mais seco (26%) quanto para o mais úmido (34%), apresentando-se similar apenas até graus de saturação iguais a 55%. Tal similaridade é mantida entre a ótima e o ramo úmido até grau de saturação igual a 80%. Usando-se a curva determinada na umidade ótima como referência nota-se que para valores de grau de saturação igual ou maiores que 80% as sucções da curva obtida para a umidade igual a 34% são menores, enquanto que para  $S_r$  aproximadamente igual a 55% a curva obtida para o ramo seco apresenta valores de sucção superiores.

Já na Figura 7.10 observa-se, para o solo HB11, coincidência entre as curvas apenas para valores de saturação até 30%. A partir deste ponto ocorre decréscimo dos valores de sucção determinados para o ramo seco ( $w = 11\%$ ). No entanto, a curva obtida para a umidade de 21% se distingue da ótima apenas a partir de  $S_r$  igual a 70%. Porém, o mais importante é destacar que para este solo a influência da umidade de compactação é o inverso do obtido para o solo HB9b em relação à ótima. Aqui mais uma vez parece relevante a diferença de composição mineralógica entre os dois solos.

Tal comportamento dos latossolos compactados (Figuras 7.8, 7.9 e 7.10) reflete as diferenças físicas, químicas, mineralógicas e principalmente, estruturais entre eles. Em síntese, percebe-se que nos latossolos a compactação tende a fazer desaparecer o aspecto bimodal das curvas características. Contudo, percebe-se que quando a origem da macroporosidade é textural mais não proveniente dos agregados, mas da presença do quartzo, como no caso do solo HB11, esse aspecto bimodal subsiste para baixas umidades de

compactação. Não se pode esquecer que o tratamento dado ao solo no campo é distinto do laboratório, não envolvendo destorroamento e secagem.

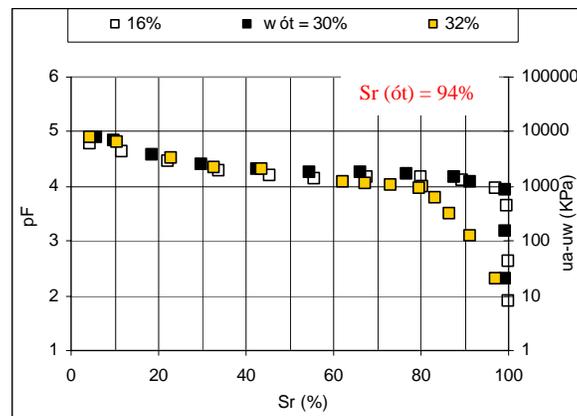


Figura 7.8 - Curvas Características do Solo HB7 Compactado em Diferentes Umidades.

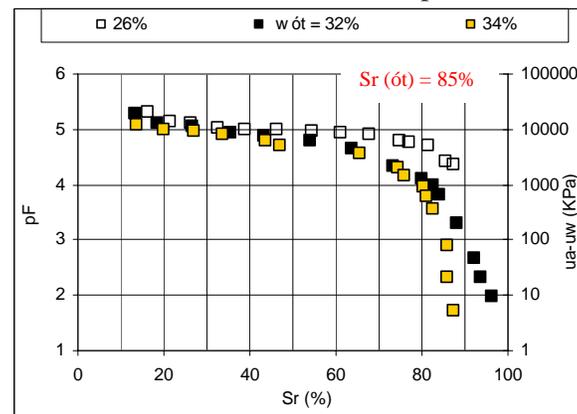


Figura 7.9 - Curvas Características do Solo HB9b Compactado em Diferentes Umidades.

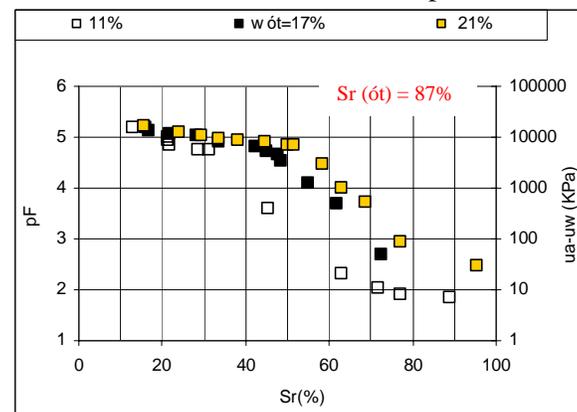


Figura 7.10 - Curvas Características do Solo HB11 Compactado em Diferentes Umidades.

A Figura 7.11 apresenta as curvas características obtidas para o solo ZM6. Nota-se que as curvas características obtidas para o teor de umidade ótimo (21%) e para o ramo seco

(18%) são coincidentes até grau de saturação aproximadamente igual a 60%. A curva característica obtida para o ramo úmido se distingue das demais, localizando-se abaixo. Nesse caso, o deslocamento das curvas está aparentemente ligado à porosidade do solo.

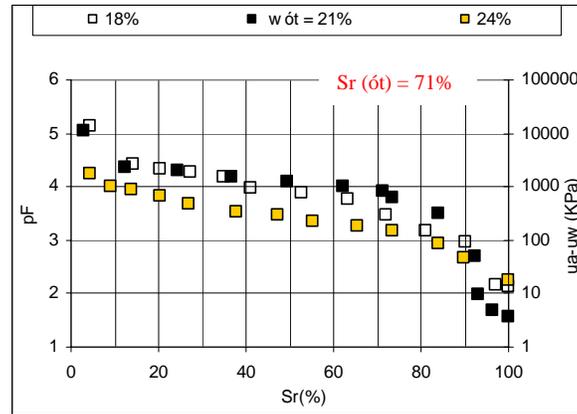


Figura 7.11 - Curvas Características do Solo ZM6 Compactado em Diferentes Umidades.

O solo SF4 (Figura 7.12) apresenta curvas praticamente coincidentes para as três condições de compactação usadas. Neste caso, verifica-se ainda que o comportamento do solo compactado no PN é similar ao da amostra indeformada (Figura 7.4). Neste solo fica evidente a predominância da influência químico-mineralógica sobre os aspectos estruturais tendo em vista que a condição de compactação pouco afetara as curvas características. É importante destacar que, ao contrário dos demais solos estudados nesse tópico, o SF4 é o único rico em illita.

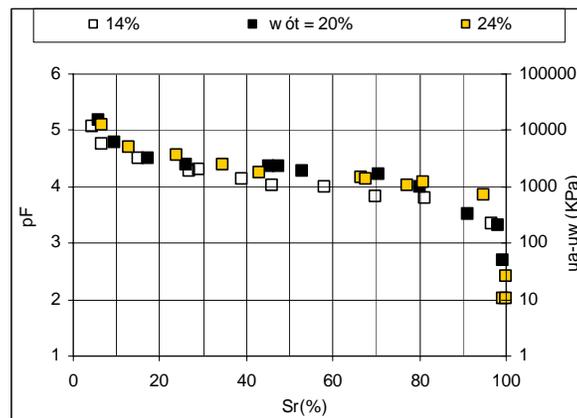


Figura 7.12 - Curvas Características do Solo SF4 Compactado em Diferentes Umidades.

A Figura 7.13 evidencia mais claramente as diferenças estruturais entre os solos HB e ZM, ao comparar as curvas obtidas para o mesmo teor de umidade e sob igual energia. As curvas apresentadas reafirmam a constatação anteriormente colocada de que, as distinções entre as curvas características se encontram diretamente relacionadas à junção dos aspectos texturais, mineralógicos e químicos.

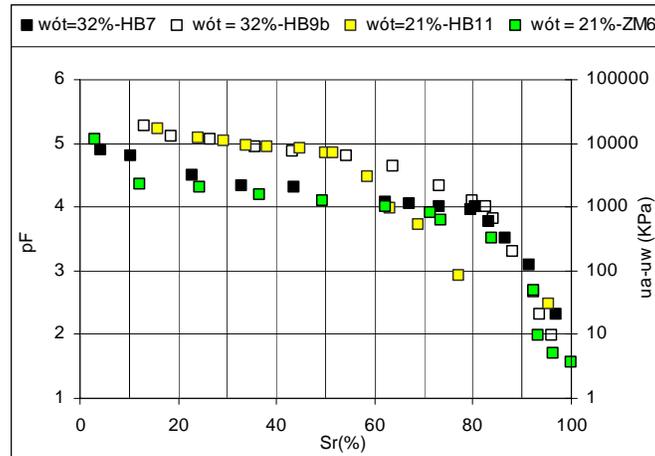


Figura 7.13 - Curvas Características de Amostras Compactadas para Solos HB e ZM.

### 7.2.1.2 – Influência da Energia de Compactação na Curva Característica

Foram determinadas curvas características de amostras compactadas na condição de umidade ótima da energia proctor normal (PN), considerando o esforço de compactação equivalente ao proctor intermediário (PI), para os solos HB11, ZM6 e SF4. Portanto, os corpos de prova foram compactados no ramo úmido da curva de compactação quando considerada a energia intermediária.

As curvas características obtidas para o solo HB11 (Figura 7.14(a)) mostram que há semelhança entre as curvas aproximadamente até o grau de saturação igual a 50%, a partir daí a curva do PI se localiza acima da curva do PN. A diferença entre as curvas características obtidas para a amostra indeformada e as determinadas para as amostras compactadas mostram o papel marcante da desestruturação do solo causada pela compactação.

Para o solo ZM6 (Figura 7.14(b)) o acréscimo da energia de compactação aparentemente não gera qualquer diferença nas curvas características até 50% de grau de saturação, ponto a partir do qual a curva característica obtida para o PN se sobrepõe a obtida para o PI. A diferença entre as duas curvas (PN e PI) provavelmente se deve a mecanismo de

expansão, ligados a diferenças estruturais oriundos, na compactação, no teor de umidade ótimo (no PN) e, no ramo úmido para o PI. Já para o solo SF4 (Figura 7.14(c)) o ponto de saturação até o qual não ocorrem diferenças nas curvas características é 85%, ponto a partir do qual a curva característica obtida para o PN se localiza superior à obtida para o PI. As curvas dessa diferença podem ser consideradas semelhantes às atribuídas para o solo ZM6.

A partir do conjunto de resultados obtidos, infere-se que quanto mais intemperizado é o solo, maior a diferença entre os resultados obtidos para a amostra compactada e as amostras indeformadas. A energia de compactação também mostrou influência mais marcante para os solos mais intemperizados.

De modo geral observa-se coincidência entre as curvas obtidas para as mesmas amostras compactadas para graus de saturação inferiores a 50%, o que dá a idéia que, após a desestruturação do solo com a compactação é a natureza química e mineralógica do solo, que prevalece em detrimento da porosidade, ou seja, o índice de vazios passaria a assumir menor importância. Deve ainda ser ressaltado o modo distinto que se dá a influência do aumento da energia de compactação do solo mais intemperizado (HB11) em relação aos menos intemperizados (ZM6 e SF4). No solo intemperizado, o aumento da energia de compactação diminui a macroporosidade, enquanto nos solos menos intemperizados, interfere na estrutura e, por conseqüência, nos mecanismos de expansão/retração do solo.

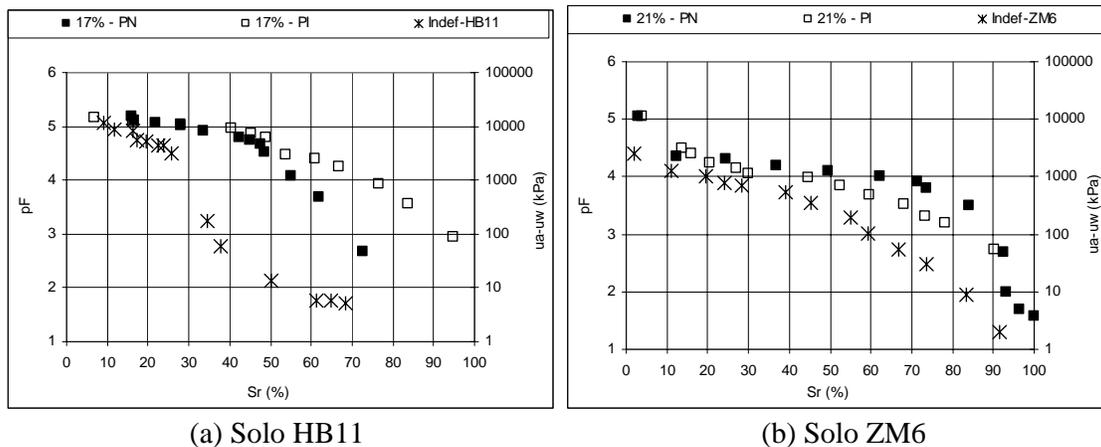
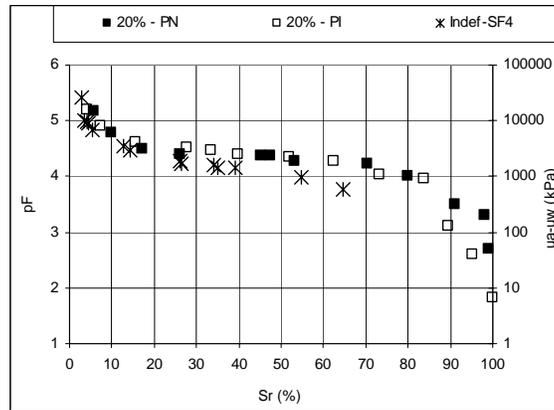


Figura 7.14 - Curvas Características Compactadas na Energia Proctor Intermediária (PI).



(c) Solo SF4

Figura 7.14 - Curvas Características Compactadas na Energia Proctor Intermediária (PI) - Continuação.

### 7.2.2 – Influência da Estabilização Química, da Umidade e da Energia de Compactação na Forma da Curva Característica.

A preparação dos solos para determinação das curvas características obedeceu a critério similar ao adotado para o material natural, apenas considerando a incorporação da cal. Sendo assim, resumem-se os procedimentos usados em: secagem do solo ao ar, destorroamento, peneiramento, determinação da umidade higroscópica, incorporação da cal em percentagem igual a 2% e 6% do peso seco do material, incorporação de água destilada em volume suficiente para se obter a umidade ótima de compactação equivalente ao PN e, posterior compactação. É necessário destacar que a compactação dos solos estabilizados com cal para a obtenção das curvas características foi efetuada após 12 horas de mistura, de forma a seguir critério determinado na norma NBR-7182 (Solo – Ensaio de Compactação), que determina 12 horas como sendo o tempo mínimo para se efetuar a compactação. Para que se tivesse a menor variação possível em relação ao procedimento usado para o material natural, estes também obedeceram a este critério determinado na norma.

Embora a curva característica do solo natural sirva como referência, a influência da estabilização química deverá ser analisada em relação ao solo natural compactado. Como a estabilização química interfere na umidade ótima, no peso específico aparente seco máximo e, na própria forma da curva de compactação, é sempre difícil fazer uma análise comparada dos efeitos dessa no comportamento dos solos. Com isso optou-se, no presente estudo, por fixar a umidade e energia de compactação e permitir a variação do peso específico aparente seco.

Inicialmente adotou-se a umidade ótima obtida para o solo natural como umidade de compactação. Todos os solos estudados foram compactados na energia Proctor Normal e, alguns na energia Proctor Intermediária.

Segundo Rezende (2003) a incorporação de 2% de cal hidratada em peso a um solo silto-arenoso não gerou diferenças significativas em relação ao solo natural, no entanto, com a incorporação de 3% e 6%, as curvas se distinguem através da queda de sucção para valores de saturação superiores a 60%. Contudo, Delgado (2006), mostrou que dependendo do tipo de solo as variações de sucções podem ser consideráveis, muito embora, como mostrado por Rezende (2003), a forma da curva característica seja semelhante a do material sem estabilização com cal.

A seguir são apresentadas às curvas características dos latossolos (Figuras 7.15), da zona mosqueada (Figura 7.16) e dos saprólitos (Figura 7.17) em estudo.

Sabe-se que além do tipo de solo, representado pela composição granulométrica e plasticidade, fatores como o arranjo estrutural, afetam a curva característica do solo natural. Portanto, torna-se difícil a obtenção de curva característica similar a de amostras naturais após o processo de desagregação e compactação dos solos. No entanto, as curvas características determinadas nesta pesquisa para os solos HB9b, HB12, SF2 e SF4 mostram coincidência entre a amostra indeformada e a amostra natural estabilizada com cal e compactada. Tal semelhança indica que o processo de compactação e estabilização com cal aparentemente não conduz a uma melhoria de comportamento desses três solos, quando se considera que esta se encontra diretamente relacionada ao acréscimo de sucção. Avaliando-se preliminarmente, se poderia afirmar que a eventual melhoria da capacidade de suporte com o acréscimo de cal estaria diretamente relacionada com aspectos químicos. Comportamento semelhante foi ainda verificado para o solo SF13 (Figura 7.17(d)), para graus de saturação superiores a 40%. Já para grau de saturação inferior a 40%, o solo SF13 natural apresenta valores mais elevados de sucção.

Os latossolos são solos profundamente intemperizados em que normalmente os poros encontram-se agrupados em macroporos (poros interagregados) e microporos (poros intra-agregados). Observa-se para os latossolos estudados (Figuras 7.15) que, a exceção do solo HB7, eles apresentam para o material compactado curvas características semelhantes entre os solos naturais e estabilizados, ao se considerar o domínio dos microporos. No domínio dos macroporos, as curvas se distinguem, principalmente quando ocorrem variações significativas de peso específico entre o material natural e o estabilizado, conforme se observa nos resultados de peso específico apresentados na Tabela 6.2. Portanto, nos latossolos,

aparentemente a influência da estabilização química com cal sobre a forma da curva característica se deve a alteração da macroporosidade por efeito da ação química da cal. A forma como ocorre a alteração da curva característica depende de como se dá a intervenção da cal na interação entre partículas, agregando-as ou desagregando-as.

Avaliando-se o comportamento dos latossolos (Figuras 7.15) verifica-se que, para a maioria dos solos estudados, a curva característica do material compactado sem estabilização tende a se destacar das demais. A tendência das curvas do solo natural compactado se localizarem acima das obtidas para o material estabilizado, registrada para os solos HB7, HB9b e HB10, coloca em evidência a agregação gerada pela cal nesses solos. Já os solos HB11, HBR1 e HBR2 apresentam tendência contrária, isto é, a curva do material estabilizado situa-se em posição inferior as demais obtidas para o material compactado, o que indica desagregação gerada pela cal. Destaca-se que no caso do solo HB11 ocorreu desagregação para 2% de cal e, este tornou a agregar para 6% de cal.

Conforme já observado por Rezende (2003), as Figuras 7.15 mostram que o teor de cal necessário para alterar a forma da curva característica, nas condições de ensaio analisadas, depende do tipo de solo; não tendo sido, no entanto, possível associar tais comportamentos as características texturais, químicas e mineralógicas de modo isolado. Destaca-se, no entanto, que os solos HB7 e HB11, para os quais foram necessários mais de 2% de cal para alterar a forma da curva característica em relação à obtida para o solo natural compactado, são solos que apresentam valores positivos de  $\Delta\text{pH}$ , apontando assim para a importância do nível de intemperização do solo.

Para os solos coletados na Zona Mosqueada, a Figura 7.16 mostra comportamento distinto dos latossolos. É interessante notar que o solo ZM3 (Figura 7.16(a)) apresenta melhor comportamento no estado indeformado do que no compactado e, ainda que ao se processar a compactação ocorre, para graus de saturação inferiores a 40%, acréscimo da sucção ao se passar de 2% para 6% de cal. Tal comportamento indica que apesar de se verificar a floculação, esta não é suficiente para que a estruturação destes materiais se aproxime da organização do solo em estado natural. Contudo, é preciso destacar que a porosidade do solo natural é inferior à do solo compactado, daí a diferença de comportamento entre as amostras nos dois estados. No solo ZM6 (Figura 7.16(b)) apesar da curva característica obtida para a amostra compactada com 0% de cal apresentar valores de sucção superiores aos demais, ao se incorporar 2% de cal a curva se desloca para baixo e, ao crescer este teor para 6% de cal, esta retorna para uma localização ligeiramente inferior a da curva com 0% de cal incorporada. Esta tendência conduz a idéia de um comportamento inicialmente agregador, com 2% de cal, e,

posteriormente à ocorrência de desagregação suficiente para o material se reaproximar da estrutura do solo natural.

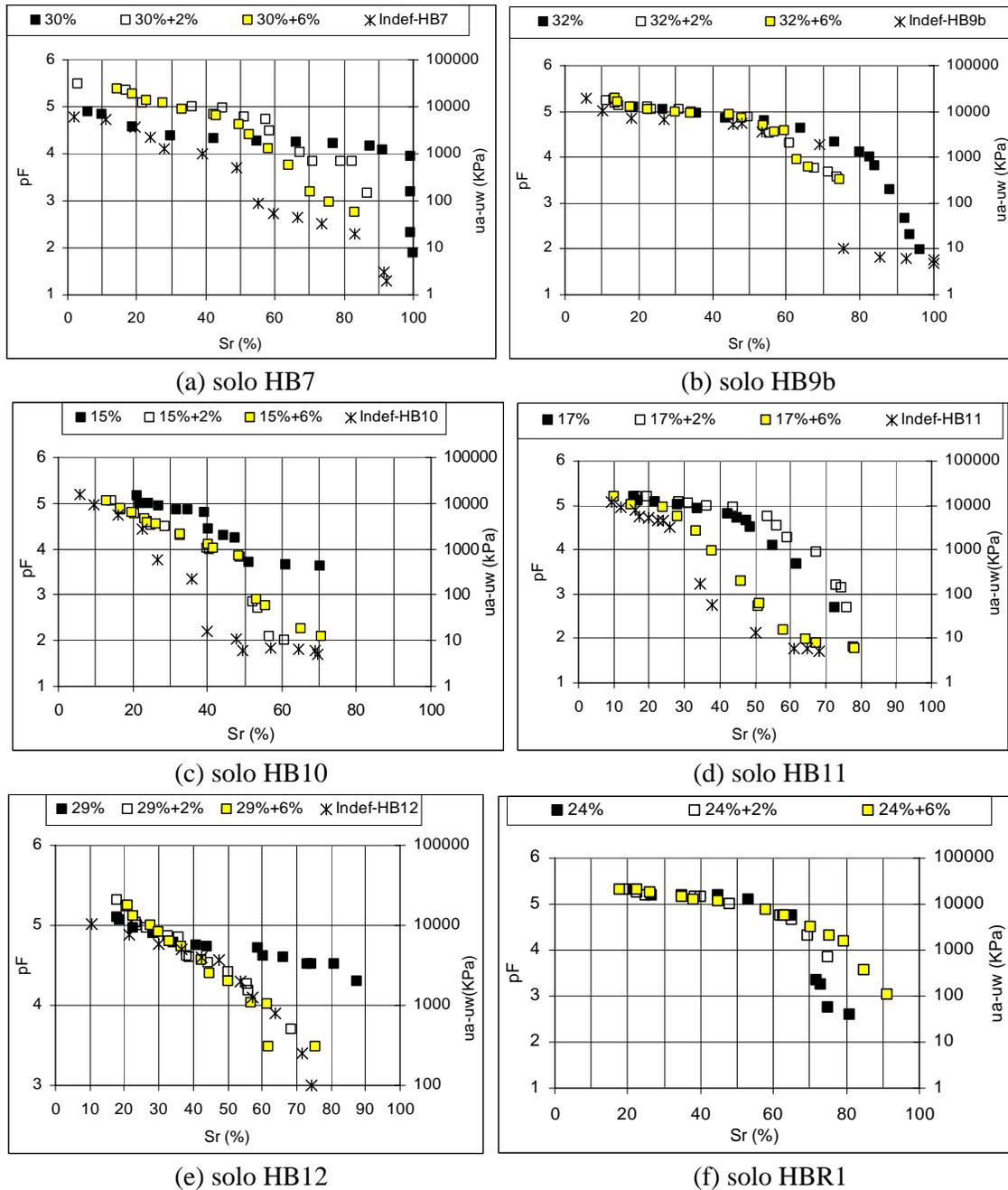
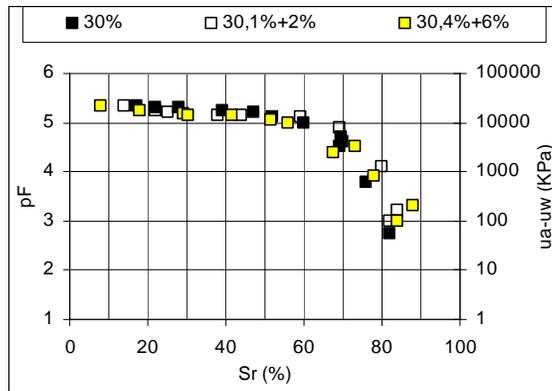
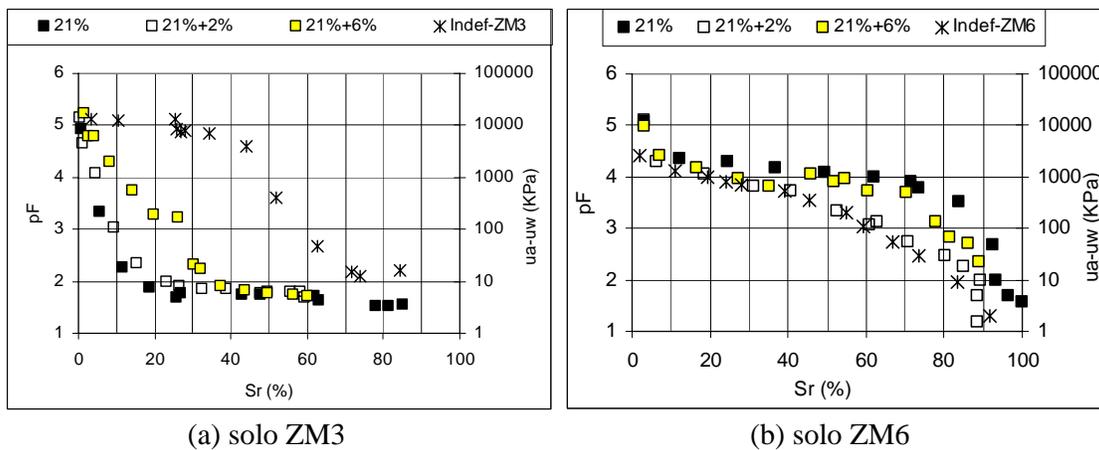


Figura 7.15 - Curvas Características dos Latossolos Estabilizados Quimicamente. (Energia Proctor Normal - PN)



(g) solo HBR2

Figura 7.15 - Curvas Características dos Latossolos Estabilizados Quimicamente - Continuação. (Energia Proctor Normal - PN).



(a) solo ZM3

(b) solo ZM6

Figura 7.16 - Curvas Características dos Solos pertencentes à Zona Mosqueada Estabilizados Quimicamente. (Energia Proctor Normal - PN)

Analisando-se as curvas características obtidas para os Solos Saprólíticos (Figuras 7.17) notam-se tendências comportamentais distintas. Como já comentado, as curvas características dos solos SF2 (Figura 7.17(a)) e SF8 (Figura 7.17(c)) apresentam tendência comportamental, com a incorporação da cal, semelhante para os diferentes teores de cal. Já para os solos SF13 (Figura 7.17(d)) e SF4 (Figura 7.17(b)), os comportamentos das curvas características se assemelham as do solo HB7, onde se verifica o papel flocculador da cal. Observa-se apenas que, o ponto de saturação em que ocorre mudança comportamental, ou seja, tem início à flocculação, passa de 60% para 90% de grau de saturação, no solo SF4. Esta variação é provavelmente decorrente da química e mineralogia do solo. De forma geral, pode-se afirmar que as formas das curvas características dos saprólitos estudados mostram-se pouco sensíveis

a estabilização com a cal, apesar de algumas pequenas variações registradas para a condição de umidade de compactação ótima do material natural obtida na energia PN.

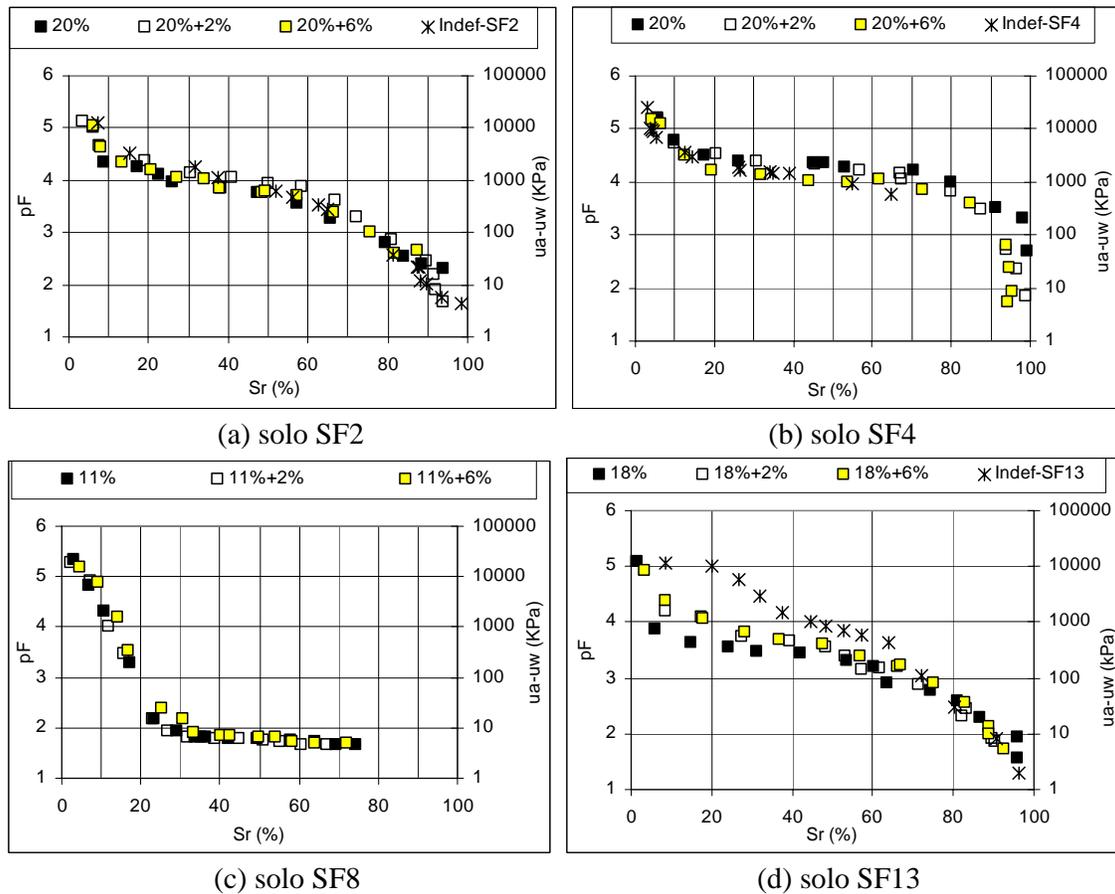


Figura 7.17 - Curvas Características dos Solos Saprolíticos Estabilizados. (Energia Proctor Normal - PN)

Ao plotar as curvas características obtidas para as amostras estabilizadas de diferentes materiais, que apresentaram teores de umidade ótima semelhantes (Figuras 7.18), é possível observar mais claramente a influência do tipo de solo na estabilização com cal, através do seu papel como agente floculador e, em alguns casos, agente defloculador. Nota-se ainda que à medida que a cal é incorporada aos latossolos à forma das curvas características tende a retornar a bimodalidade, sendo este comportamento em alguns solos bem mais nítido. Tais observações conduzem à idéia de que a distribuição de poros e a própria porosidade seriam os principais agentes definidores da posição das curvas características desses solos quando da estabilização com cal.

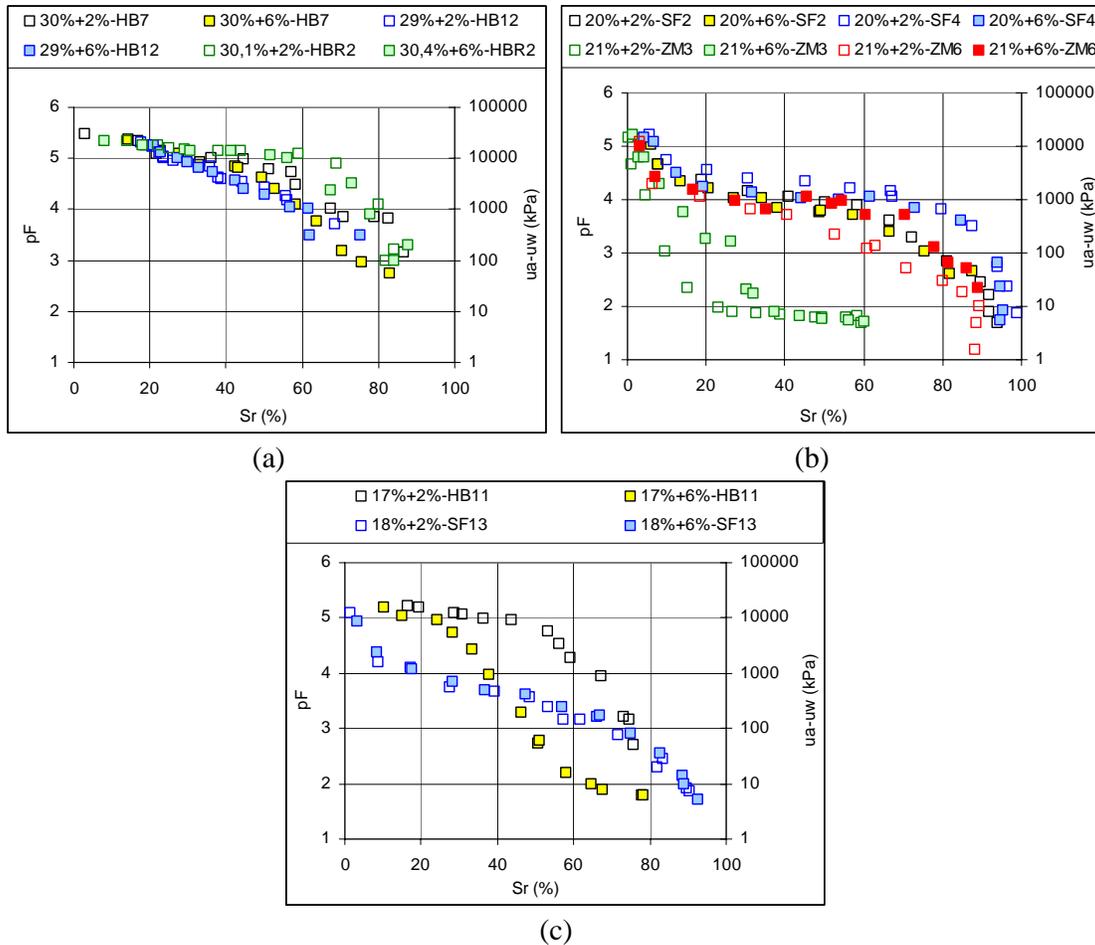


Figura 7.18 - Curvas Características de Solos Estabilizados.  
(Energia Proctor Normal).

### 7.3 – INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO NA FORMA DA CURVA CARACTERÍSTICA

Existem controvérsias sobre o tempo de equalização entre a sucção do papel e a do solo. O tempo exigido pela norma é 7 dias, o que foi confirmado por Swarbrick (1995), independente do nível de sucção. Há autores que sugerem prazos diferentes, como Marinho (1995) e Ridley (1995), que recomendam para valores baixos de sucção total, um tempo de equalização maior (cerca de 14 dias para sucções da ordem de 200kPa).

O presente subitem tem por finalidade contribuir com as pesquisas já efetuadas verificando se a diferença de tempos de equilíbrio é realmente significativa ou para que tipo de material esta variação pode ser considerada importante. Para tal optou-se por usar tempos

de equalização ou equilíbrio de 15 dias (Marinho (1995)) e 30 dias. Foram estudados 3 tipos de solo no estado natural e estabilizado com 2% de cal.

Foram estudadas as conseqüências da variação do tempo de estabilização nos solos estabilizados, tendo em vista a necessidade da cura para as misturas de solo melhorado com cal e do solo-cal.

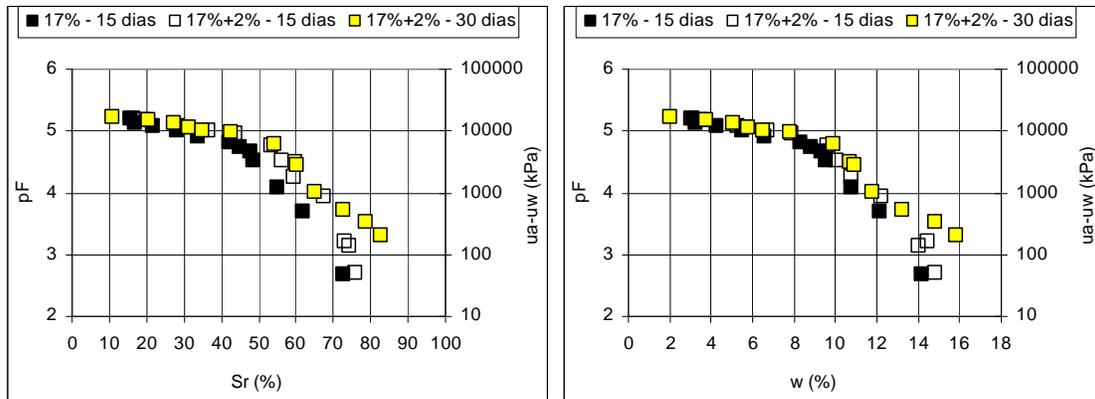
As Figuras 7.19, 7.20 e 7.21 mostram as curvas características determinadas para os tempos de estabilização de 15 dias e de 30 dias, considerando-se as Trajetórias de Umedecimento (TU) e Mista (TM).

As Figuras 7.19 e 7.20 mostram que tanto para a trajetória de umedecimento como para a mista, o tempo de cura afeta a forma da curva característica. Cabe destaque o fato de que para o solo HB11 (Figura 7.19) a diferença de comportamento só surge a partir de 50% de grau de saturação, ocorrendo, no entanto, inversão nos resultados obtidos para a trajetória de umedecimento em relação aos obtidos para a trajetória mista.

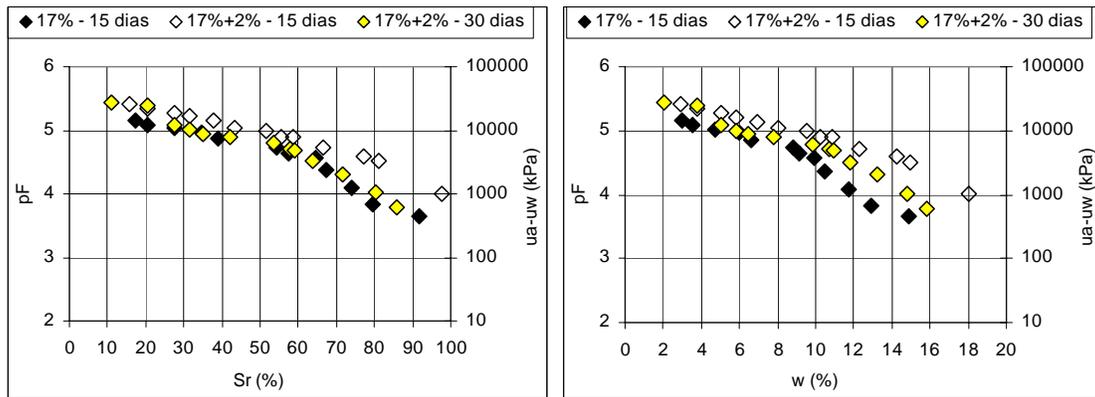
Para o solo ZM6 (Figura 7.20) os resultados obtidos para 15 e 30 dias são coincidentes para a trajetória mista a partir do grau de saturação de 40%. Abaixo desse grau de saturação a curva característica obtida para o tempo de cura de 30 dias se sobrepõe à obtida para 15 dias. Já para a trajetória de umedecimento, as curvas características obtidas para 15 e 30 dias são distintas para graus de saturação superiores a 10%.

Para o solo SF4 (Figura 7.21) verificam-se maiores valores de sucção para o tempo de cura de 30 dias, apenas para graus de saturação superiores a 90%, ou seja, quando a sucção diminui. Um ponto importante a notar neste material, é a existência de tensões de sucção consideráveis (de 30 a 50 kPa) para saturação próxima a 100%, na trajetória de umedecimento e de 110 kPa na trajetória mista.

Tem-se, portanto, que embora agindo de modo distinto, as curvas características dos solos aqui analisados são afetadas pelo tempo de cura.

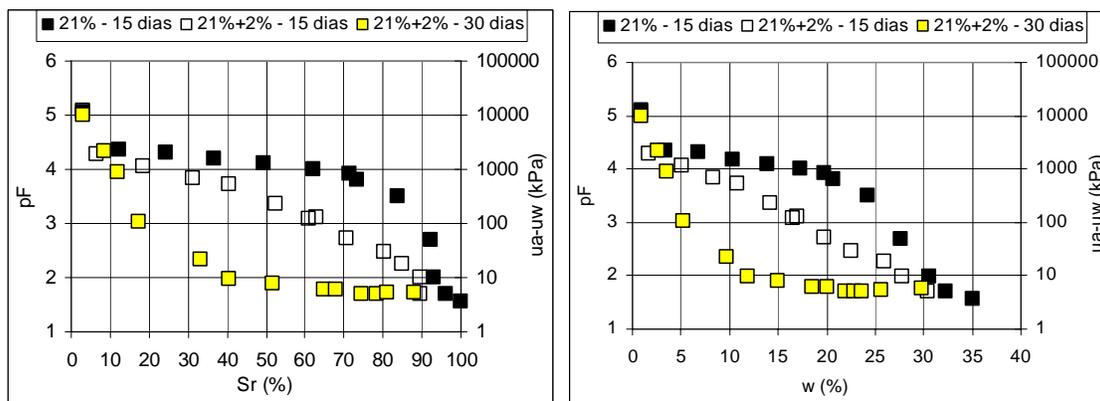


(a) Solo HB11 - TU



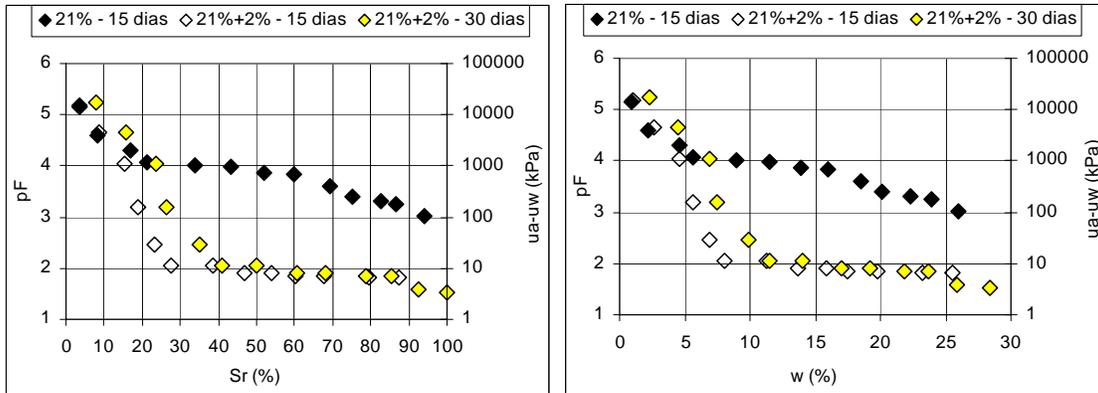
(b) Solo HB11 - TM

Figura 7.19 - Curvas Características do Solo HB11 – 15 e 30 dias.



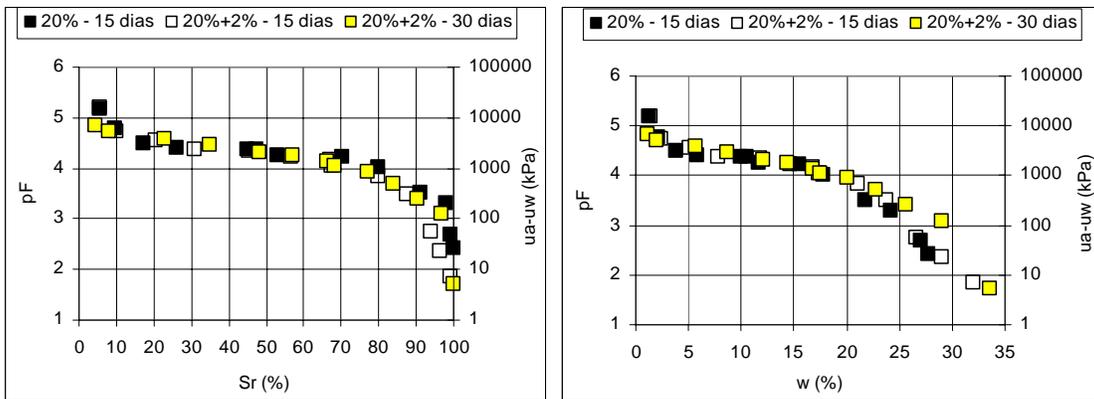
(a) Solo ZM6 - TU

Figura 7.20 - Curvas Características do Solo ZM6 – 15 e 30 dias.

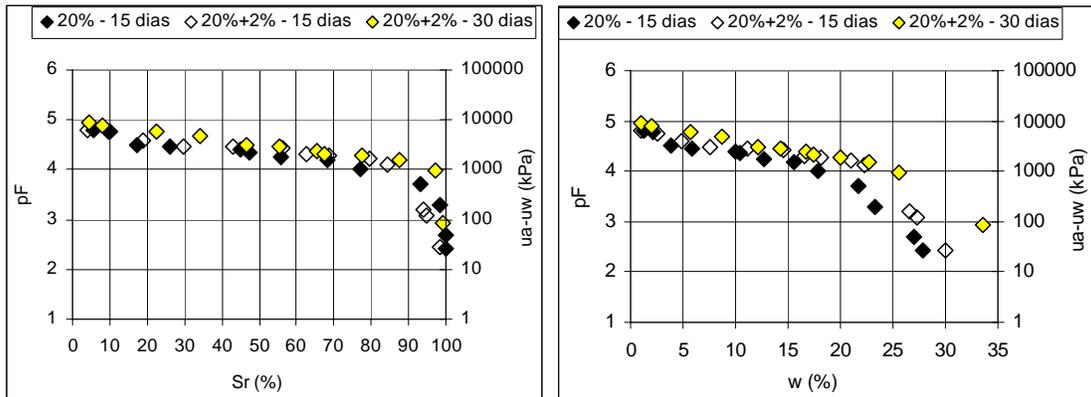


(b) Solo ZM6 - TM

Figura 7.20 - Curvas Características do Solo ZM6 – 15 e 30 dias - Continuação.



(a) Solo SF4 - TU



(b) Solo SF4 - TM

Figura 7.21 - Curvas Características do Solo SF4 – 15 e 30 dias.

## 7.4 – EFEITO DA TRAJETÓRIA DE VARIAÇÃO DE UMIDADE NA FORMA DA CURVA CARACTERÍSTICA

Normalmente as curvas características são determinadas de dois modos: (a) secando-se inicialmente a amostra ou o conjunto de amostras, segundo a técnica de ensaio adotada, e em seguida, proporciona-se a redução progressiva da sucção por meio do aumento da umidade do solo (trajetória de umedecimento - TU); (b) saturando-se o corpo de prova ou conjunto de corpos de prova, segundo a técnica de ensaio adotada e, em seguida progressivamente vai-se aumentando a sucção por meio da redução da umidade (trajetória de secagem - TS). Dado o fenômeno da histerese as curvas características obtidas pelos dois procedimentos não são geralmente coincidentes. Estes procedimentos não correspondem, no entanto, ao que ocorre no campo, tanto para os solos naturais quanto para os solos compactados. No campo, a partir de certa umidade de equilíbrio, o solo vai secar em período de seca e umedecer em período de chuva, diminuindo ou aumentando a sucção matricial. Uma vez que a metodologia de determinação da trajetória mista contempla a execução de parte dos pontos que compõe a curva seguindo a trajetória de secagem e os demais seguem a de umedecimento, esta se aproxima com maior exatidão do mecanismo de secagem e umedecimento que ocorre em campo.

Inicialmente apresentam-se as Figuras 7.22, 7.23 e 7.24 das curvas características obtidas para amostras HB11, ZM6 e SF4 compactadas na condição ótima ( $w_{ót}$  e  $\gamma_{dmáx}$ ) da energia PN.

A Figura 7.22 mostra que para valores de sucção superiores à  $pF$  igual a 4,5 (3680 kPa) o solo HB11 apresenta, tanto para amostras compactadas como indeformadas, semelhança nos trechos de curva característica obtidos para as duas trajetórias de variação de umidade (TU e TM). A partir dessa sucção, tanto para a amostra natural como para a compactada, os pontos obtidos pela trajetória mista se sobrepõem aos da trajetória de umedecimento. Portanto, os resultados mostram que a trajetória de umedecimento conduz a valores de sucção inferiores aos que ocorreria em campo, subestimando a sucção matricial do solo e, assim, a capacidade de resistência do mesmo.

Para os solos ZM6 (Figura 7.23) e SF4 (Figura 7.24) as duas trajetórias de variação de umidade forneceram, tanto para as amostras indeformadas quanto para as compactadas, curvas características que se sobrepõem.

Os resultados mostram, portanto, que o solo HB11 mostrou-se mais sensível à trajetória de umedecimento na zona de macroporosidade, enquanto que os solos SF4 e ZM6 foram pouco

afetados pela trajetória de umedecimento. Logo, a histerese parece depender do nível de intemperização pelo qual passou o solo.

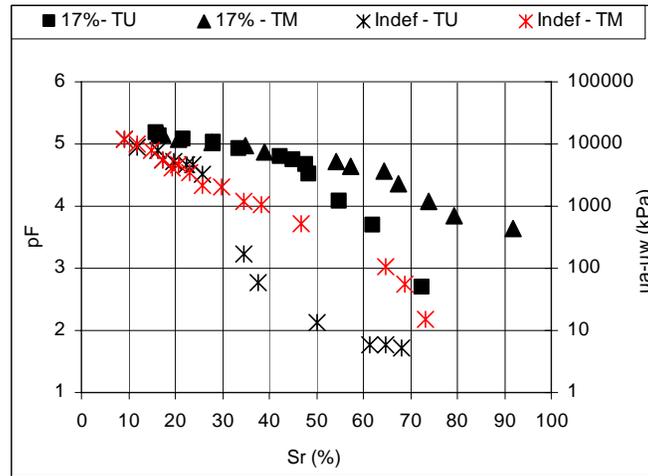


Figura 7.22 - Curvas Características do Solo HB11 na (TU) e na (TM) para wót de Compactação e Tempo de Equilíbrio de Sucção igual a 15 dias.

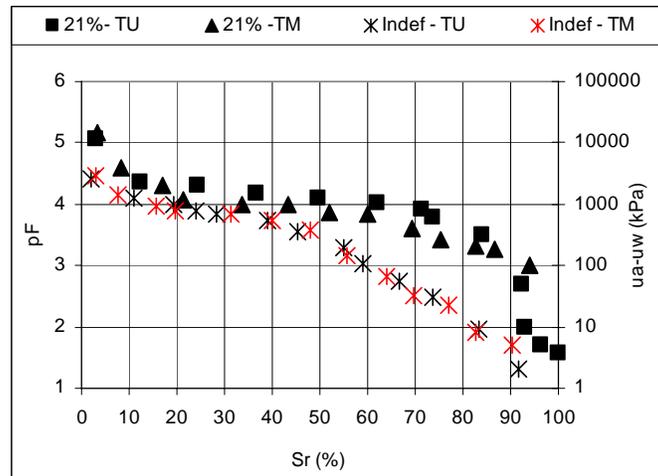


Figura 7.23 - Curvas Características do Solo ZM6 na (TU) e na (TM) para wót de Compactação e Tempo de Equilíbrio de Sucção igual a 15 dias.

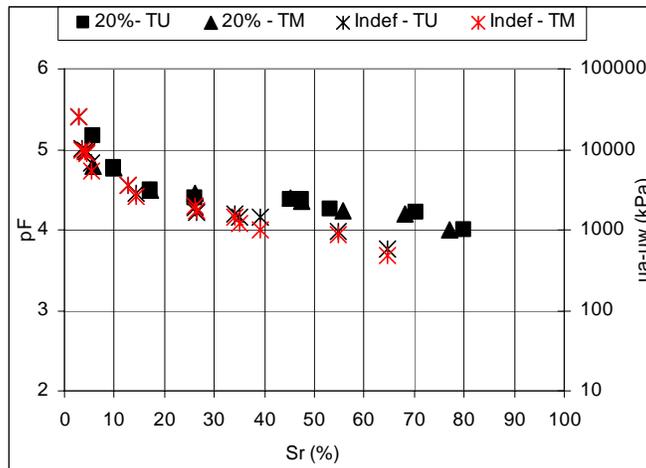


Figura 7.24 - Curvas Características do Solo SF4 na (TU) e na (TM) para wót de Compactação e Tempo de Equilíbrio de Sucção igual a 15 dias.

Visando verificar o reflexo que a incorporação da cal tem nas curvas características obtidas segundo a trajetória de umedecimento e a trajetória mista, as Figuras 7.25, 7.26 e 7.27 apresentam as curvas características determinadas como os solos HB11, ZM6 e SF4 considerando a incorporação de 2% de cal hidratada. No caso, adotou-se tempo de equalização de 15 dias.

Para o solo HB11 (Figura 7.25) ao se comparar às curvas características obtidas para a trajetória de umedecimento com as obtidas na trajetória mista para o solo-cal, observa-se que o fenômeno da histerese é mais importante nesse solo para a condição estabilizada que para a natural. Em ambos os casos, a histerese destaca-se apenas no domínio dos macroporos. Para o solo ZM6 (Figura 7.26) a histerese ocorre apenas para a condição estabilizada no domínio dos microporos. Já para o solo SF4 (Figura 7.27) praticamente não ocorre histerese entre as trajetórias mista e a de umedecimento.

Do ponto de vista prático o modo como se definiu a curva característica mostrou-se relevante para os solos HB11 e ZM6. É importante destacar que ao se plotar as curvas como função de grau de saturação se incorpora o efeito de eventuais variações de índice de vazios.

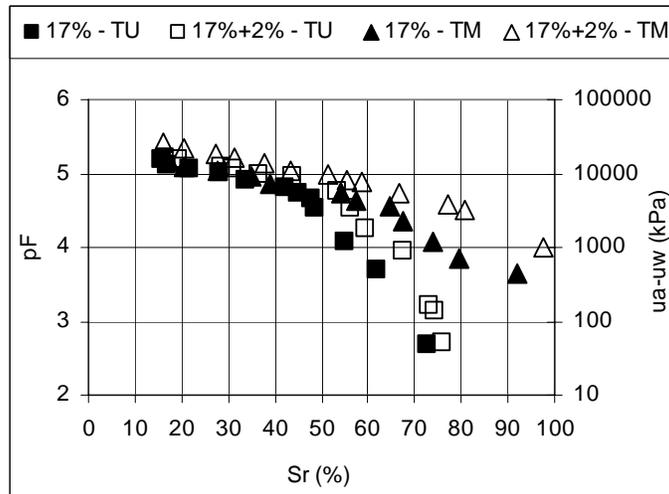


Figura 7.25 - Curvas Características do Solo HB11 Natural e Estabilizado.

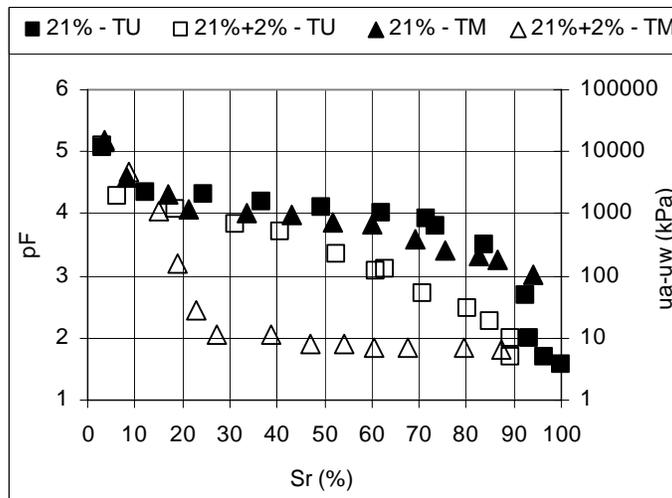


Figura 7.26 - Curvas Características do Solo ZM6 Natural e Estabilizado.

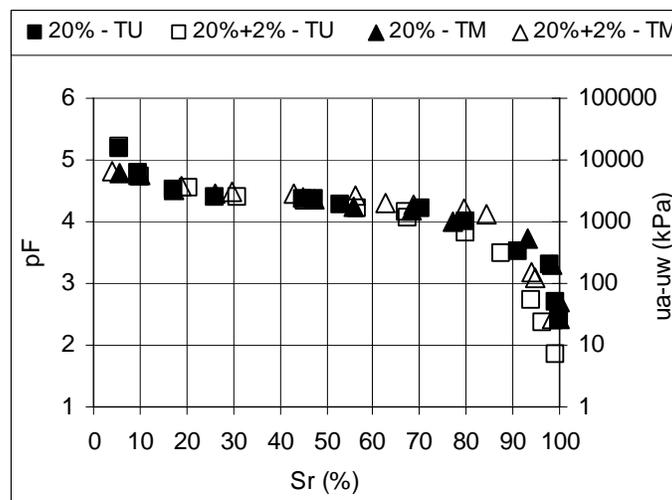


Figura 7.27 - Curvas Características do Solo SF4 Natural e Estabilizado.

## 8 – RESISTÊNCIA DOS SOLOS COMPACTADOS

Como detalhado no capítulo de Materiais e Métodos (Cap.3) foram usados dois procedimentos distintos de compactação, um deles denominado dinâmico e outro estático. Destaca-se que visando estudar o comportamento dos solos foi usada apenas a compactação dinâmica, limitando-se a compactação estática apenas algumas curvas características apresentadas no capítulo 7.

Uma vez que o presente trabalho tem por finalidade analisar o comportamento mecânico dos solos finos tropicais característicos do Distrito Federal, em condições não saturadas, torna-se essencial verificar o efeito da sucção para a melhoria da capacidade de suporte, o que justifica a determinação do valor da sucção para cada amostra compactada. A Tabela 8.1 sintetiza as diferentes condições de compactação usadas para a realização desta parte da pesquisa, observando-se que foram usadas misturas de solo-cal, com a incorporação da cal em diferentes teores, e ainda considerando diferentes umidades de compactação.

Tabela 8.1 – Corpos de Prova Compactados para Ensaio de Resistência (mini-CBR).

| Solo | cal | wót-6%w | wót - 4%w | wót - 3%w | wót - 2%w | wót - 1%w | wót | wót + 2%w | wót + 3%w | wót + 4%w | Δ golpes        | Total de CP |
|------|-----|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------------|-------------|
| HB7  | 0%  |         | x         |           |           | x         | x   | x         |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 60          |
| HB7  | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB7  | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB7  | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB9b | 0%  |         | x         |           |           |           | x   | x         |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 45          |
| HB9b | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB9b | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB9b | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB10 | 0%  |         |           |           | x         |           | x   | x         |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 45          |
| HB10 | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB10 | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB10 | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB11 | 0%  | x       | x         |           | x         |           | x   | x         |           | x         | 2, 5, 8, 12, 20 | 90          |
| HB11 | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB11 | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB11 | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB12 | 0%  |         |           | x         |           |           | x   |           | x         |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 45          |
| HB12 | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB12 | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HB12 | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HBR1 | 0%  |         |           | x         |           |           | x   | x         |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 45          |
| HBR1 | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HBR1 | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HBR1 | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HBR2 | 0%  |         | x         |           |           |           | x   | x         |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 45          |
| HBR2 | 3%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| HBR2 | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM3  | 0%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM3  | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM3  | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM3  | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM6  | 0%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM6  | 2%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM6  | 4%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| ZM6  | 6%  |         |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |

Tabela 8.1 – Corpos de Prova Compactados para Ensaio de Resistência (mini-CBR) –  
Continuação.

| Solo         | cal | wót - 6%w | wót - 4%w | wót - 3%w | wót - 2%w | wót - 1%w | wót | wót + 2%w | wót + 3%w | wót + 4%w | Δ golpes        | Total de CP |
|--------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------------|-------------|
| SF2          | 0%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF2          | 2%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF2          | 4%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF2          | 6%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF4          | 0%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF4          | 2%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF4          | 4%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF4          | 6%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF8          | 0%  |           |           |           | x         |           | x   | x         |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 45          |
| SF8          | 2%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF8          | 4%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF8          | 6%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF13         | 0%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF13         | 2%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF13         | 4%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| SF13         | 6%  |           |           |           |           |           | x   |           |           |           | 2, 5, 8, 12, 20 | 15          |
| <b>TOTAL</b> |     |           |           |           |           |           |     |           |           |           |                 | <b>1065</b> |

### 8.1 – EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO (N) NA SUCCÃO (pF) E NO ÍNDICE DE VAZIOS (e)

Este subitem tem como objetivo específico verificar a variação da sucção em função do índice de vazios e da energia de compactação aplicada, para diferentes solos e umidades de compactação. Sabendo-se que a resistência à penetração dos solos cresce com a sucção em maior ou menor proporção dependendo das características do solo, torna-se importante conhecer a variação desta tensão com a energia de compactação usada. A energia de compactação por sua vez é responsável pela alteração do índice de vazios. A partir da variação da sucção com o índice de vazios e com a energia de compactação, tem-se como avaliar a sensibilidade dos diferentes tipos de solo ao processo de compactação. No decorrer da realização dos ensaios de laboratório realizados para esta pesquisa verificou-se que, variações consideráveis de sucção não indicam necessariamente uma melhoria considerável de resistência, assim como o inverso também pode ser afirmado.

As Figuras 8.1 a 8.6 mostram, para os três grupos de solos estudados, a variação da sucção com o índice de vazios (“e”) para diferentes energias e umidades de compactação. As variações de umidade foram adotadas com vistas a abordar as diferentes situações que podem ocorrer em campo e, as diferenças de “e” estão diretamente relacionadas com a energia de compactação e com a própria umidade usada, ou seja, com os diferentes pesos específicos obtidos após a compactação das camadas do pavimento em umidades e energias pré-definidas.

As Figuras 8.1, 8.2 e 8.3 apresentam inicialmente as variações de sucção com o índice de vazios para os solos compactados na condição natural, ou seja, com 0% de cal incorporada. Acima de cada Figura é apresentada legenda com os valores das umidades de compactação

usadas, conjuntamente com as cores que vão designar cada umidade. Para a energia de compactação, aqui representada pela variação de número de golpes (N), são apresentados diferentes símbolos que conjuntamente com a cor (umidade) representa a condição de compactação estudada.

A partir do conjunto de resultados obtidos para os latossolos, pode-se afirmar que, a sucção varia com o tipo de solo, energia e umidade de compactação.

Sinteticamente, o conjunto de resultados obtidos para os latossolos estudados (Figuras 8.1) mostra que:

(a) de modo geral, a variação da sucção com a energia de compactação, para cada uma das diferentes umidades de compactação trabalhadas, depende das características físico-químicas e mineralógicas do solo. É importante ainda destacar que mesmo para os solos em que a sucção praticamente não varia com a energia de compactação, ao se considerar o conjunto de umidades ensaiadas a variação da sucção é bastante significativa;

(b) observa-se dos resultados apresentados que a variação da sucção com o índice de vazios é maior nos solos arenosos (HB10, HB11), intermediária nos solos siltosos (HBR2) e menor nos solos argilosos (HB7 e HBR1);

(c) a influência da umidade de compactação na sucção é aparentemente maior nos solos mais arenosos. Esta constatação indica que nestes solos, o índice de vazios tem maior influência sobre a sucção; enquanto que nos solos argilosos predomina a influência da umidade, o que condiz com o comportamento esperado.

De modo geral, as menores variações do índice de vazios com a energia de compactação foram registradas para o ramo úmido da curva de compactação, sendo que nesse caso, alguns solos apresentaram variação da sucção (HB9b e HB11), apesar do índice de vazios manter-se praticamente constante. Os latossolos argilosos apresentam-se geralmente agregados, como é o caso particular desses dois solos (Tabela 4.4). Sabe-se que no ramo úmido não se consegue melhoria de compactação com o aumento da energia, porque parte dela é transmitida à água, fazendo com que a energia efetiva diminua. No entanto, a estrutura pode alterar, afetando a sucção, apesar do índice de vazios ser mantido praticamente constante.

De forma similar aos latossolos, o comportamento das curvas de sucção pelo índice de vazios para os solos pertencentes à zona mosqueada (Figuras 8.2) e para os solos saprolíticos (Figuras 8.3) mostram que a influência da umidade na variação da sucção com o índice de vazios e, portanto, com a energia de compactação, depende das características dos solos. Ao se considerar o conjunto das umidades de compactação trabalhadas observa-se que, de modo

geral, as variações de sucção com o índice de vazios são menores para os solos SF e ZM que as verificadas para os solos HB. É importante observar dois aspectos que nos solos ZM3 e SF8, ricos em quartzo (%quartzo > 80%, Tabela 5.4), a sucção variou pouco com o índice de vazios e que nesses solos a sucção foi muito inferior à medida nos demais solos. Sendo assim, aparentemente, a partir de um determinado teor de quartzo a sucção varia pouco com o índice de vazios e mantém-se pequena. Isso provavelmente se deve ao fato dos macroporos passarem a predominar no solo.

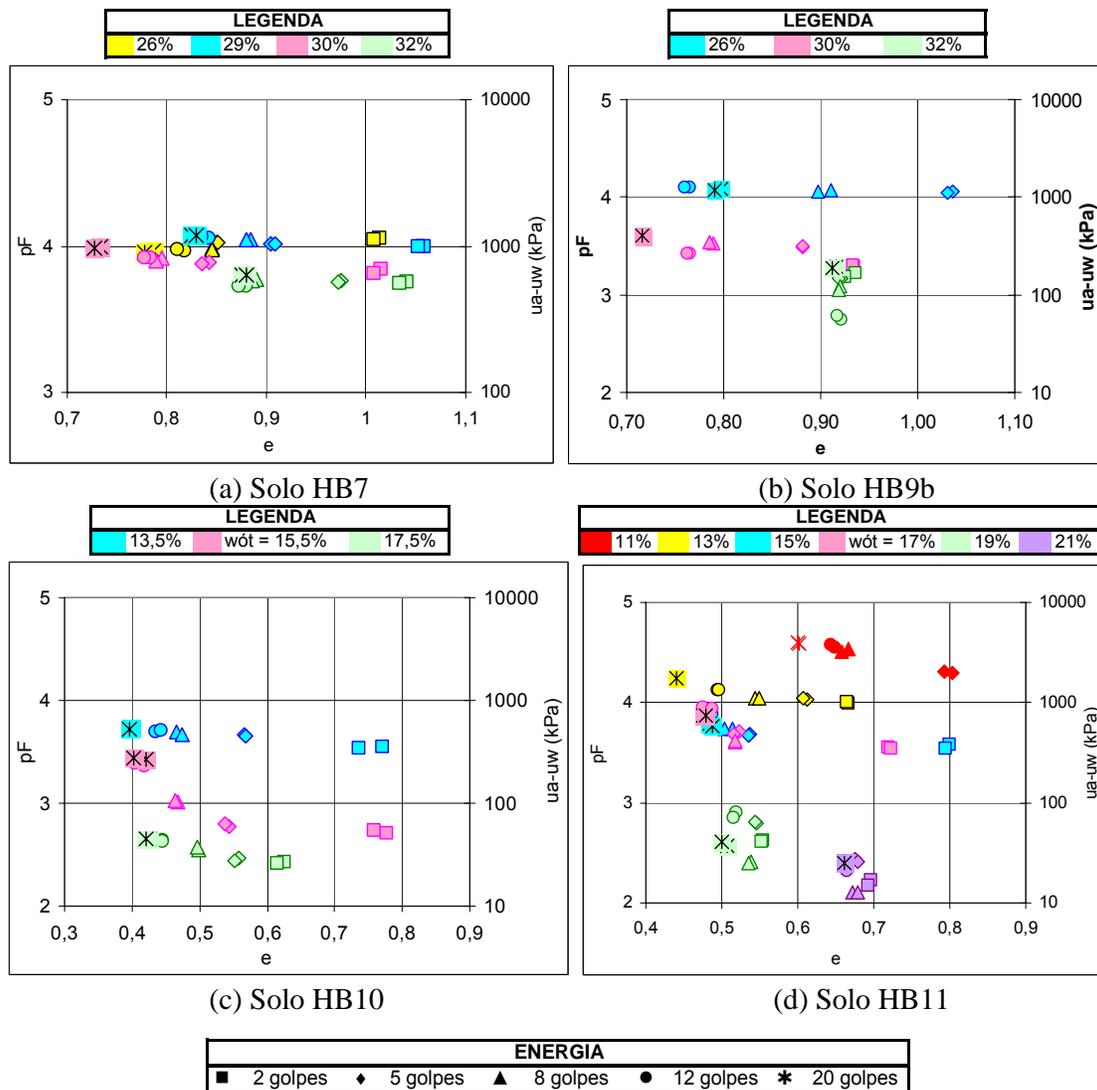


Figura 8.1 - Curvas pF x e para Diferentes Umidades - Solos HB.

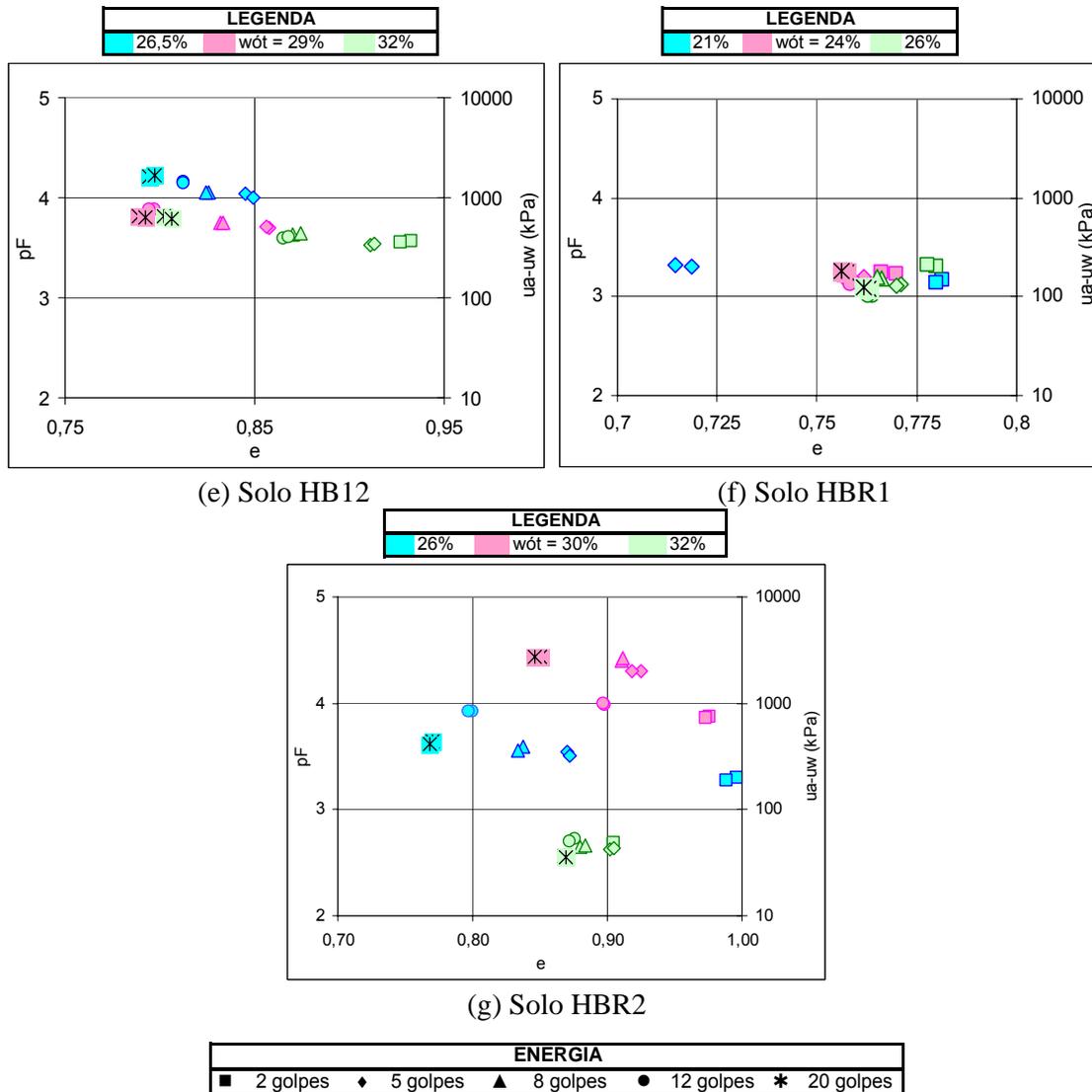


Figura 8.1 - Curvas pF x e para Diferentes Umidades - Solos HB - Continuação.

Para os solos pertencentes à zona mosqueada se verificam baixos valores de sucção assim como a quase coincidência entre as curvas obtidas para o solo ZM3, o que pode indicar valores de resistência bastante similares em se considerando a influência da sucção na resistência. É interessante destacar que, os valores de sucção baixos (pF variando entre 1 e 2) obtidos já apontam para solos granulares, conforme pode ser verificado no solo ZM3 (Figura 8.2(a)) e no SF8 (Figura 8.3(c)).

É curioso observar que para o solo ZM6 (Figura 8.2(b)) na umidade de compactação correspondente ao ramo seco, à sucção, como esperado, diminui com o aumento do índice de vazios, já para a umidade ótima ela se mantém e, para o ramo úmido, ao contrário do esperado

ela aumenta, caracterizando assim, a importância da estrutura para esse solo. Ressalta-se ainda que para o solo ZM6 são verificados valores de sucção superiores as do solo ZM3, o que a princípio aponta para valores de resistência também superiores, tais valores estando diretamente relacionados aos aspectos: estrutural, textural (silte areno-argiloso), químico e mineralógico do material.

Como já citado, para os solos saprolíticos (Figuras 8.3) também foram verificadas diferenças pouco significativas entre as curvas de variação de sucção pelo índice de vazios, excetuando-se apenas o solo SF13 compactado no ramo seco e na umidade ótima (Figura 8.3(d)).

De forma a melhor visualizar o papel da energia de compactação na variação de índice de vazios e ainda, determinar a efetividade da energia de compactação para cada solo, são plotados nas Figuras 8.4 a 8.6, os resultados de “e” versus a energia de compactação aplicada (N).

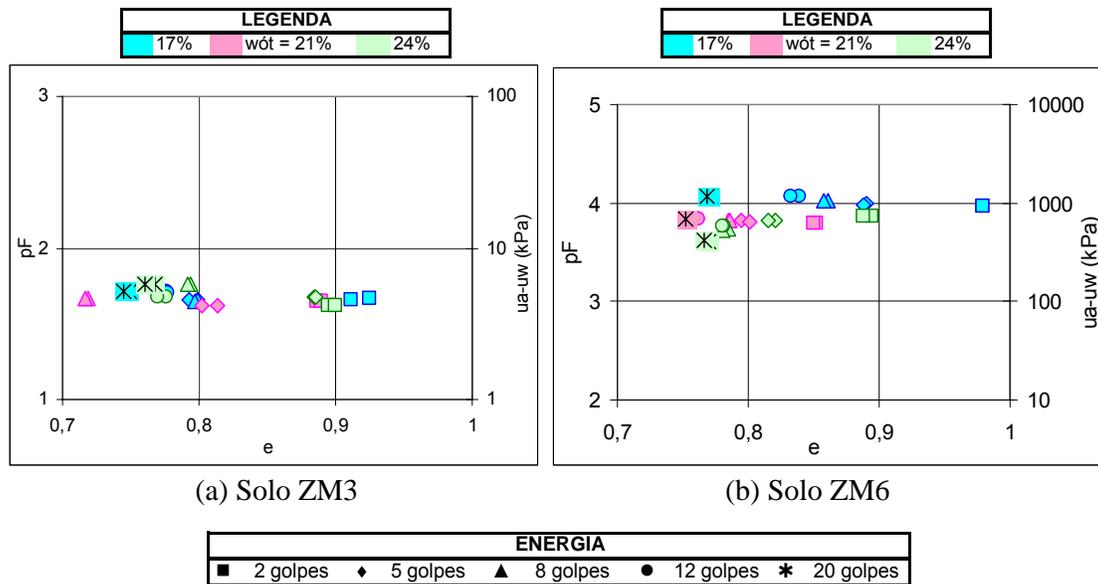


Figura 8.2 - Curvas pF x e para Diferentes Umidades - Solos ZM.

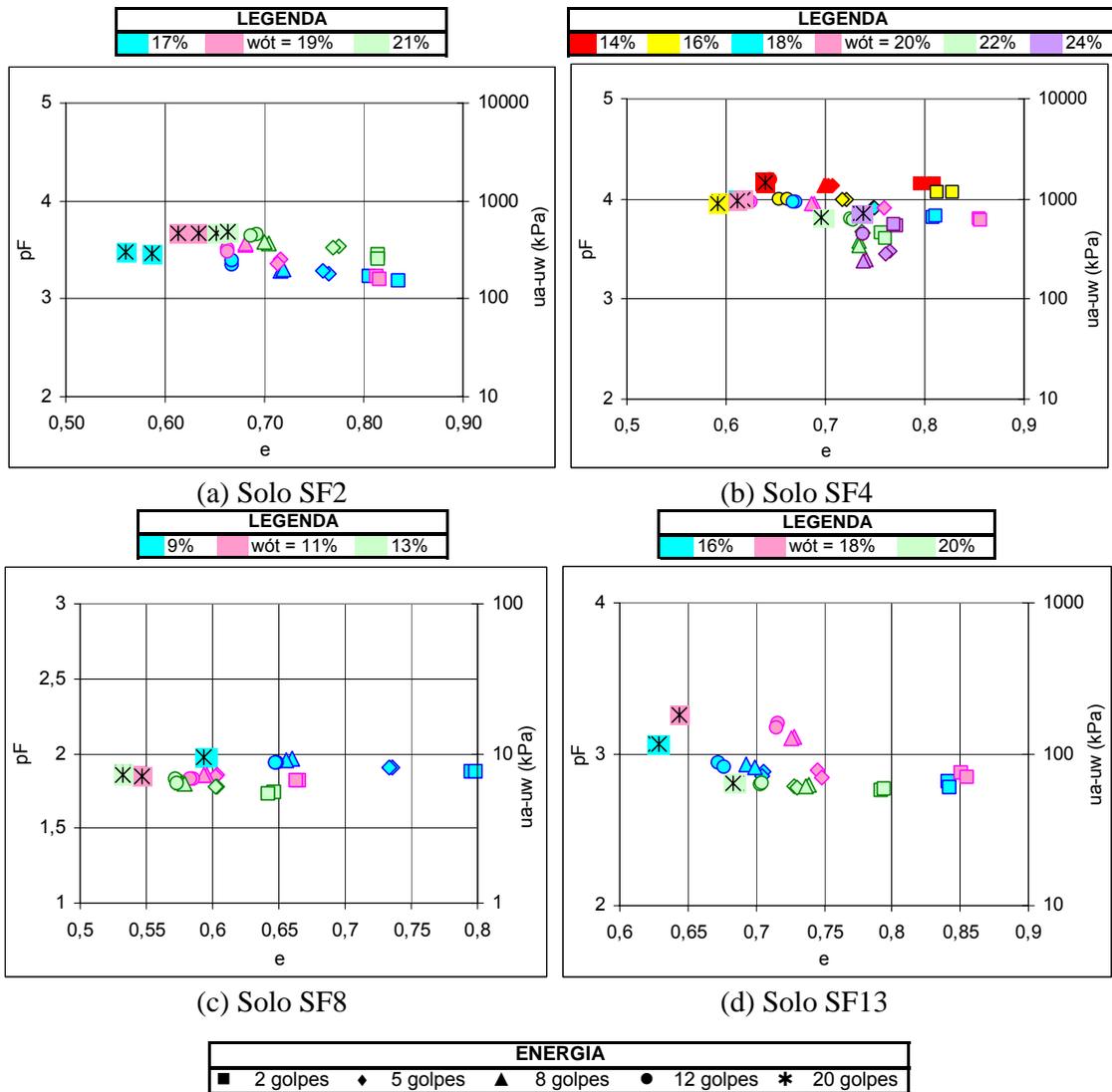


Figura 8.3 - Curvas pF x e para Diferentes Umidades - Solos SF.

Os resultados obtidos para os latossolos (Figura 8.4) mostram que a variação de índice de vazios ( $e$ ) com a energia ( $N$ ) depende da umidade de compactação, sendo as maiores variações registradas para o ramo seco e a umidade ótima. Com o aumento da energia de compactação o valor de ( $e$ ) tende a estabilizar, pois o solo tende ao ramo úmido da maior energia. Com relação aos solos HBR1 e HBR2 é importante observar que a variação do índice de vazios com a energia mostra que provavelmente os solos usados nesta pesquisa são um pouco diferentes daqueles usados por Rezende (2003), pois os menores valores de ( $e$ ) são verificados para os teores de umidade de 21% no solo HBR1 e 26% no solo HBR2 e não para

21% e 30% respectivamente, como obtido por aquela autora como sendo as umidades ótimas dos solos.

Comparando-se os solos pertencentes à zona mosqueada (Figuras 8.2 e 8.5) observa-se que no material granular (solo ZM3) as possíveis diferenças geradas em termos de resistência devem ser decorrentes das diferenças de índice de vazios, uma vez que a sucção nele atuante é baixa. Observa-se que o padrão de comportamento dos solos ZM3 e ZM6 é semelhante, no entanto, as variações de índice de vazios com a energia de compactação neles verificados são, no geral, inferiores as registradas para os latossolos.

Para os solos saprolíticos finos (Figuras 8.3 e 8.6) nota-se que apenas para o solo SF8, que é um material granular, o índice de vazios deve-se destacar em relação à sucção para a definição do comportamento dos solos. Observa-se que, de modo geral, tanto os solos saprolíticos finos como os oriundos da zona mosqueada apresentam curvas de compactação achatadas.

De forma sintética é possível afirmar que o comportamento das curvas “ $e \times N$ ” e “ $pF \times e$ ” obtido para cada um dos grupos de solos estudados é coerente uma vez que é de se esperar que os materiais mais argilosos sofram uma maior influência da sucção, enquanto os mais granulares sejam mais influenciados pela própria textura.

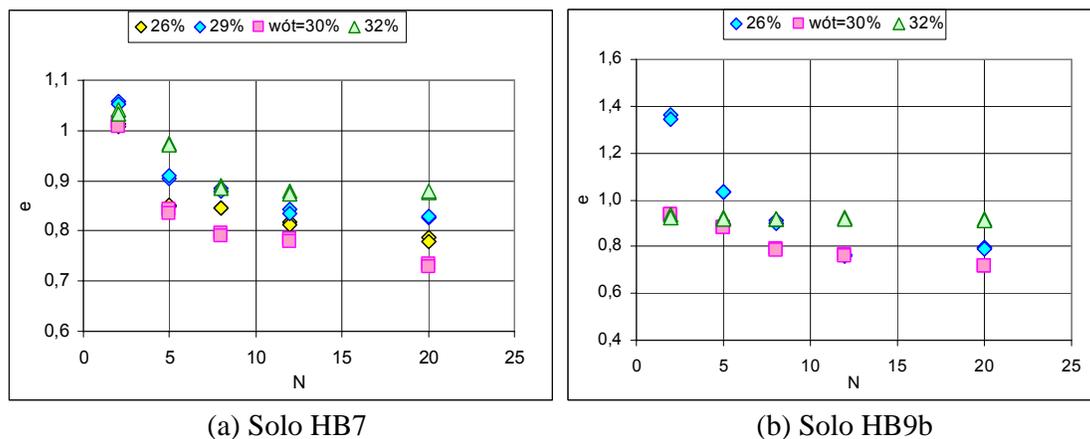
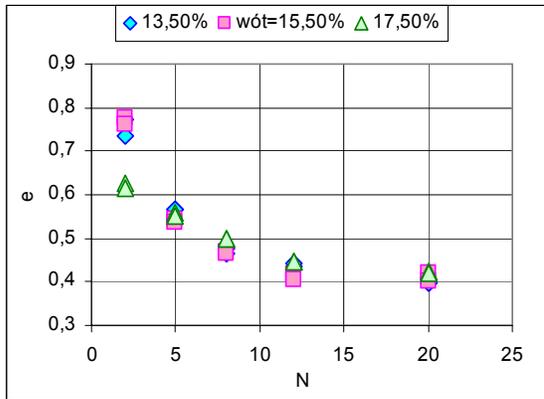
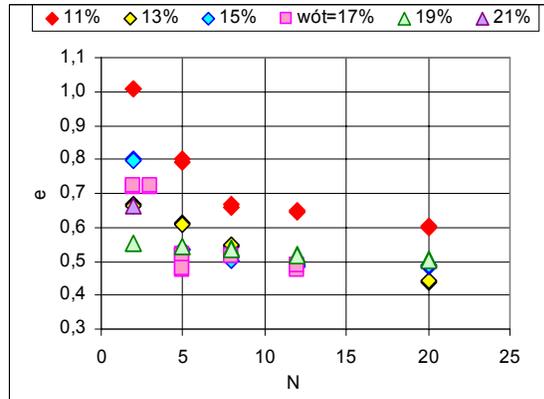


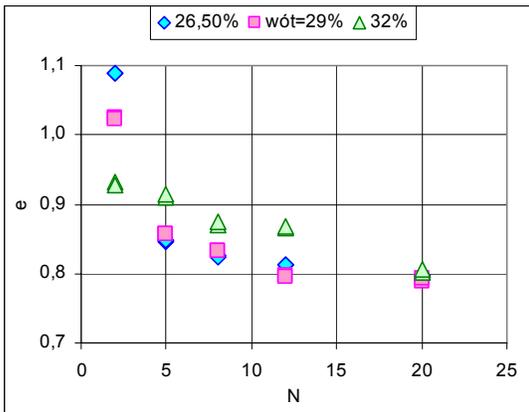
Figura 8.4 - Curvas  $e \times N$  para Diferentes Umidades - Solos HB.



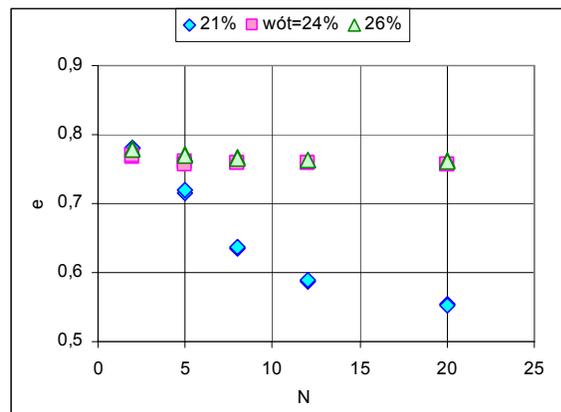
(c) Solo HB10



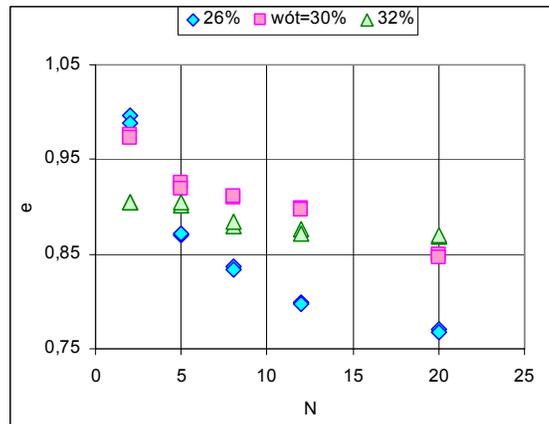
(d) Solo HB11



(e) Solo HB12



(f) Solo HBR1



(g) Solo HBR2

Figura 8.4 - Curvas  $e$  x  $N$  para Diferentes Umidades - Solos HB - Continuação.

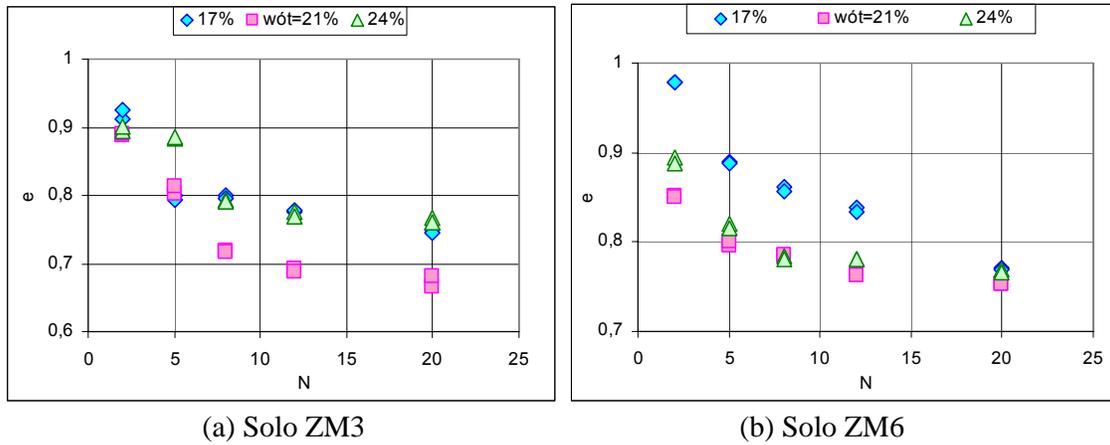


Figura 8.5 - Curvas e x N para Diferentes Umidades - Solos ZM.

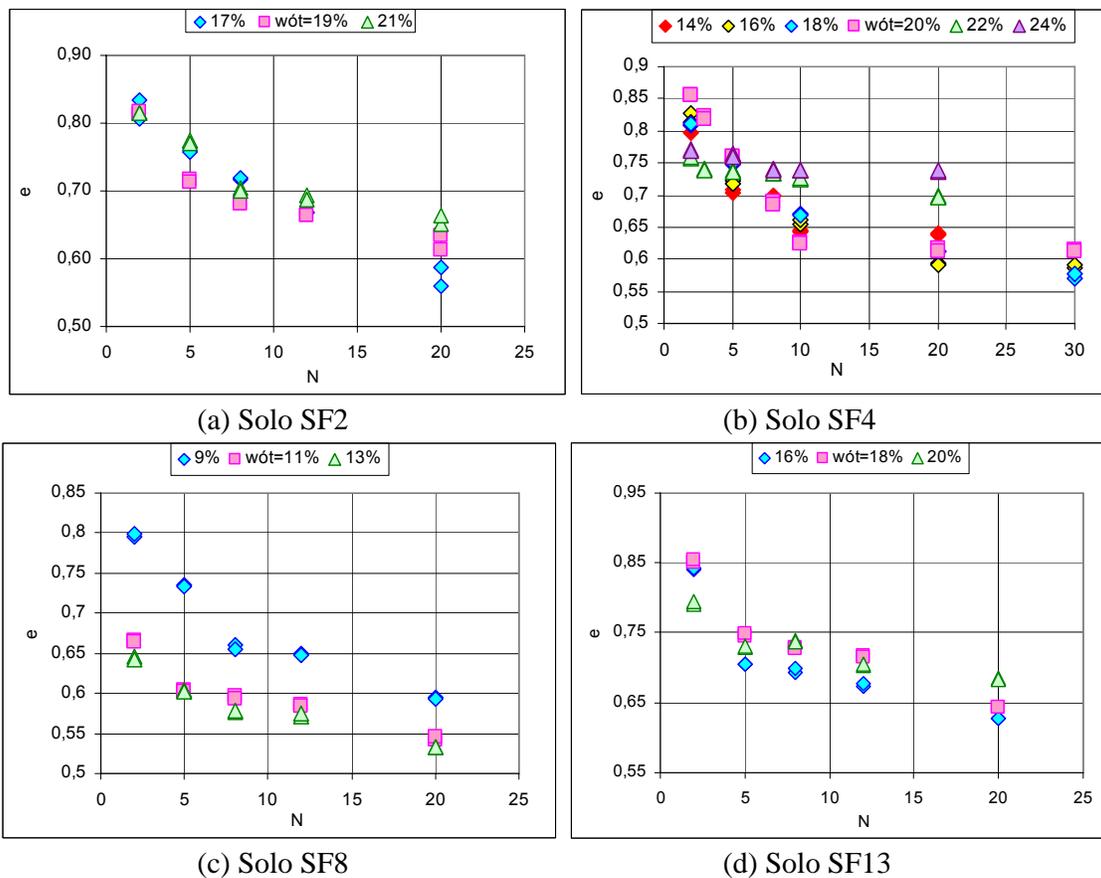


Figura 8.6 - Curvas e x N para Diferentes Umidades - Solos SF.

Em síntese, é interessante ainda comentar sobre a “estabilização do índice de vazios” para os diferentes solos e umidades de compactação usadas. As Figuras 8.4 a 8.6 mostram que ocorre a estabilização do índice de vazios após um determinado número de golpes, este variável

com o teor de umidade de compactação e o tipo de solo. No entanto, é notável que os solos que apresentam maiores diferenças em termos de índice de vazios ( $e$ ), estabilizam entre 12 a 20 golpes (PM) enquanto os demais que não mostram grandes variações, já estabilizaram para as menores energias aplicadas e ainda que, os latossolos apresentam as maiores variações de índice de vazios verificadas entre os três grupos de solos avaliados. A estabilização do índice de vazios indica que, a partir de uma determinada energia não é possível uma maior compactação da amostra, portanto, a energia excedente aplicada não contribuirá para o aumento de densidade e será absorvida pela água presente na estrutura do solo. Assim, a partir das tendências obedecidas pelas curvas, pode-se ter uma idéia aproximada do valor da energia efetiva para cada teor de umidade de compactação, dentre os grupos de solo estudados. Tal aspecto reafirma a importância do processo de alteração e do grau de intemperismo dos solos, mesmo em face do procedimento de compactação; além de reafirmar a importância da umidade de compactação no comportamento de cada solo.

Uma vez avaliado o comportamento dos solos compactados na condição natural, torna-se ainda necessário efetuar estudo semelhante para os materiais compactados com diferentes teores de cal incorporada. Com esta finalidade são apresentadas inicialmente as Figuras 8.7 a 8.9 mostrando a estabilização com 2%, 4% e 6% de cal para o teor de umidade ótima. Estas Figuras mostram comportamentos típicos de cada um dos grupos de solos estudados, sendo os demais dados apresentados no anexo III. É ainda importante salientar que, o período de cura dos corpos de prova foi similar ao de equalização, ou seja, totalizaram-se 15 dias, nos quais estão englobados cura mais equalização.

Para os latossolos (Figuras 8.7) ocorrem variações de sucção com a energia de compactação ( $N$ ), de pouco a muito significativas, variando com o teor de cal incorporada e as características do solo estudado. Apresenta-se como exemplo de comportamentos típicos, para o grupo de latossolos, os observados nos solos HB7, HB9b e HB12, sendo os demais resultados dos mostrados no anexo III.

De forma geral, ao incorporar cal e considerando a mesma energia de compactação, ocorre aumento de índice de vazios para a maioria dos latossolos estudados; no entanto tal variação de vazios pode ser mais ou menos discreta de acordo com as propriedades do solo. Exemplificando tal comportamento são apresentados os solos HB7, HB10 e HB12, em que é possível notar diferentes variações de “ $e$ ” com a incorporação de cal. A Tabela 5.4 mostrou que o solo HB7 era predominantemente formado por gibbsita, caulinita e relevante teor de hematita mais goethita. Nesse solo o teor de cal reduziu substancialmente a eficiência da compactação para uma mesma energia. O solo HB10 é marcado por elevado teor de quartzo e apresenta

menor redução na eficiência da compactação com a incorporação de cal, cabendo lembrar que a composição mineralógica restante nesse solo é em sua quase totalidade formada por gibbsita, caulinita e hematita. Já o solo HB12, contendo 21,9% de illita só têm a eficiência da compactação afetada pela cal para pequenas energias de compactação.

É bem verdade que no solo estabilizado com cal pelo menos quatro fatores influenciam na eficiência da compactação, sendo eles: a sucção (maior a sucção maior a dificuldade de compactação), a agregação / desagregação do solo, a interferência da alteração da concentração iônica nas forças de atração/repulsão atuantes no solo e, a mineralogia.

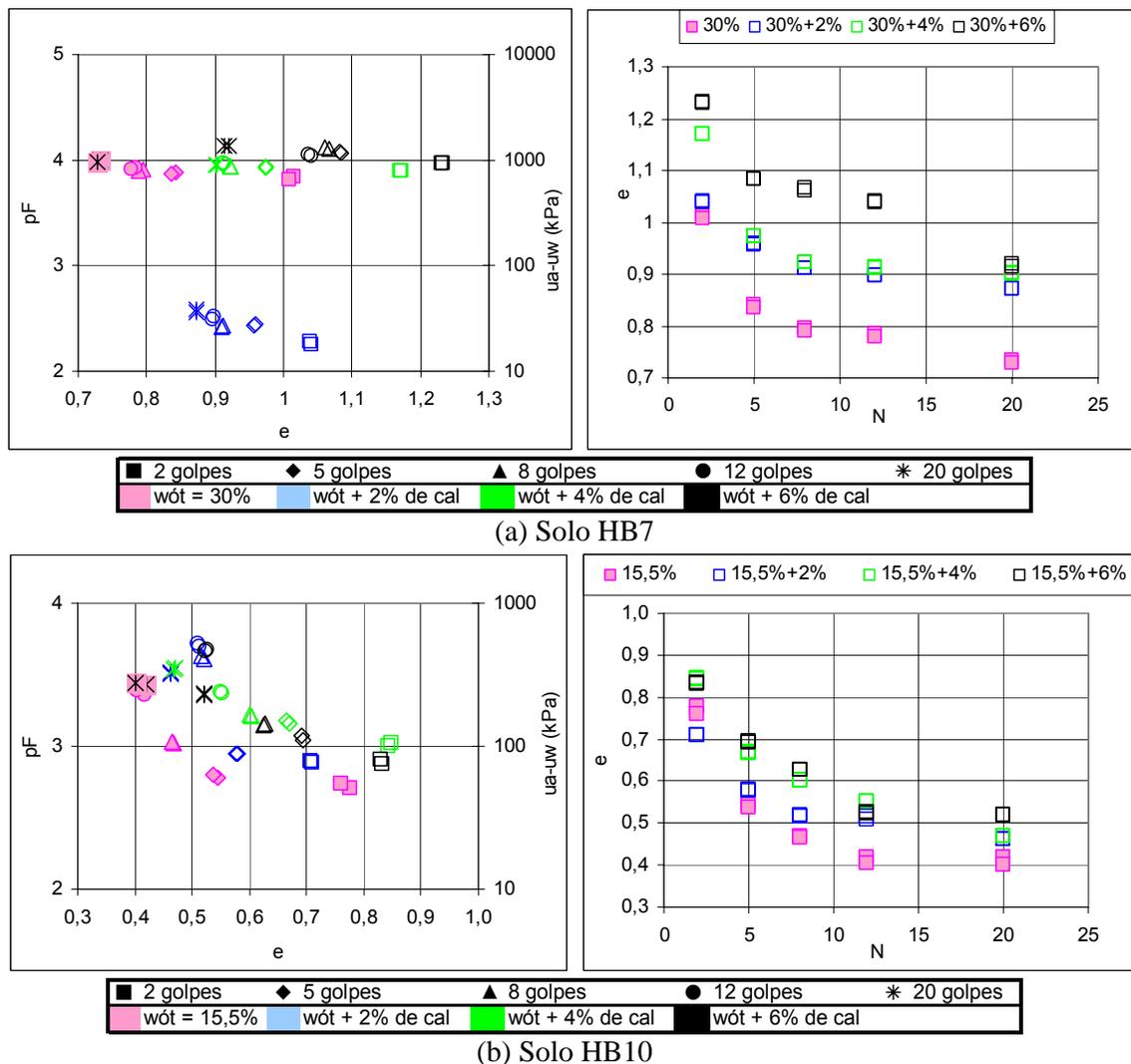
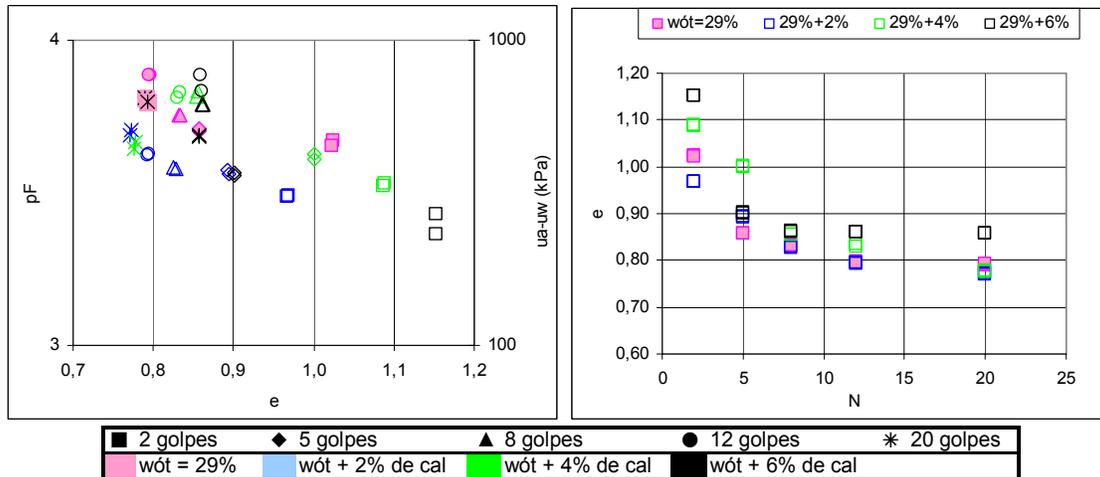


Figura 8.7 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos HB Compactados no Teor de Umidade Ótima do Proctor Normal e Estabilizados com Diferentes Percentuais de Cal.



(c) Solo HB12

Figura 8.7 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos HB Compactados no Teor de Umidade Ótima do Proctor Normal e Estabilizados com Diferentes Percentuais de Cal - Continuação.

Em relação aos solos pertencentes à zona mosqueada (Figuras 8.8) os resultados demonstram a pouca variação ocorrida da sucção em relação ao índice de vazios (e), para os diferentes teores de cal misturados. Destaca-se que, com relação às amostras compactas com 0% de cal, apenas são verificadas diferenças significativas para o (e) do solo ZM6 natural, o que aponta para possíveis diferenças de resistência ser decorrentes da estrutura do solo e não da variação na sucção. A Tabela 5.4 mostra ser o solo ZM3 rico em quartzo (88,6%) e o ZM6 rico em caulinita (46,8%) o que provavelmente torna este último mais sensível à cal no processo de compactação.

Para os solos saprolíticos (Figuras 8.9) são verificados, para a maioria dos solos, comportamentos distintos, quando do tratamento com cal. Observa-se, por exemplo, que apesar de composições químico-mineralógicas semelhantes, os solos SF2 e SF4 se comportam de modo distinto. Enquanto a cal aparentemente elevou a sucção do solo SF2 a partir da taxa de incorporação de 4%, para o solo SF4 esse comportamento inverteu. Nota-se ainda que enquanto para os mesmos teores de cal e mesmas energias de compactação a eficiência da compactação foi afetada pela cal no solo SF2, no solo SF4 a distribuição dos pontos de índice de vazios em função da energia foi mais ou menos aleatória. Isso coloca, provavelmente, em evidência um outro aspecto, o relativo ao grau de cristalinidade dos minerais, ou seja, as quantidades podem ser até iguais, mas, o nível de cristalinidade não necessariamente. Observa-se, por exemplo, na Tabela 4.3, que ao reagir com o hexametáfosfato de sódio o solo SF2 sofreu ligeira redução no teor de argila, ou seja, floculou, enquanto no solo SF4 houve um substancial aumento de fração

de argila quando do tratamento com esse composto químico, ou seja, defloculou. Lima *et al.* (2005) mostraram que certas illitas podem reagir com o hexametáfosfato de sódio gerando a agregação. Trata-se, portanto, não da quantidade mais da qualidade da illita. Neste sentido, é provavelmente o tipo de illita a responsável pelas diferenças de comportamento entre os dois solos.

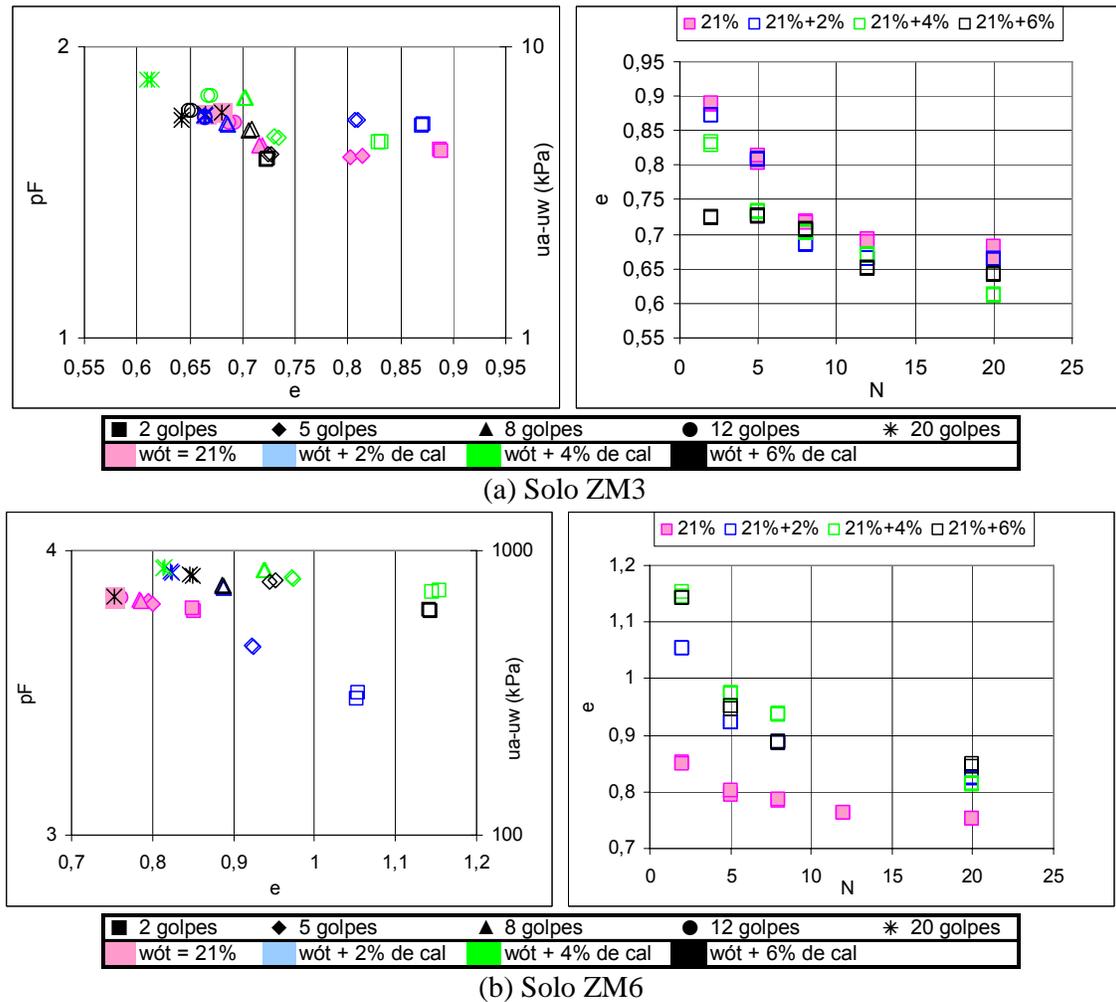


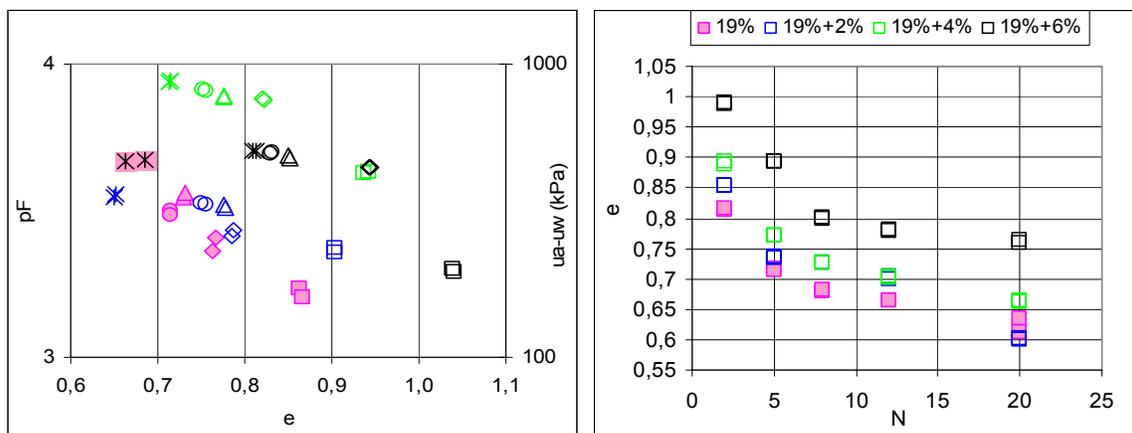
Figura 8.8 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos ZM Compactados no Teor de Umidade Ótima do Proctor Normal e Estabilizados com Diferentes Percentuais de Cal.

Para colocar em evidência a importância de análises mais amplas no estudo da estabilização dos solos com cal considerar-se-á, comparativamente aos solos SF2 e SF4, o solo ZM6. Mineralogicamente, esse solo é diferente dos solos SF2 e SF4, no entanto, o comportamento tanto da sucção em função do índice de vazios ( $e$ ) como do índice de vazios ( $e$ ) em função da energia ( $N$ ) é relativamente semelhante ao do solo SF2. Recorrendo-se às propriedades físicas (Tabela 4.3) tem-se que: a) o hexametáfosfato gerou apenas ligeira

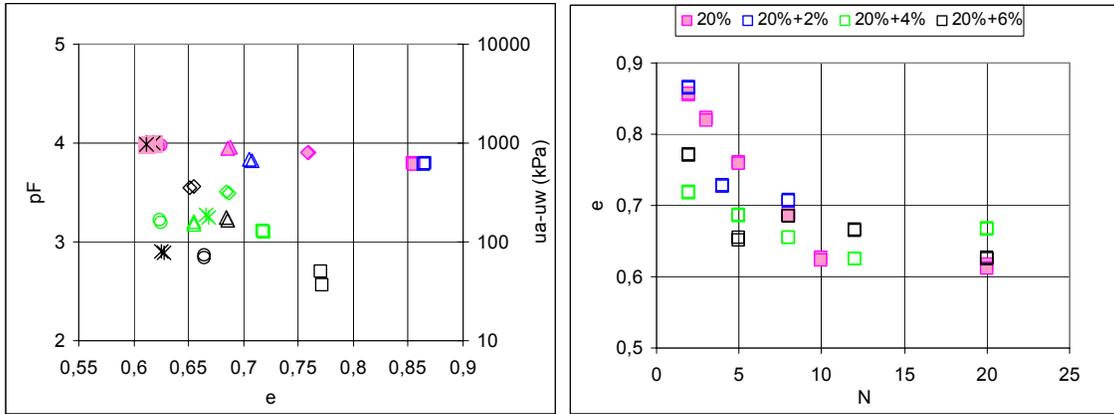
agregação do solo ZM6, aproximando-se, portanto, o comportamento daquele verificado para o solo SF2 e, distinto daquele do solo SF4; b) quando da incorporação da cal o índice de plasticidade (IP) dos solos ZM6 e SF2 diminuem, enquanto o do solo SF4 praticamente se mantém (Tabela 4.6), cabendo destacar que a menor (SF2) ou maior (ZM6) variação quando da incorporação de 2% de cal, tem seu efeito notado na eficiência da compactação registrada nos gráficos de (e) em função de (N). Fica claro, portanto que, por vezes o entendimento do comportamento dos solos tropicais requer estudos mais completos. Embora, por uma questão de tempo, não tenha sido possível realizar no escopo desta tese, um estudo contemplando o treinamento de redes neurais. Acredita-se que esse é um trabalho a ser desenvolvido posteriormente, usando-se os resultados da presente pesquisa, conjuntamente aos resultados de Cardoso (2002) e Rezende (2003), uma vez que tal estudo poderá trazer entendimentos mais amplos sobre a influência da cal no comportamento dos solos tropicais.

Como ainda são estudadas amostras de solo compactadas nas condições de umidade superior e também inferior à ótima, devem ser avaliados os comportamentos de tais materiais, de forma a se conhecer seus respectivos comportamentos com a variação do teor de umidade de compactação. Para ilustrar a influência da umidade de compactação, quando da estabilização com cal, são apresentadas as Figuras 8.10 a 8.12 que mostram os comportamentos típicos visualizados para os três grupos de solos estudados, sendo apresentados no anexo IV os resultados dos demais solos.

Como pode ser observado para o conjunto de resultados referentes aos latossolos (anexo IV e Figuras 8.10), os comportamentos dos materiais são variáveis com a umidade de compactação e com o teor de cal usado para a estabilização; portanto, a avaliação do comportamento será efetuada por umidade e teor de cal empregada.



(a) Solo SF2



(b) Solo SF4

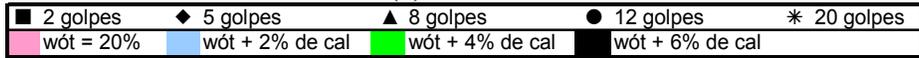
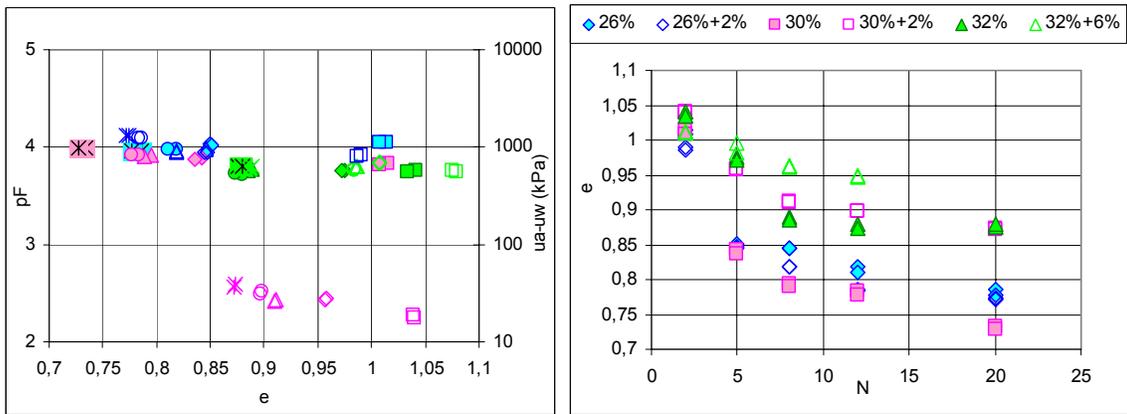
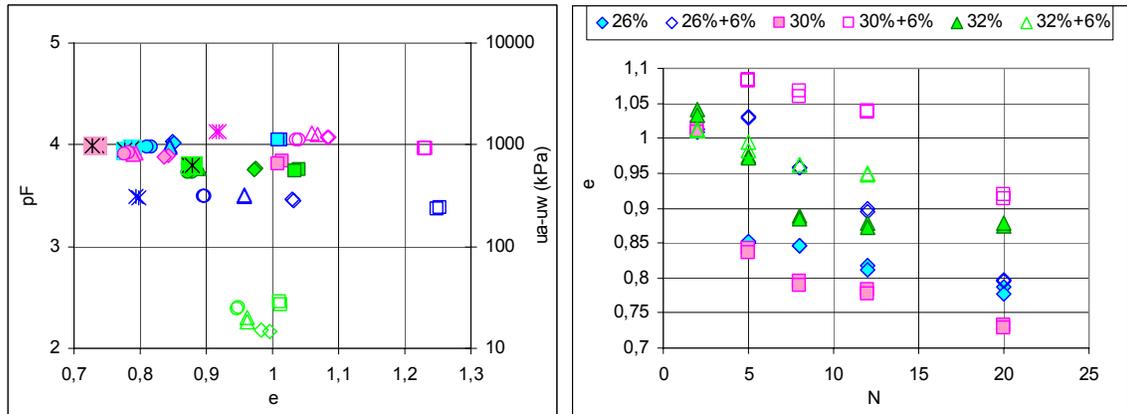
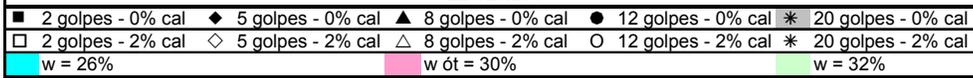


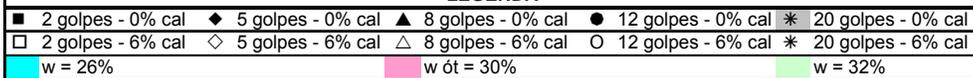
Figura 8.9 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos SF Compactados no Teor de Umidade Ótima do Proctor Normal e Estabilizados com Diferentes Percentuais de Cal - Continuação.



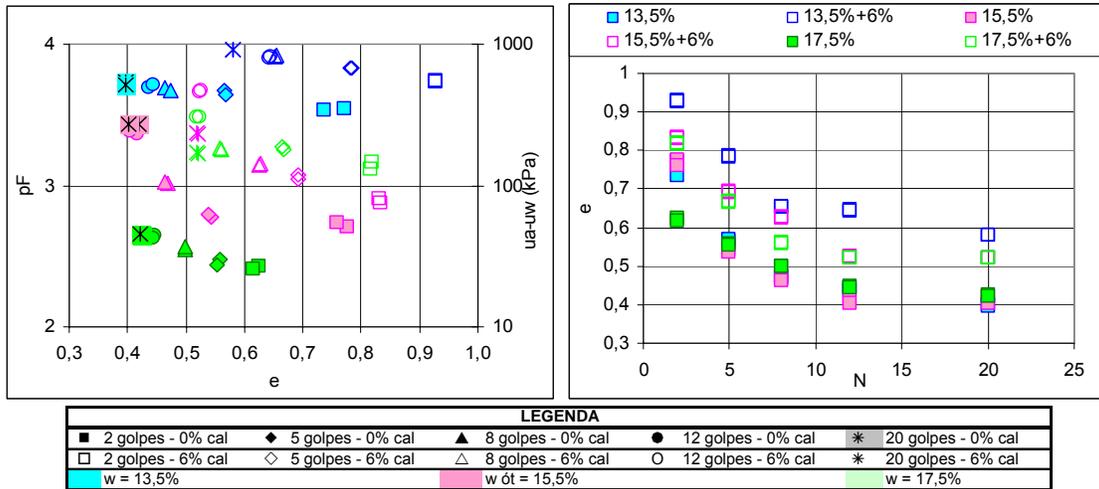
LEGENDA



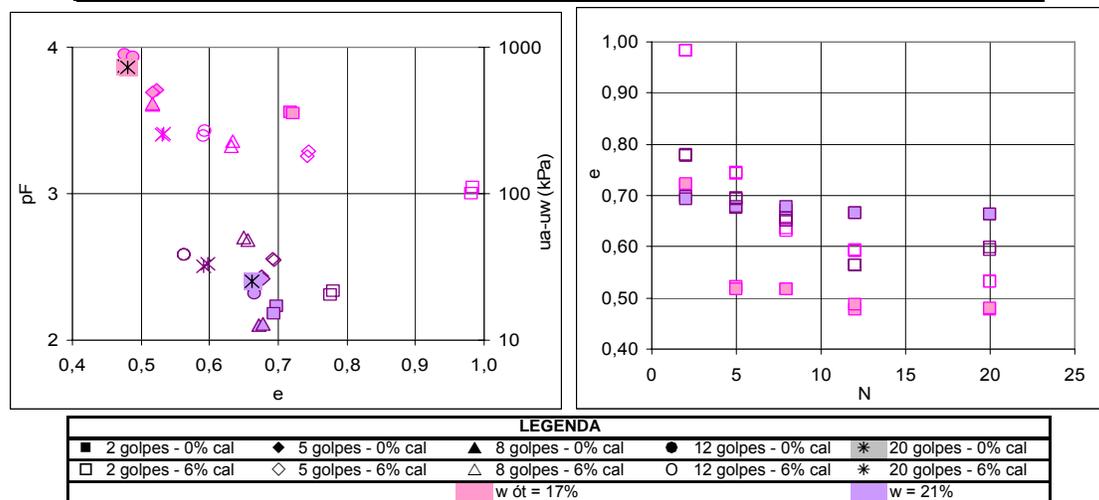
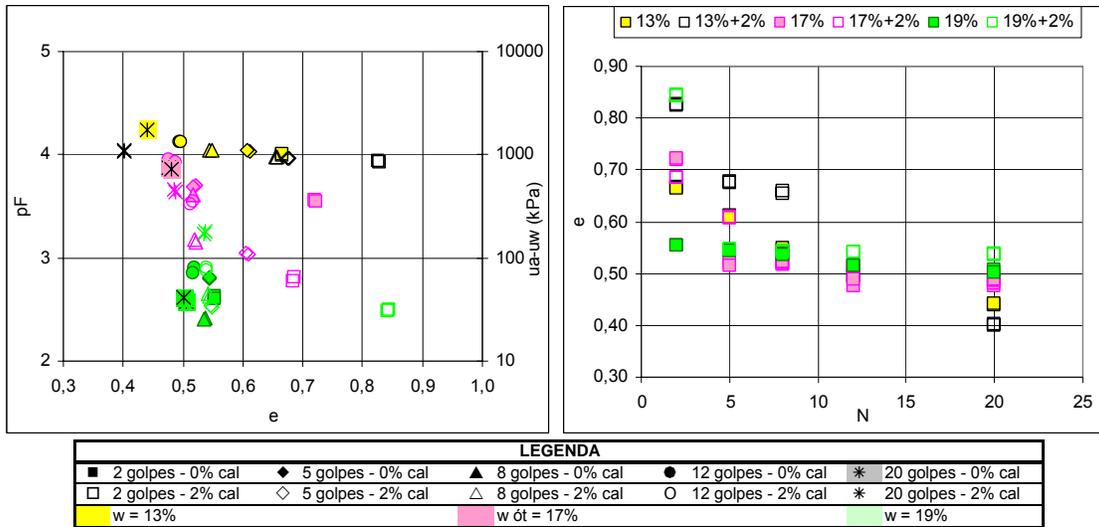
LEGENDA



(a) Solo HB7

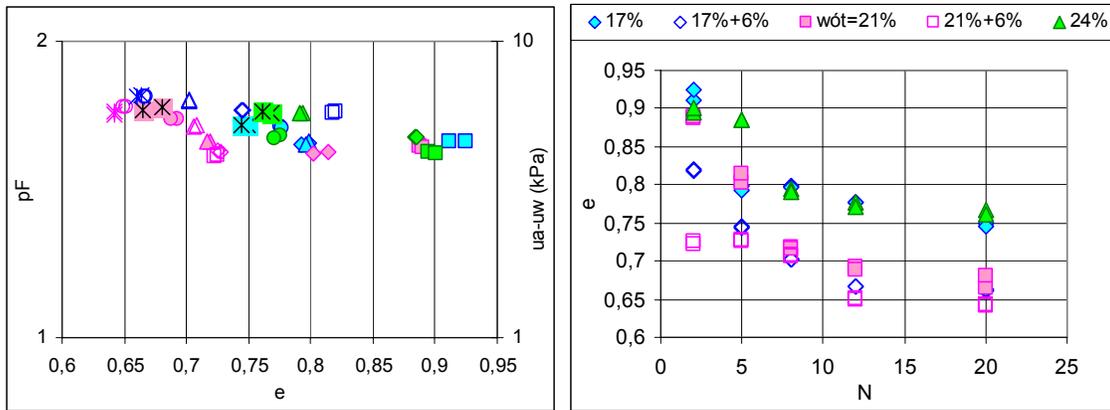


(b) Solo HB10

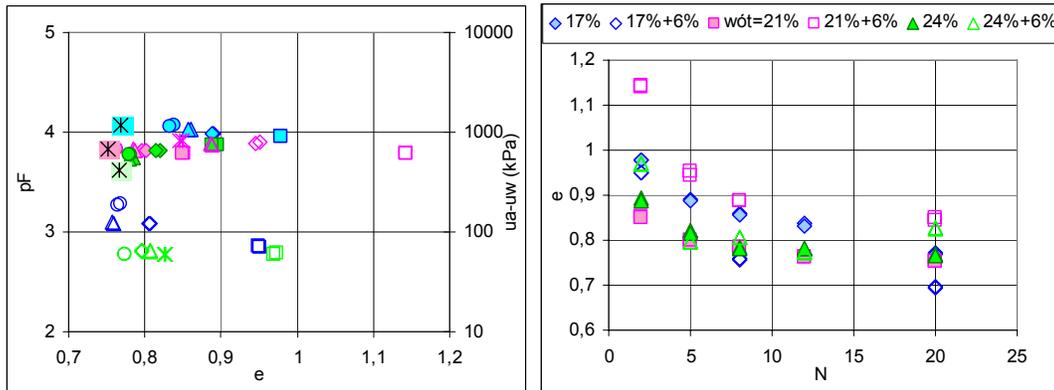


(c) Solo HB11

Figura 8.10 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos HB Compactados em Diferentes Teores de Umidade e Estabilizados – Continuação.



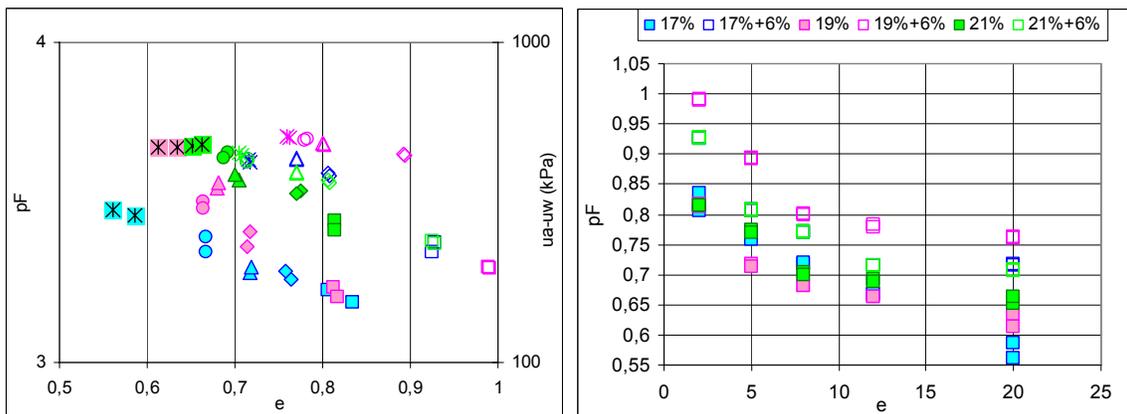
(a) Solo ZM3



(b) Solo ZM6

| LEGENDA             |                     |                     |                      |                      |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| ■ 2 golpes - 0% cal | ◆ 5 golpes - 0% cal | ▲ 8 golpes - 0% cal | ● 12 golpes - 0% cal | * 20 golpes - 0% cal |
| □ 2 golpes - 6% cal | ◇ 5 golpes - 6% cal | △ 8 golpes - 6% cal | ○ 12 golpes - 6% cal | * 20 golpes - 6% cal |
| ■ w = 17%           | ■ w ót = 21%        | ■ w = 24%           |                      |                      |

Figura 8.11 - Curvas “pF x e” e “e x N” para os Solos ZM Compactados em Diferentes Teores de Umidade e Estabilizados.



| LEGENDA             |                     |                     |                      |                      |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| ■ 2 golpes - 0% cal | ◆ 5 golpes - 0% cal | ▲ 8 golpes - 0% cal | ● 12 golpes - 0% cal | * 20 golpes - 0% cal |
| □ 2 golpes - 6% cal | ◇ 5 golpes - 6% cal | △ 8 golpes - 6% cal | ○ 12 golpes - 6% cal | * 20 golpes - 6% cal |
| ■ w = 17%           | ■ w ót = 19%        | ■ w = 21%           |                      |                      |

Figura 8.12 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o Solo SF2 Compactado em Diferentes Teores de Umidade e Estabilizado.

A partir do conjunto de dados obtidos para todos os solos HB, ZM e SF, apresentados nas Figuras 8.10, 8.11 e 8.12 e, no anexo IV, é possível separar os padrões de comportamento por faixa de umidade de compactação e teor de cal usado. Sendo assim, resumidamente, verificam-se como tendência geral, os seguintes comportamentos:

a) Solo HB7:

- ramo seco:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(2\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- ramo úmido:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

b) Solo HB9b:

- ramo seco:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(2\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- ramo úmido:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) = e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

c) Solo HB10:

- ramo seco:  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima :  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- ramo úmido:  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

d) Solo HB11:

- ramo seco:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(2\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) = e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- ramo úmido:  $pF(2\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$

e) Solo HB12:

- ramo seco:  $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(6\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

f) Solo HBR1:

- ramo seco:  $pF(2\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(2\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$

g) Solo HBR2:

- ramo seco:  $pF(3\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(3\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(3\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(3\% \text{ cal}) = e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- ramo úmido:  $pF(3\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(3\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

h) Solo ZM3:

- ramo seco:  $pF(6\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima :  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$

i) Solo ZM6:

- ramo seco:  $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(6\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- ramo úmido:  $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

j) Solo SF2:

- ramo seco:  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$
- ramo úmido:  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

k) Solo SF4:

- ramo seco:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$   
 $pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(6\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$
- umidade ótima:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal})$  e;  $e(2\% \text{ cal}) = e(0\% \text{ cal})$

$$pF(6\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(6\% \text{ cal}) = e(0\% \text{ cal})$$

- ramo úmido:  $pF(2\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(2\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$

$$pF(6\% \text{ cal}) < pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(6\% \text{ cal}) = e(0\% \text{ cal})$$

l) Solo SF8:

- umidade ótima:  $pF(2\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(2\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

$$pF(4\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(4\% \text{ cal}) < e(0\% \text{ cal})$$

$pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$  para 3 menores energias de compactação (N)

m) Solo SF13:

- ramo seco:  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

- umidade ótima :  $pF(6\% \text{ cal}) > pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

- ramo úmido:  $pF(6\% \text{ cal}) = pF(0\% \text{ cal}) \text{ e}; e(6\% \text{ cal}) > e(0\% \text{ cal})$

Analisando-se a síntese desses padrões comportamentais, é nítida a existência de reações diferenciadas da cal para os diferentes tipos de solos compactados a diferentes umidades e energias de compactação. Nos latossolos, sobressai-se como padrão geral, o aumento do índice de vazios (e) com a incorporação da cal para uma mesma energia de compactação. Em alguns casos particulares, para determinados teores de umidade e de cal, ocorreu manutenção do índice de vazios do solo natural (ramo úmido dos solos HB9b, HB11 e umidade ótima dos solos HB11 e HBR2) chegando a gerar redução de índice de vazios (e) no solo HBR1 compactado na condição ótima. É comum o aumento de (e) associar-se ao fenômeno da floculação e, sua redução ao de defloculação. A Figura 5.7 mostra que, por exemplo, para o solo HB7 a incorporação de 2% de cal gera pequena desagregação no solo, enquanto para 6% de cal, a granulometria praticamente não está variando, o que justificaria a manutenção do “e” para 6% de cal, em relação ao solo natural.

Nos solos da zona mosqueada observa-se que enquanto no ZM3 ocorre redução de (e) com a incorporação da cal, no solo ZM6 apenas no ramo seco isso se confirma, na umidade ótima. No ramo úmido do solo ZM6 ocorre comportamento inverso.

Nos solos saprolíticos observa-se que apenas o solo SF4 fugiu a tendência geral de aumento de (e) com a incorporação da cal.

A influência da cal na sucção para os diferentes teores de umidade, foi muito variável dentro do próprio solo e de um solo para outro, pois vários fatores terminam influenciando ao mesmo tempo, como mineralogia, química, estrutura e textura, sendo o ideal, nesse caso, a tentativa de análise a partir de redes neurais.

## **8.2 – EFEITO DA SUCÇÃO E DO ÍNDICE DE VAZIOS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS**

Este item tem por finalidade verificar o efeito da sucção no aumento da resistência à penetração, no caso o mini-CBR, para uma mesma energia de compactação. Sabe-se que para a maioria dos solos finos argilosos, se verificam maiores valores de resistência à medida que a sucção cresce, no entanto, tal variação é mais ou menos efetiva de acordo com as características físicas, químicas e mineralógicas de cada material, e ainda com as condições de compactação adotadas ( $w$  e  $\gamma_d$ ). Tendo por finalidade verificar e quantificar o papel da sucção ou umidade, para os diferentes tipos de solos compactados serão estudadas as variações de resistência com a sucção para as diferentes energias e umidades de compactação, considerando o material natural e estabilizado.

### **8.2.1 – Solos Compactados Naturais Não Saturados**

As Figuras 8.13 a 8.21 mostram alguns dos resultados obtidos para os três grupos de solos estudados, os demais são apresentados no anexo V. Para cada solo compactado em uma determinada umidade é verificado o efeito da sucção (em pF), da sucção normalizada (pF/e) e do índice de vazios, pois apenas desta forma é possível visualizar de modo mais completo o efeito da sucção sobre o resultado do mini-CBR.

As Figuras 8.13 a 8.15 apresentam alguns dos resultados típicos obtidos para os latossolos.

Os gráficos plotados permitem o entendimento de quais parâmetros influenciam o comportamento de cada solo. O conjunto de resultados apresentados para os três grupos de solos mostra que, a umidade e o índice de vazios não definem de modo isolado o comportamento do solo (gráficos (a) e (b) das Figuras 8.13 a 8.15), no entanto, os solos pertencentes aos três grupos estudados, apresentam relação razoável com a sucção. No entanto, analisando-se os resultados obtidos para o solo HB7, é possível verificar no gráfico da Figura 8.13 que, no ramo seco ( $w=26\%$ ) o resultado de mini-CBR diminui com o aumento da sucção,

o que demonstra que a análise do comportamento em função apenas da sucção é também limitada, pois a interferência do índice de vazios no comportamento termina gerando uma avaliação pouco precisa e certa incoerência quanto ao resultado esperado. Plotando-se, os resultados de mini-CBR em função da sucção normalizada ( $pF/e$ ) e em relação ao índice de vazios (gráficos (b) e (d) respectivamente referentes às Figuras 8.13 a 8.15) verifica-se que, maior essa relação, maior o mini-CBR. Esse comportamento é coerente fisicamente, pois a relação aumenta seja com a ampliação da sucção, seja com a redução de índice de vazios ( $e$ ) e, por conseqüência, também aumenta o mini-CBR.

A aparente dispersão nesse tipo de gráfico não reflete se não as diferenças nas distribuições de poros, conforme tratado por Camapum de Carvalho & Leroueil (2000).

Finalmente, cabe destacar que, comparativamente aos demais, o solo HB11 foi o que maior sensibilidade apresentou de variação do mini-CBR em função da sucção e do índice de vazios.

De forma a efetuar análise comparativa em termos de mini-CBR, as Figuras 8.16 mostram o crescimento relativo de suporte em relação aos valores obtidos para a umidade ótima de compactação, para cada solo estudado. Tal estudo é importante uma vez que dá a noção de um crescimento ou decréscimo percentual existente ao se variar a umidade de compactação, no entanto, este parâmetro não pode ser usado visando à definição de aplicabilidade dos materiais na estrutura do pavimento. Visando detalhar as condições de uso destes 13 solos estudados, a Tabela 8.3 será apresentada objetivando detalhar em que condições e sob que forma os solos poderiam ser usados como material de construção rodoviária.

As Figuras 8.16 mostram que os acréscimos de resistência, para a condição de compactação no ramo seco, são consideráveis e variam com o teor de umidade empregada. É importante destacar que, em termos percentuais, os solos que mostram maiores variações de suporte para o ramo seco, considerando a faixa de variação máxima de -2% em relação ao teor de umidade ótimo, são os solos HB9b, HBR1 e HBR2, que apresentam altos percentuais de argila na sua composição granulométrica. É ainda que, apesar dos consideráveis acréscimos de resistência para um teor de umidade inferior ao ótimo, muitas vezes o mini-CBR não atinge valor suficiente para a aplicabilidade, como, por exemplo, o solo HB9b compactado no PN, PI e PM para umidade de 26%. Observa-se que apesar dos consideráveis acréscimos, este material ainda não pode ser aplicado como base rodoviária. Tendo em vista estas determinações práticas, a Tabela 8.3 apresenta a aplicabilidade dos materiais sob as diferentes condições de compactação trabalhadas.

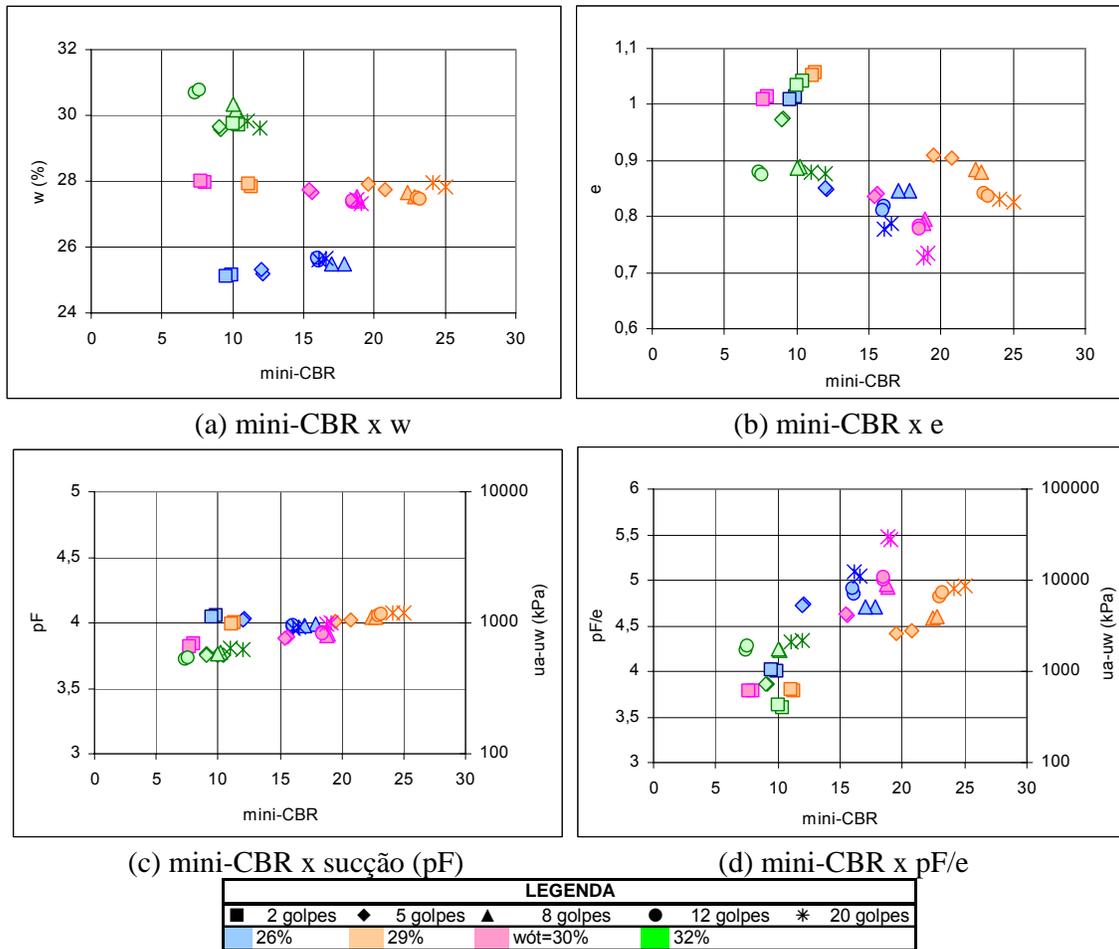


Figura 8.13 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB7.

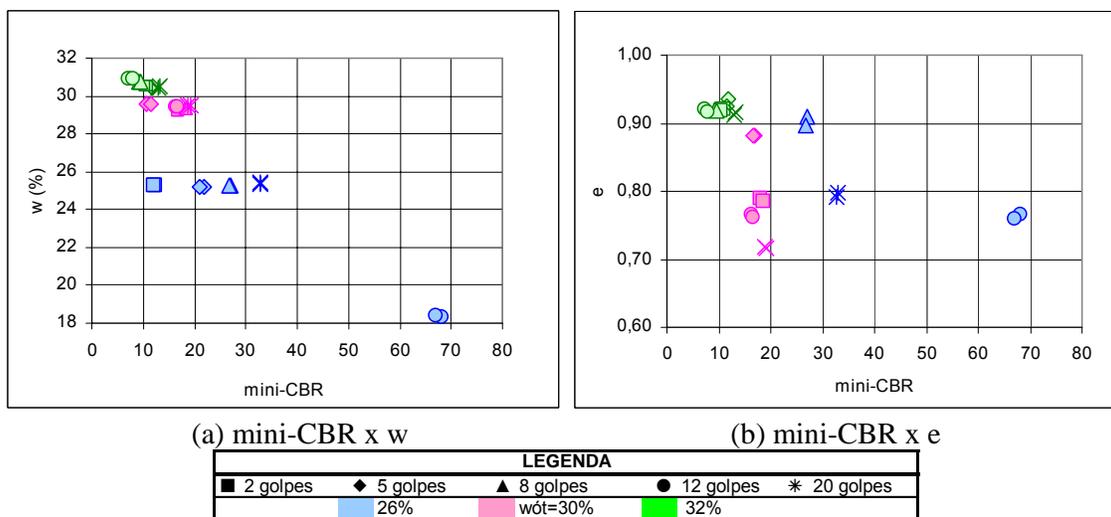


Figura 8.14 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB9b.

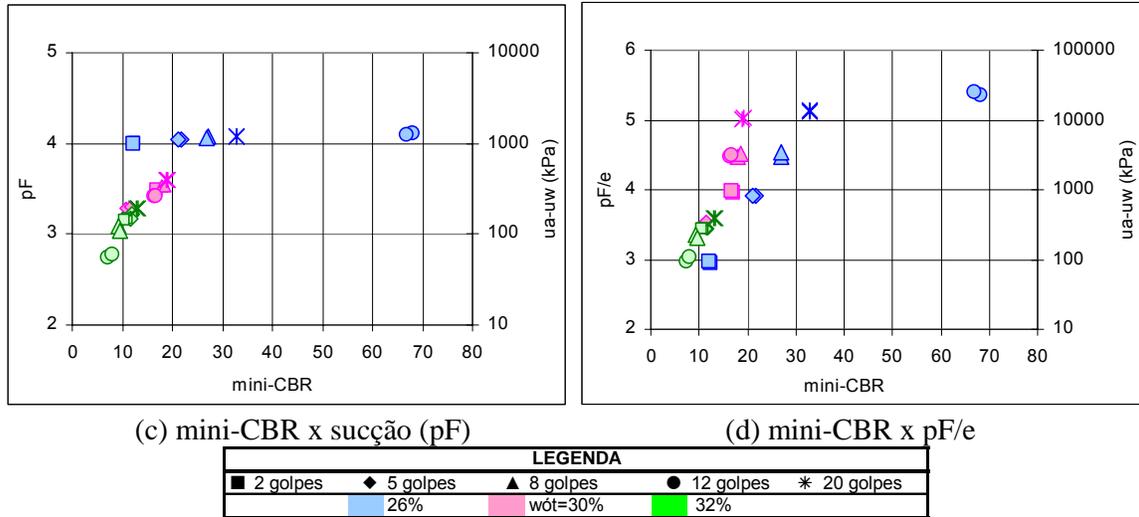


Figura 8.14 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB9b - Continuação.

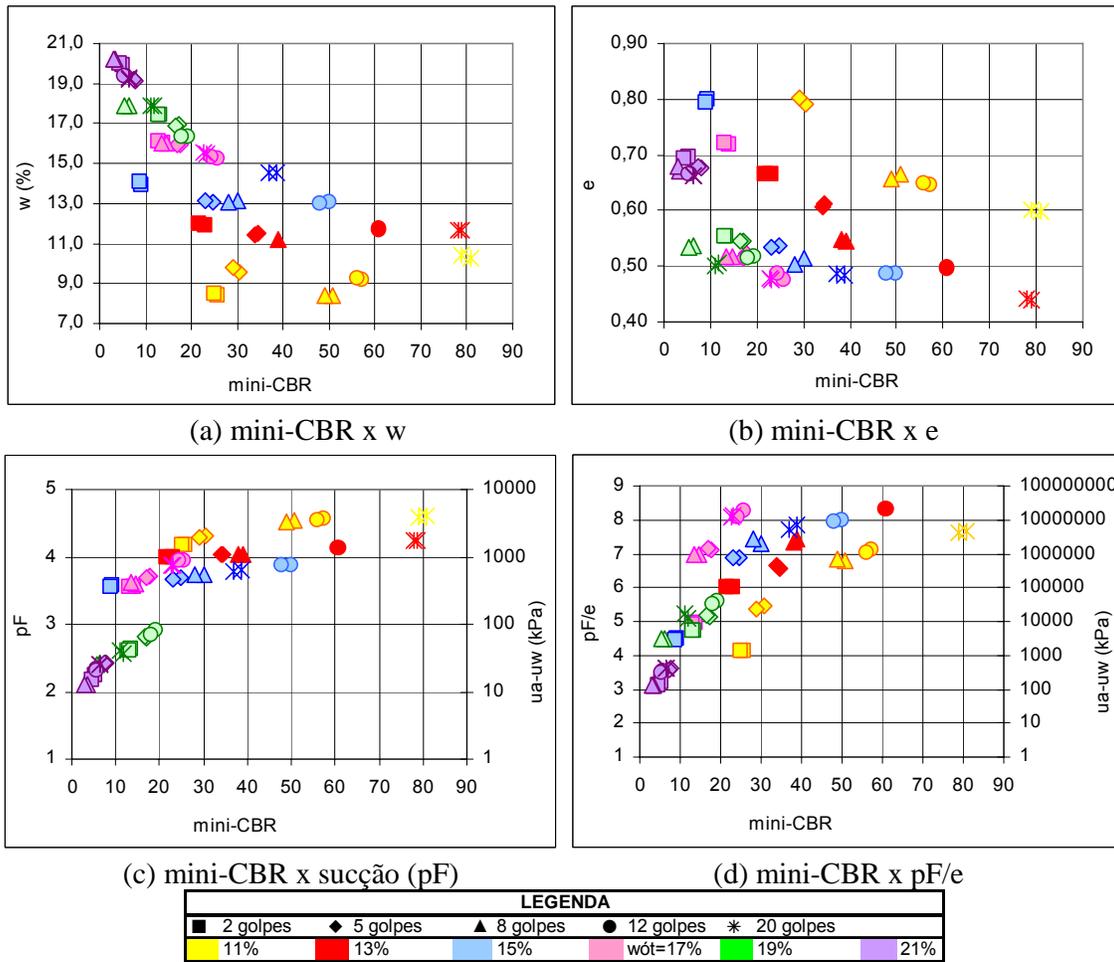
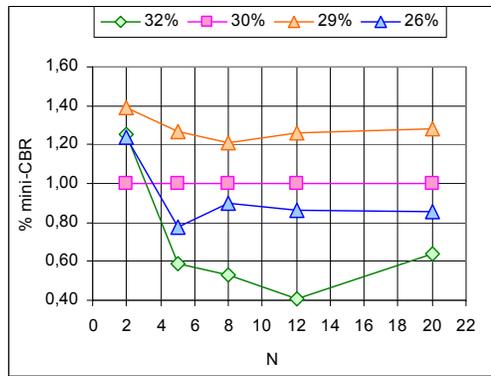
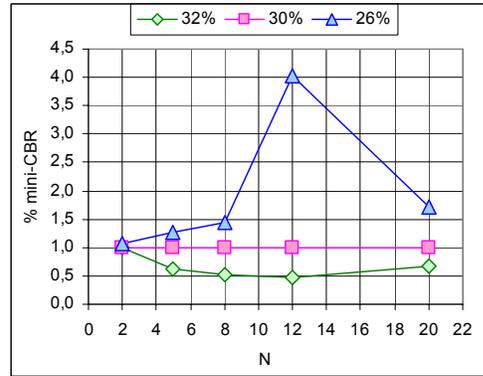


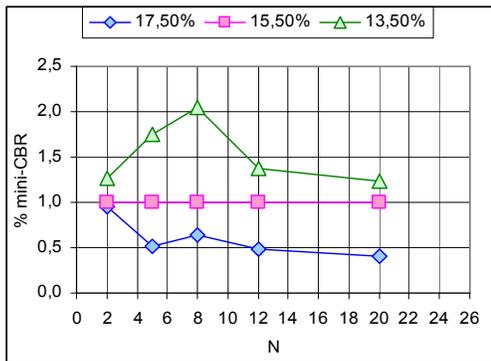
Figura 8.15 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB11.



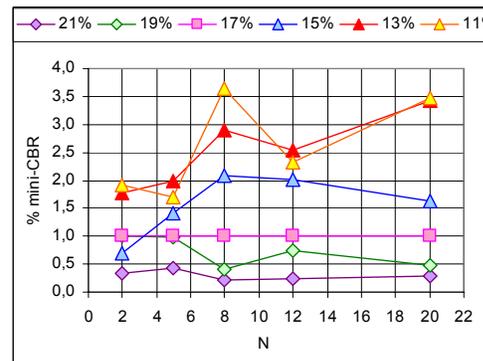
(a) Solo HB7



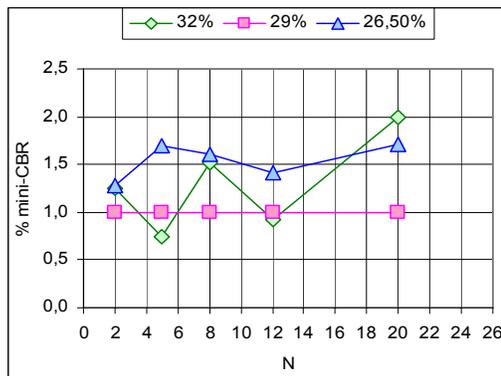
(b) Solo HB9b



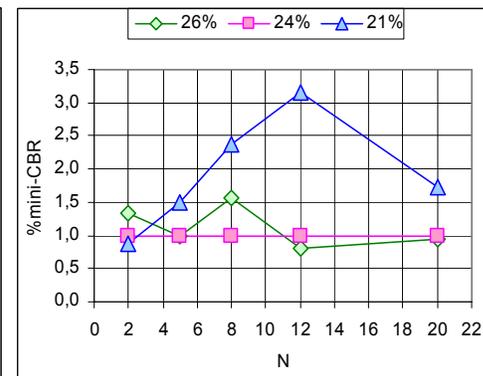
(c) Solo HB10



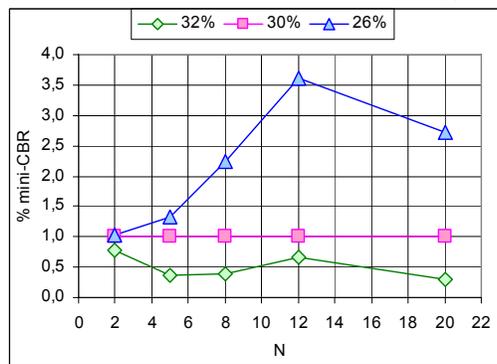
(d) Solo HB11



(e) Solo HB12



(f) Solo HBR1



(g) Solo HBR2

Figura 8.16 - Variação Percentual do Mini-CBR em Relação aos Valores obtidos para o Teor de Umidade de Compactação Ótimo.

De forma semelhante aos latossolos, as Figuras 8.17 apresentam os resultados obtidos para o solo ZM6. Esse caso é bastante interessante, pois, a análise conjunta dos gráficos (a) e (b) mostra que o mini-CBR depende em grande escala do índice de vazios ( $e$ ) e, o gráfico (c) mostra que o mini-CBR varia bastante para sucções quase constantes. O gráfico do mini-CBR versus a sucção normalizada ( $pF/e$ ), mais uma vez mostra-se mais apropriado para a análise do comportamento do solo, mostrando uma ótima tendência de crescimento da resistência com o  $pF/e$ . Ao estudar a variação de resistência, Figura 8.18, observa-se que para os solos ZM3 e ZM6 não ocorrem crescimentos significativos de resistência ao se considerar o ramo seco e o úmido da curva de compactação, daí deduzindo-se que para estes materiais em estado natural não há nenhuma vantagem ao se variar a umidade de compactação.

As Figuras 8.19 e 8.20 apresentam os gráficos obtidos para os solos SF4 e SF8, respectivamente. Para estes solos também são verificadas algumas incoerências quando da análise isolada dos resultados. Cita-se como exemplo o aumento do mini-CBR com a umidade (e redução da sucção), para o solo SF4 compactado com 16% de umidade. Comportamento semelhante quanto à umidade pode ser verificado para o solo SF8 compactado a 13% de umidade. Destaca-se, no entanto, que o comportamento fica relativamente bem definido, respeitada a distribuição de poros, ao se trabalhar, com o  $pF/e$ . No caso do solo SF8, apesar da excelente tendência de variação do mini-CBR com a sucção, esta mostra pequenas variações.

Comparando-se as variações de mini-CBR apresentadas pelos solos SF (Figuras 8.21) é interessante observar que os valores de resistência e sucção aparentemente decrescem com o teor de argila (obtido com defloculante), conforme já observado para o grupo de solos HB, e ainda que o solo SF4 apresenta os maiores valores de suporte e sucção dentre os solos SF.

No geral, cabe destacar que essas análises, mesmo em termos de  $pF/e$ , para solos muito úmidos (acima da linha ótima), são muito delicadas, pois nessa condição, as sucções iniciais são baixas, podendo ocorrer bolhas oclusas em condição de ruptura não drenada, como é o caso do mini-CBR. Nesse caso, pode ocorrer geração de pressão neutra positiva. Como a sucção utilizada nos gráficos, corresponde ao estado do solo antes do ensaio de mini-CBR, ela não se refere às poropressões no momento do ensaio.

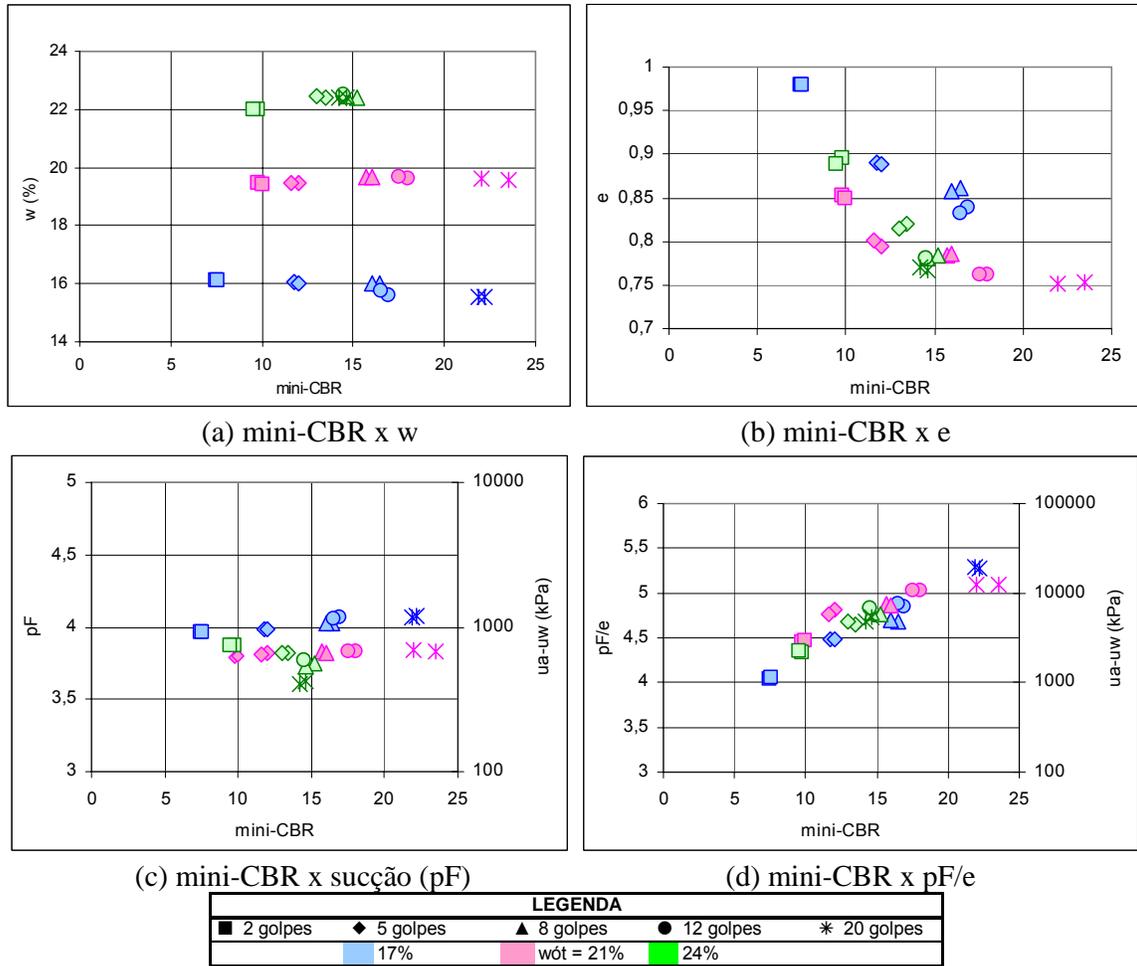


Figura 8.17 - Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6.

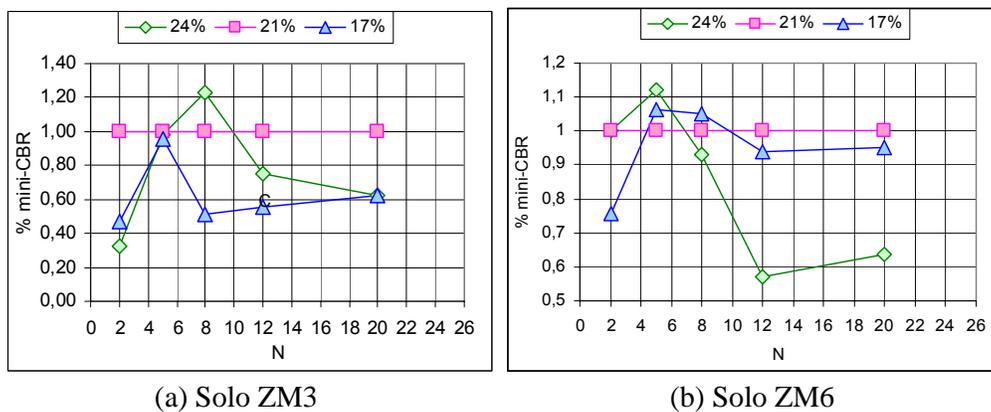


Figura 8.18 - Variação Percentual do Mini-CBR em Relação aos Valores obtidos para o Teor de Umidade de Compactação Ótimo – Solos ZM.

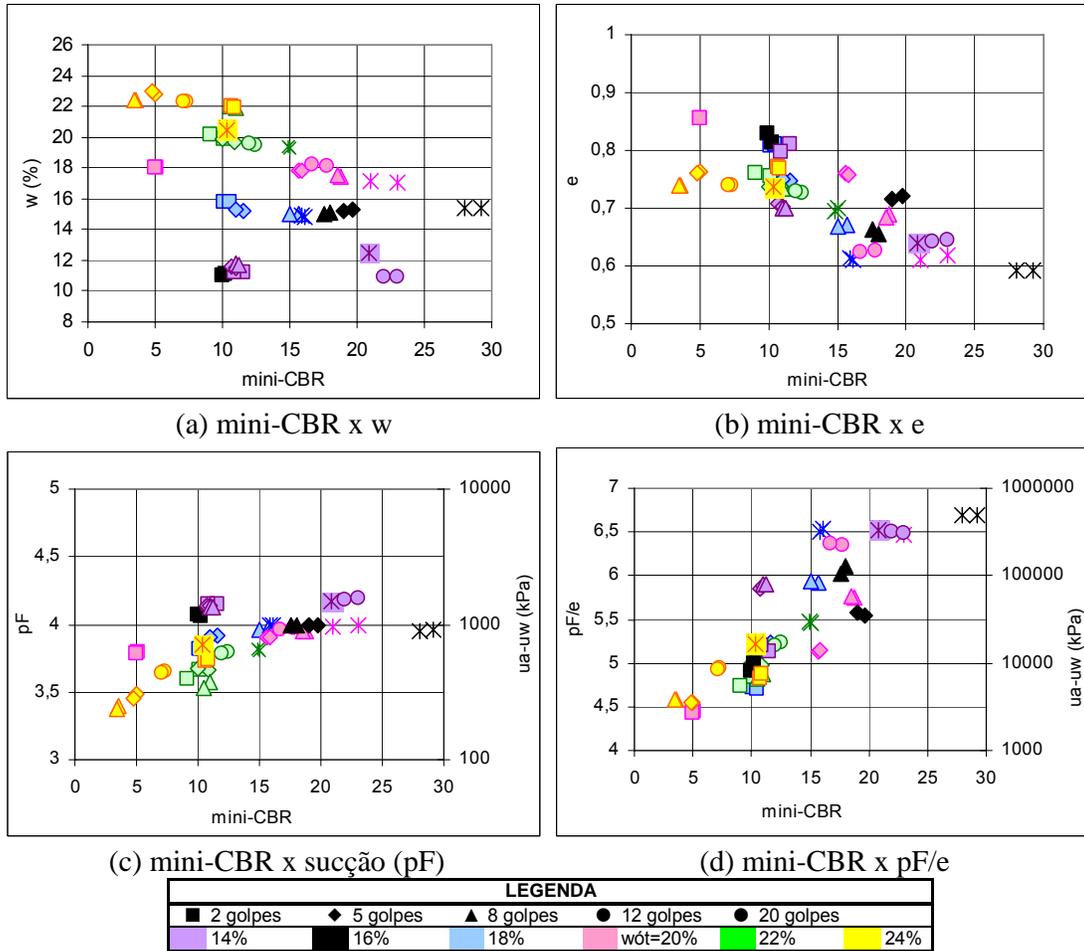


Figura 8.19 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF4.

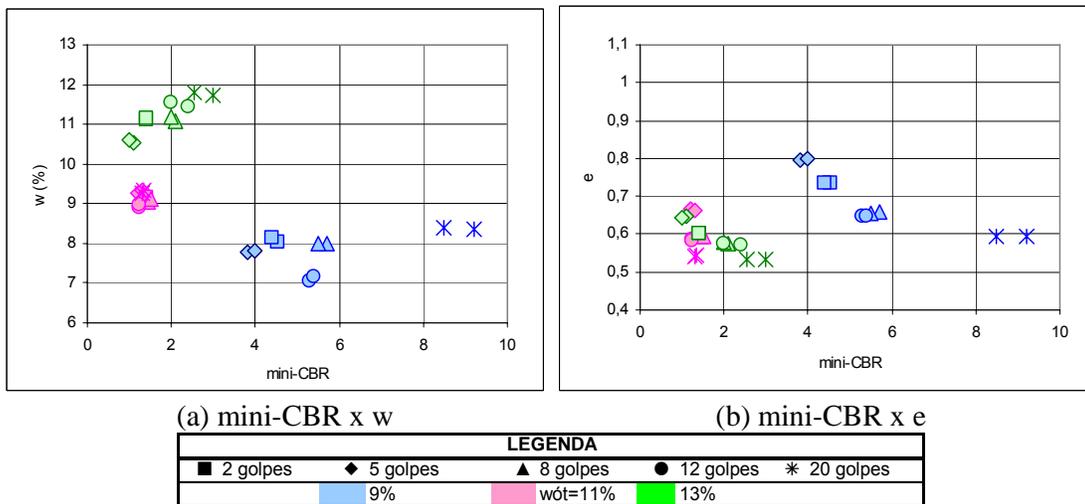
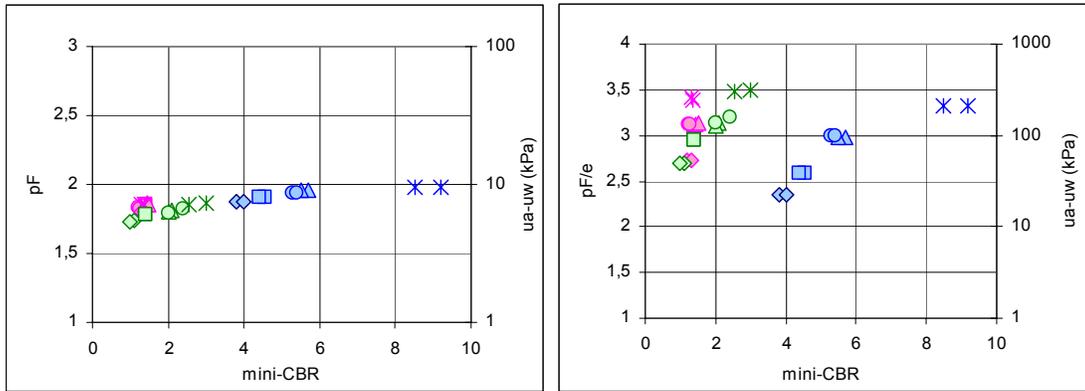


Figura 8.20 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF8.

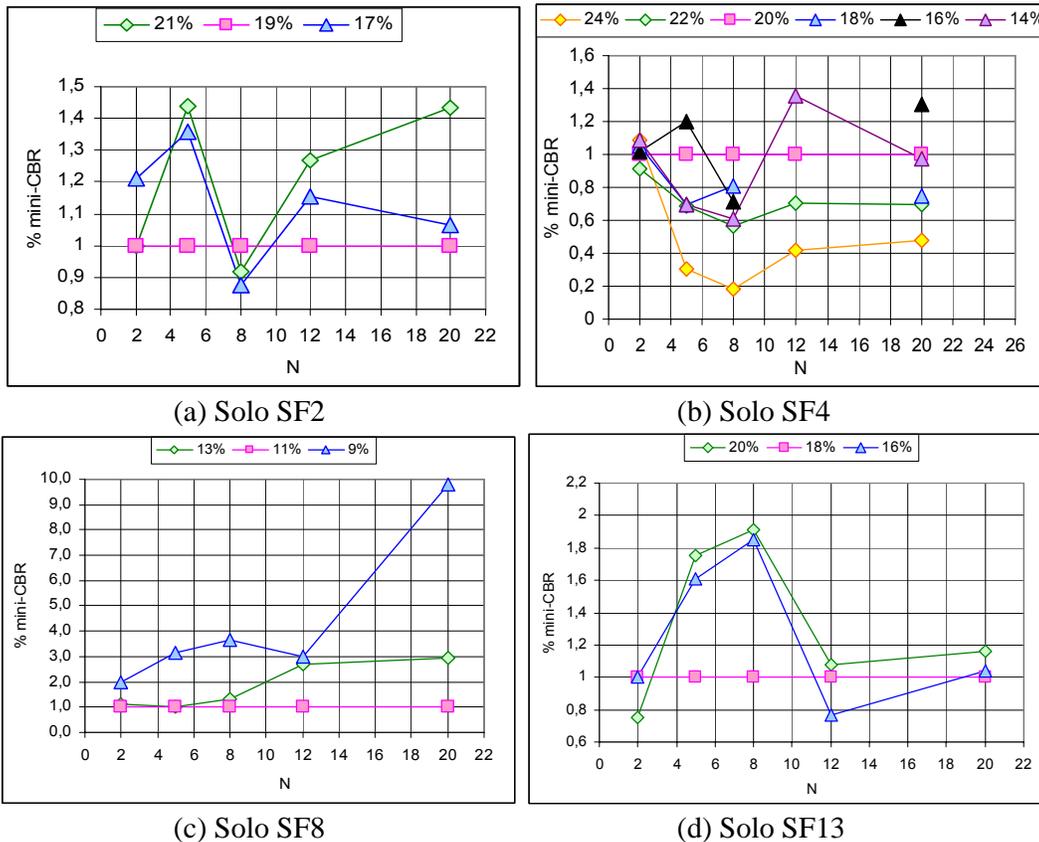


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA    |            |            |             |             |         |
|------------|------------|------------|-------------|-------------|---------|
| ■ 2 golpes | ◆ 5 golpes | ▲ 8 golpes | ● 12 golpes | * 20 golpes |         |
|            |            |            |             |             | 9%      |
|            |            |            |             |             | wót=11% |
|            |            |            |             |             | 13%     |

Figura 8.20 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF8 - Continuação.



(a) Solo SF2

(b) Solo SF4

(c) Solo SF8

(d) Solo SF13

Figura 8.21 - Variação Percentual do Mini-CBR, em Relação aos Valores obtidos para a Compactação na wót – Solos SF.

## 8.2.2 – Solos Compactados no Estado Natural e Saturados

O usual na pavimentação rodoviária é a aplicação dos materiais considerando os valores de resistência obtidos na condição imersa, sendo importante à determinação das resistências em tal condição, uma vez que elimina o efeito da sucção, fazendo sobressair os demais elementos diretamente relacionados ao comportamento dos solos. No entanto, como as energias utilizadas para compactação são as referentes ao PN, PI e PM, o estudo da resistência com o solo na condição saturada foi realizado apenas para os corpos de prova compactados a 5 (PN), 8 (PI) e 20 (PM) golpes; destacando-se ainda que, serão apresentados os resultados médios, uma vez que de forma similar à condição não saturada foram realizados um mínimo de 2 corpos de prova por condição de compactação. Um ponto ainda merece destaque: as legendas apresentadas em todas as Figuras que compõe este subítem são apresentadas com pontos cheios, quando corresponderem à condição não saturada e, pontos vazados, quando correspondem à condição imersa.

As Figuras 8.22, 8.24 e 8.25 apresentam os resultados de mini-CBR obtidos para os três grupos de solos estudados, considerando a condição de resistência não saturada e resistência obtida após imersão. Ressalta-se que, nos gráficos são apresentadas legendas em que consta, o teor de umidade de compactação usado conjuntamente à condição de ensaio. Por exemplo, 26%-N significa que o solo foi compactado a um teor de umidade de 26% e ensaiado no estado não saturado. Já para 26%-I, tem-se teor de umidade de compactação de 26% e resistência obtida após a imersão do corpo de prova.

De modo geral, a Figura 8.22 mostra que a imersão gera diferenças consideráveis em termos de resistência e, que, estas são variáveis com o tipo de material, a umidade e a energia de compactação empregada. São obtidos valores de mini-CBR imerso bastante reduzidos, de forma a inviabilizar a aplicabilidade da maioria dos latossolos como material de sub-base de pavimento.

É ainda interessante observar que, aparentemente as menores variações de suporte (Figura 8.23) são verificadas para o solo HB9b, que possui grande percentual de argila; mas mesmo para tal solo, a variação de resistência obtida com a imersão ainda depende da umidade de compactação usada. São verificados decréscimos de mini-CBR da ordem de 25% a 87% na resistência quando da imersão, podendo-se observar que os solos compactados na energia PN geralmente apresentam os maiores percentuais de decréscimo de resistência nas condições de compactação no ramo seco e no ótimo da curva de compactação. Ao crescer a

energia de compactação, tal percentual decresce para os solos HB7, HB9b, HB10 e HB12, comportamento contrário sendo observado para os solos HB11, HBR1 e HBR2.

Avaliando-se as perdas de resistência para os solos pertencentes à zona mosqueada (ZM) nota-se, para o solo ZM3 (Figura 8.24(a)), resultados de mini-CBR muito baixos, tanto na condição não saturada como imersa, característica esta decorrente da textura arenosa do solo. Já para o solo ZM6 (Figura 8.24(b)), verificam-se grandes percentuais de perda de resistência quando a amostra é submetida à imersão, tal comportamento se mostrando similar aos verificados para os solos HB.

Quanto ao grupo dos solos saprolíticos (Figuras 8.25), inicialmente é notável que o solo SF8 se destaca dos demais (Figura 8.25(c)), apresentando valores de resistência maiores ou iguais aos verificados na condição não saturada. Tal comportamento é semelhante ao observado para o solo ZM3, provavelmente em decorrência da similaridade textural entre os dois solos. Já para os demais solos deste grupo, o comportamento é similar aos dos solos HB, apresentando até 80% de redução de mini-CBR ao se considerar a imersão, para o solo SF4.

De forma a sintetizar as características dos materiais estudados, a Tabela 8.2 apresenta as possíveis aplicações dos mesmos nas condições não saturada e imersa. Esses resultados mostram que a sucção é responsável por grande parte da resistência dos solos estudados, permitindo enquadrá-los como materiais de melhor desempenho.

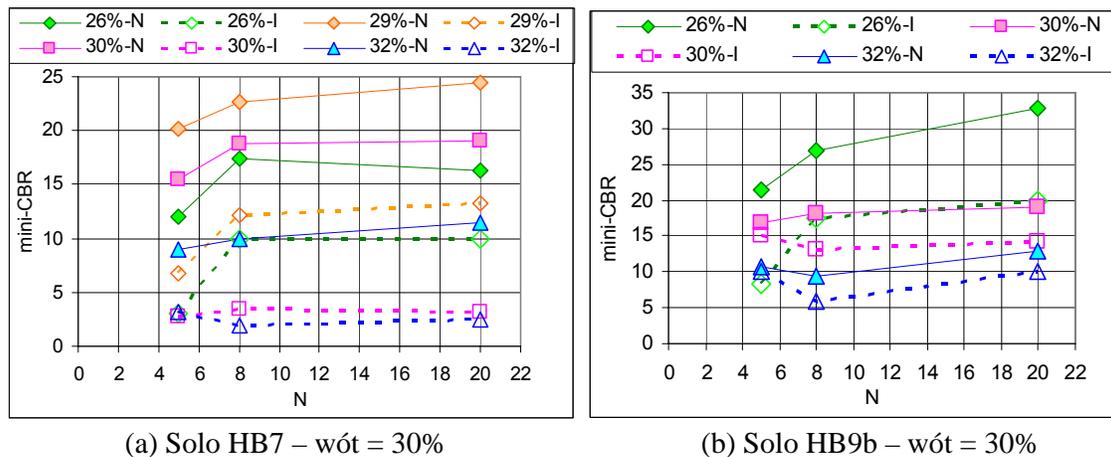
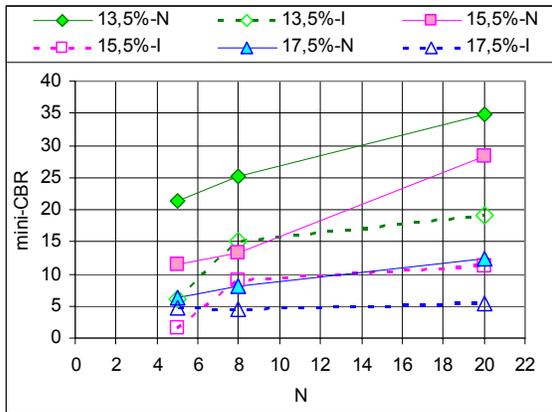
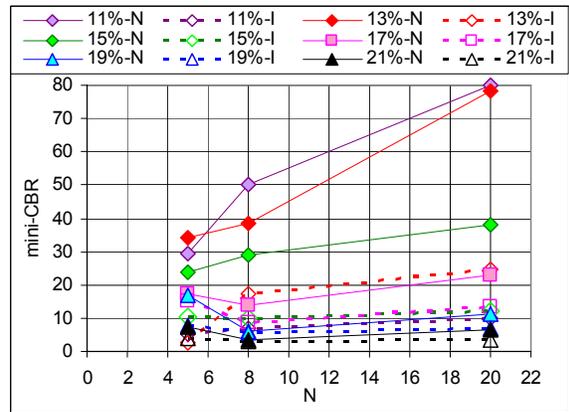


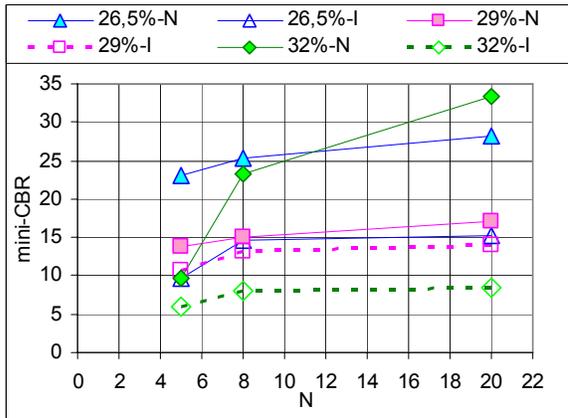
Figura 8.22 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Latossolos (HB).



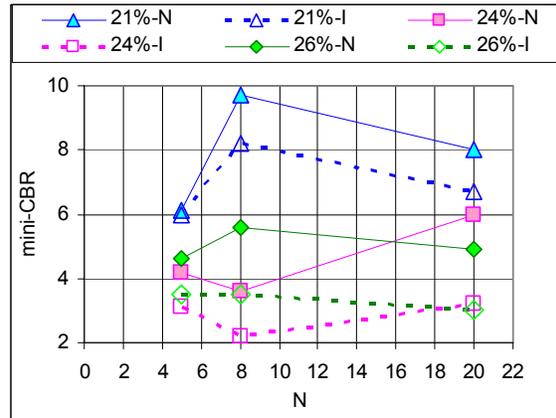
(c) Solo HB10 – wót = 15,5%



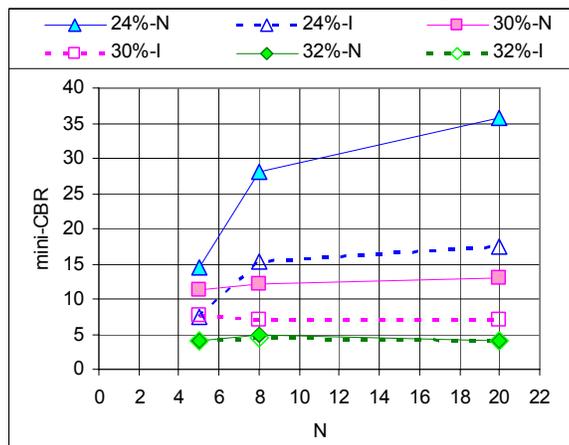
(d) Solo HB11 – wót = 17%



(e) Solo HB12 – wót = 29%



(f) Solo HBR1 – wót = 24%



(g) Solo HBR2 – wót = 30%

Figura 8.22 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Latossolos (HB) - Continuação.

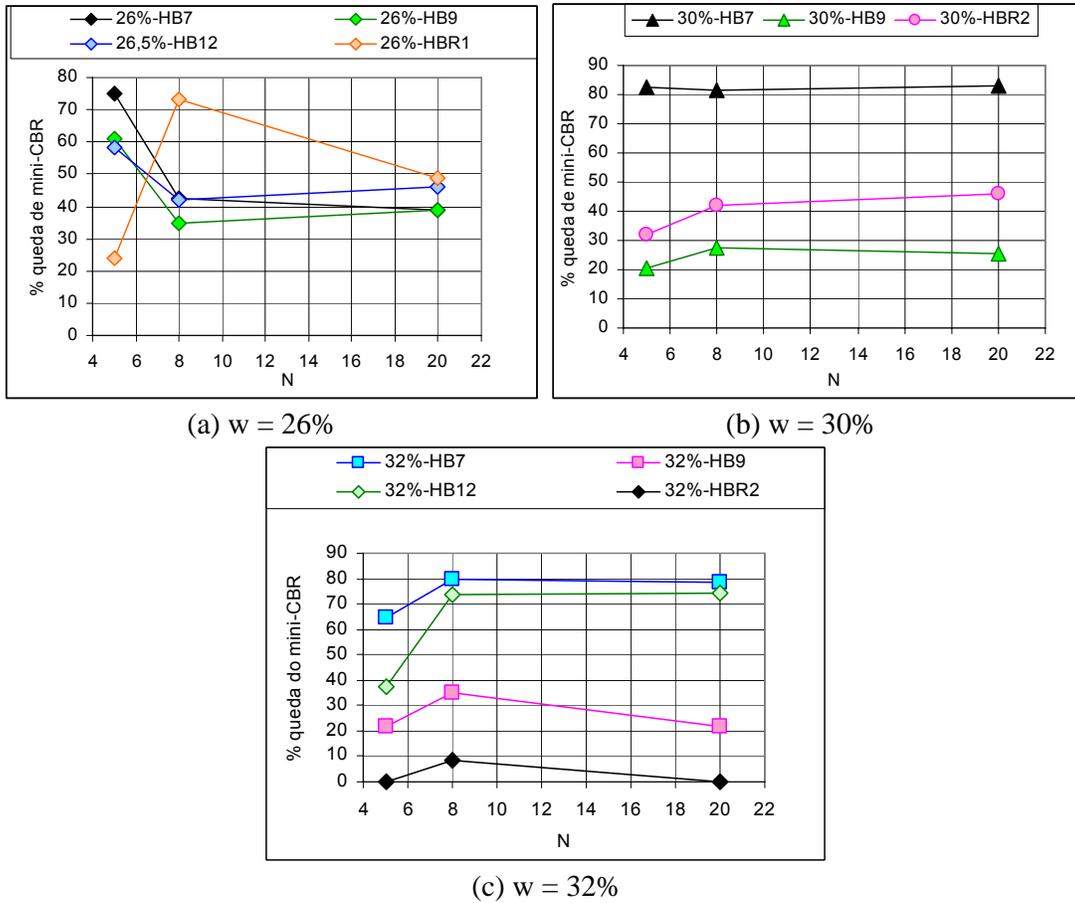


Figura 8.23 - Variação Percentual de Queda da Resistência Com a Imersão.

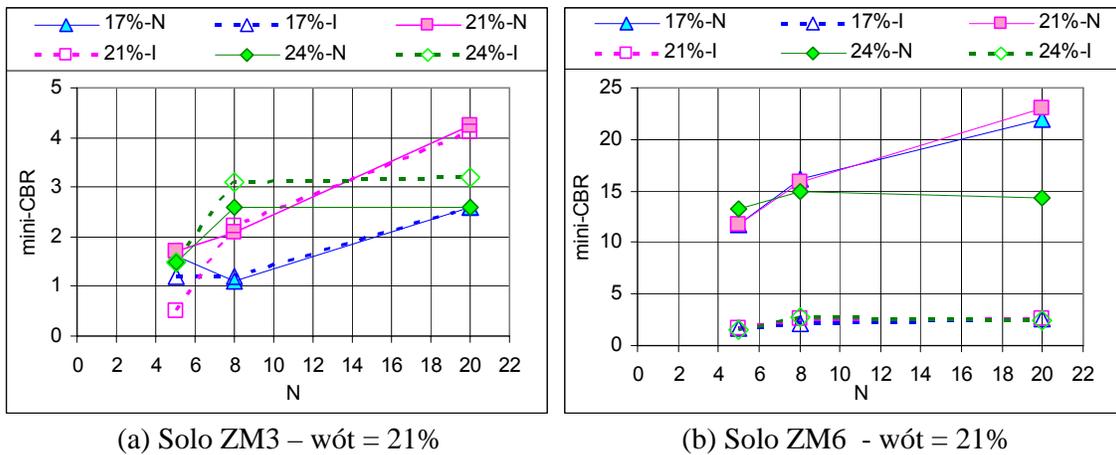


Figura 8.24 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos pertencentes a Zona Mosquedada (ZM).

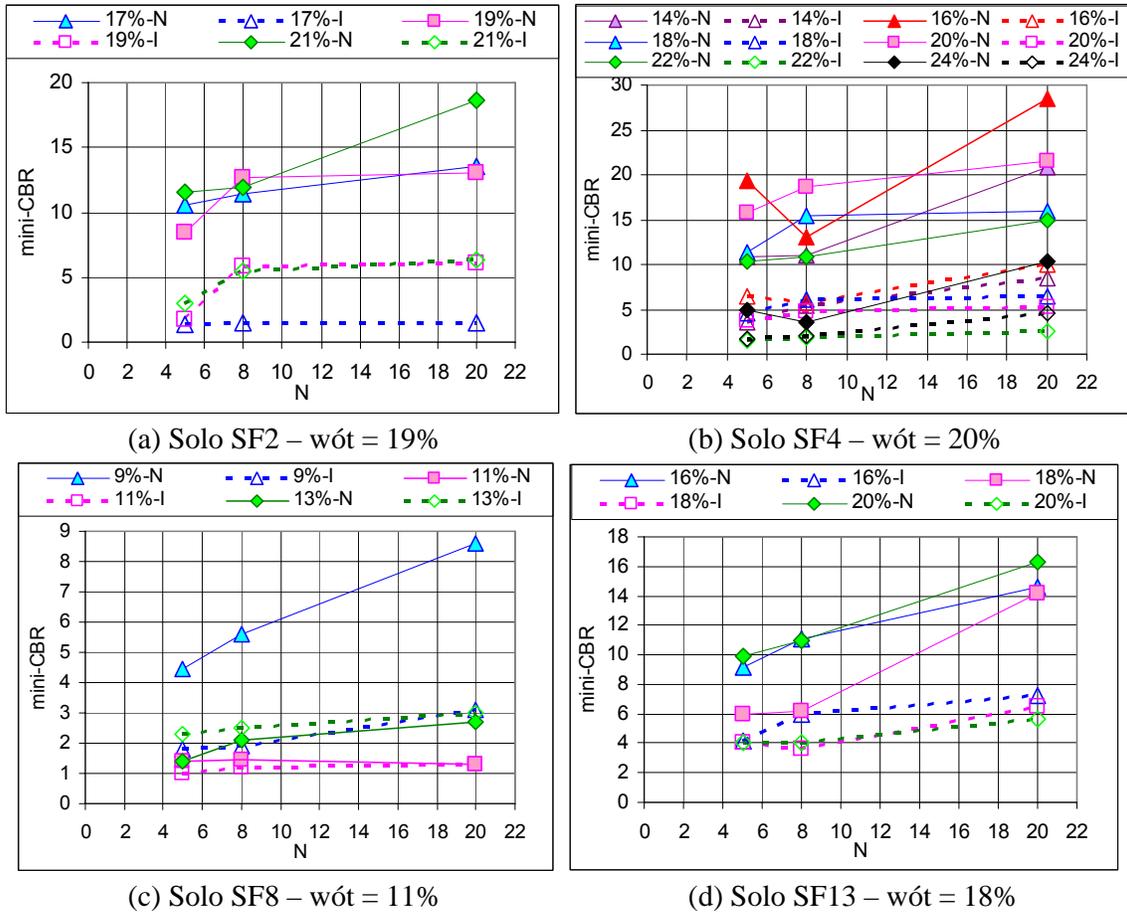


Figura 8.25 - Comparação entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos Saprolíticos Finos (SF).

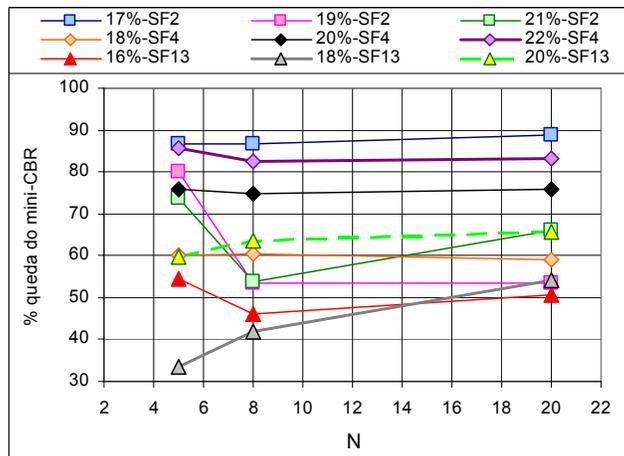


Figura 8.26 - Variação Percentual de Queda da Resistência Com a Imersão – Solos SF.

Tabela 8.2 – Aplicabilidade dos Materiais na Pavimentação Rodoviária.

| Material         | AMOSTRAS SEM IMERSAO |    |    |          |    |    |                  |    |    | AMOSTRAS COM IMERSAO |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
|------------------|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|---|
|                  | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    |   |
|                  | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM |   |
| HB7 - w=26%      |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB7 - w=29%      |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB7 - wót=30%    |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| HB7 - w=32%      |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| HB9b - w=26%     |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  |   |
| HB9b - wót=30%   |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |   |
| HB9b - w=32%     |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |   |
| HB10 - w=13,5%   |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  | x |
| HB10 - wót=15,5% |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  | x |
| HB10 - w=17,5%   |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| HB11 - w=11%     |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  | x |
| HB11 - w=13%     |                      |    | x  | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          | x  |    |                  |    | x  | x |
| HB11 - w=15%     |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB11 - wót=17%   |                      |    |    | x        |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    | x        |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB11 - w=19%     |                      |    |    |          |    |    | x                |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  |    | x |
| HB11 - w=21%     |                      |    |    |          |    |    | x                |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| HB12 - w=26,5%   |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB12 - wót=29%   |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB12 - w=32%     |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  | x |
| HBR1 - w=21%     |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  | x |
| HBR1 - wót=24%   |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| HBR1 - w=26%     |                      |    |    |          |    |    | x                | x  |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| HBR2 - w=26%     |                      |    |    |          | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HBR2 - wót=30%   |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HBR2 - w=32%     |                      |    |    |          |    |    | x                |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM3 - w=17%      |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM3 - wót=21%    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM3 - w=24%      |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM6 - w=17%      |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM6 - wót=21%    |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM6 - w=24%      |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - w=17%      |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - wót=19%    |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - w=21%      |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - w=14%      |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=16%      |                      |    | x  |          | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=18%      |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - wót=20%    |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - w=22%      |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - w=24%      |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - w=9%       |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - wót=11%    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - w=13%      |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF13 - w=16%     |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - wót=18%   |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - w=20%     |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |

### 8.2.3 – Solos Estabilizados Não Saturados Compactados na Umidade Ótima

Partindo-se da situação em que é necessária a implantação de uma rodovia e que os materiais destinados a ela são os já apresentados nos itens 8.2.1 e 8.2.2, pretende-se ampliar a aplicabilidade dos mesmos com a finalidade de se obter um maior número de condições de compactação em que os diferentes solos possam ser usados como material destinado à execução da camada de base do pavimento. Devido ao menor custo da cal, em detrimento ao cimento ou mesmo a altas distâncias de transporte para uso de materiais granulares tradicionalmente usados para compor camadas de base e sub-base rodoviárias, optou-se por trabalhar com estabilização química com diferentes teores cal. Portanto, inicialmente verificar-se-á o melhoramento dos diferentes tipos de solos compactados na condição de umidade ótima e, com 3 diferentes teores

de cal incorporados. Sabendo-se que o índice de vazios também influi de forma significativa no comportamento dos solos naturais e estabilizados serão apresentados conjuntamente à sucção, à variação da umidade e do índice de vazios em relação ao valor de mini-CBR medido.

As Figuras 8.27 a 8.29 correspondem aos resultados referentes aos latossolos HB7, HB11 e HBR1, representativos do padrão comportamental verificado nos demais solos, apresentando-se os demais resultados no anexo VI.

Os gráficos da Figura 8.27 mostram que, ao se misturar 2% de cal ao solo e proceder à compactação mesmo ocorre queda nos valores de sucção, comportamento este comprovado pelo aumento do índice de vazios e, redução da sucção, com conseqüente diminuição de  $pF/e$ . Com a queda de sucção e de  $pF/e$ , o material apresenta comportamento mecânico pior do que a amostra natural, ou seja, o mini-CBR cai. Continuando o estudo, foi incorporado 4% de cal ao solo. Para este teor de cal, verifica-se que, apesar do índice de vazios ( $e$ ) ser superior ao da amostra natural, os valores de sucção são semelhantes, o que a princípio indicaria redução de resistência. No entanto, os valores de resistência se apresentam até 100% superiores aos verificados para o solo natural, comportamento este certamente decorrente de reações químicas geradas quando da estabilização com cal. Aumentando-se a mistura para 6% de cal a ser misturada, nota-se comportamento de aumento de mini-CBR similar ao observado para o teor de 4% de cal, o que indica que dentre os teores estudados, 6% como o teor ótimo de cal a ser misturado no solo HB7 para se obter as melhores condições de suporte. É importante ressaltar que, a ocorrência de inicial queda de sucção e resistência para 2% de cal é provavelmente decorrente da variação de pH ocorrida entre a amostra natural e a estabilizada (Tabela 5.3), fazendo com que o pH ao passar pelo ponto isoelétrico do solo gerasse a sua desagregação e conseqüente queda de resistência. Destaca-se ainda que a variação de pH gerou a duplicação do valor de  $\Delta pH$ . Ao elevar o teor de cal para 4%, tal valor diminui consideravelmente, se tornando positivo, embora o pH em KCl sofra elevação. Acrescendo-se para 6% de cal na mistura, o pH e o  $\Delta pH$  elevam consideravelmente em relação ao verificado para a mistura de 4% de cal, o que também foi comprovado através de acréscimo de resistência (Figuras 8.27 e 8.34). O padrão comportamental verificado para o solo HB7 também pode ser observado nos solos HB9b, HB10 e HB12 (anexo VI), no entanto, nota-se que ao incorporar o menor teor de cal (2%) os valores de suporte e sucção não decrescem, contrariamente ao solo HB7, mas se mantém apesar de serem verificadas variações consideráveis de índice de vazios. De acordo com a CTC obtida para as amostras, estes solos são mais reativos que o HB7, portanto é provável que as variações de pH ocorridas para a amostra com 0% e 2% de cal, tenham sido contrabalanceadas por esta maior capacidade de reação, o que gerou valores de resistência e

sucção similares. Quanto à incorporação de maiores teores de cal na mistura, o solo HB10 mostra variação de  $\Delta\text{pH}$  semelhante a do solo HB7, o que deveria indicar acréscimo de resistência com a elevação da cal na mistura. No entanto, os valores de resistência obtidos para 6% de cal permanecem semelhantes aos observados para 4%; o que aponta para a saturação calcária do solo ao se incorporar 6% de cal. Também para os solos HB9b e HB12 ocorre acréscimo de resistência para o teor de 4% de cal, no entanto para 6%, os valores de resistência se mantêm. Tal efeito pode estar ligado ao decréscimo de pH e  $\Delta\text{pH}$  existente para estes solos, o que conjuntamente a CTC gera “estabilização” da resistência. Após tais observações, conclui-se que provavelmente os mecanismos de reação da cal com os solos citados são divergentes, no entanto, em termos de comportamento mecânico, que é a finalidade deste trabalho, os solos se aproximam.

Nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, vários são os fatores capazes de interferir na resistência do solo e alguns deles, de modo oposto. Assim, por exemplo, enquanto a desagregação ocorre nos solos com pH inferior ao do ponto isoelétrico, contribuindo para a queda de resistência com a incorporação da cal, essa mesma incorporação gera reações de cimentação que contribuem para o ganho de resistência. Logo, a melhoria ou piora do comportamento do solo está ligada ao predomínio dos fatores positivos ou negativos. Com o aumento do teor de cal, a desagregação pode atingir seu limite, podendo ocorrer reversão, ou seja, agregação, o que termina por ampliar as reações de reestruturação, gerando a melhoria da resistência do solo.

Os efeitos da desagregação na eficiência da compactação, ou seja, na redução de índice de vazios para a mesma energia, também depende desse conjunto de variáveis, embora a desagregação por si só geralmente contribua para a redução do índice de vazios quando da compactação, o que não significa necessariamente melhoria de comportamento mecânico.

Na tentativa de melhor entender esses mecanismos foram realizados ensaios bastante simples. Após a mistura do solo à cal, no teor de umidade de compactação, esperou-se 24 horas e, realizaram-se ensaios de sedimentação sem agitação no dispersor e, sem defloculante. A Figura 5.29 ilustra esses mecanismos de desagregação e agregação que ocorrem no solo HB12 com a incorporação de cal. O conjunto de resultados obtidos segundo essa técnica, se encontram no subitem 5.3.

Para o solo HB11 (Figura 8.28), a incorporação de 2% de cal já promove melhoria de suporte que, também não é decorrente de variação de índice de vazios (já que estes aumentam) e nem de sucção (já que estas diminuem), o que no conjunto gera valores de  $\text{pF}/e$  menores para o solo estabilizado, sendo então ocasionadas por reações químicas decorrentes da mistura do

solo com a cal. Reações estas que se refletem nos valores de pH (Tabela 5.3) que crescem consideravelmente. Ao acrescer o teor de cal verifica-se aumento de resistência, provavelmente decorrente da redução de índice de vazios das misturas de 4% e 6% de cal, que possuem índices de vazios coincidentes aos verificados para o solo natural. Este padrão de comportamento pode ser também observado no solo HBR2 (anexo VI). É importante ainda observar que, entre 4% e 6% de cal, a variação das resistências não é tão significativa (Figura 8.34(b)).

Quanto ao solo HBR1 (Figura 8.29), a incorporação de 2% de cal resultou em redução nos valores de sucção e índices de vazios verificados para o material natural. Acrescendo-se 4% de cal ao solo, ocorreu floculação, comportamento este, que pode ser verificado pela variação do índice de vazios. Ao incorporar 6% de cal, a floculação ocorrida no solo adquire consistência, não sendo destruída com o aumento da energia de compactação e, apresentando redução na resistência à penetração. Esta variação comportamental pode estar ligada à passagem pelo ponto isoelétrico do solo à medida que a cal é incorporada ao material solto; sendo ainda notável a variação crescente e decrescente dos pH e  $\Delta$ pH ao se incorporar diferentes teores de cal (Tabela 5.3). A Figura 8.34(c) mostra os percentuais de elevação de resistência com a estabilização ao se considerar energias iguais, destacando o fato do teor ótimo de cal ser igual a 4%.

As Figuras 8.34 e Figuras VII.1 (anexo VII) sintetizam os percentuais de ganho de resistência com a estabilização química, mostrando que para 2% de cal os solos mais reativos são o HB11 e o HBR1; para 4% de cal nota-se que a grande maioria dos latossolos são bastante reativos, destacando-se o HB12 e o HBR1 e, finalmente para o teor de 6% de cal citam-se os solos HB7 e HBR2. É notável que, dependendo da energia de compactação (N), o percentual de acréscimo de resistência pode ser mais ou menos elevado e que, o acréscimo de energia necessariamente não indica maiores valores de suporte, conforme pode ser mais nitidamente visualizado nas Figuras 8.27(c), 8.28(c), 8.29(c) e VI.1(c).

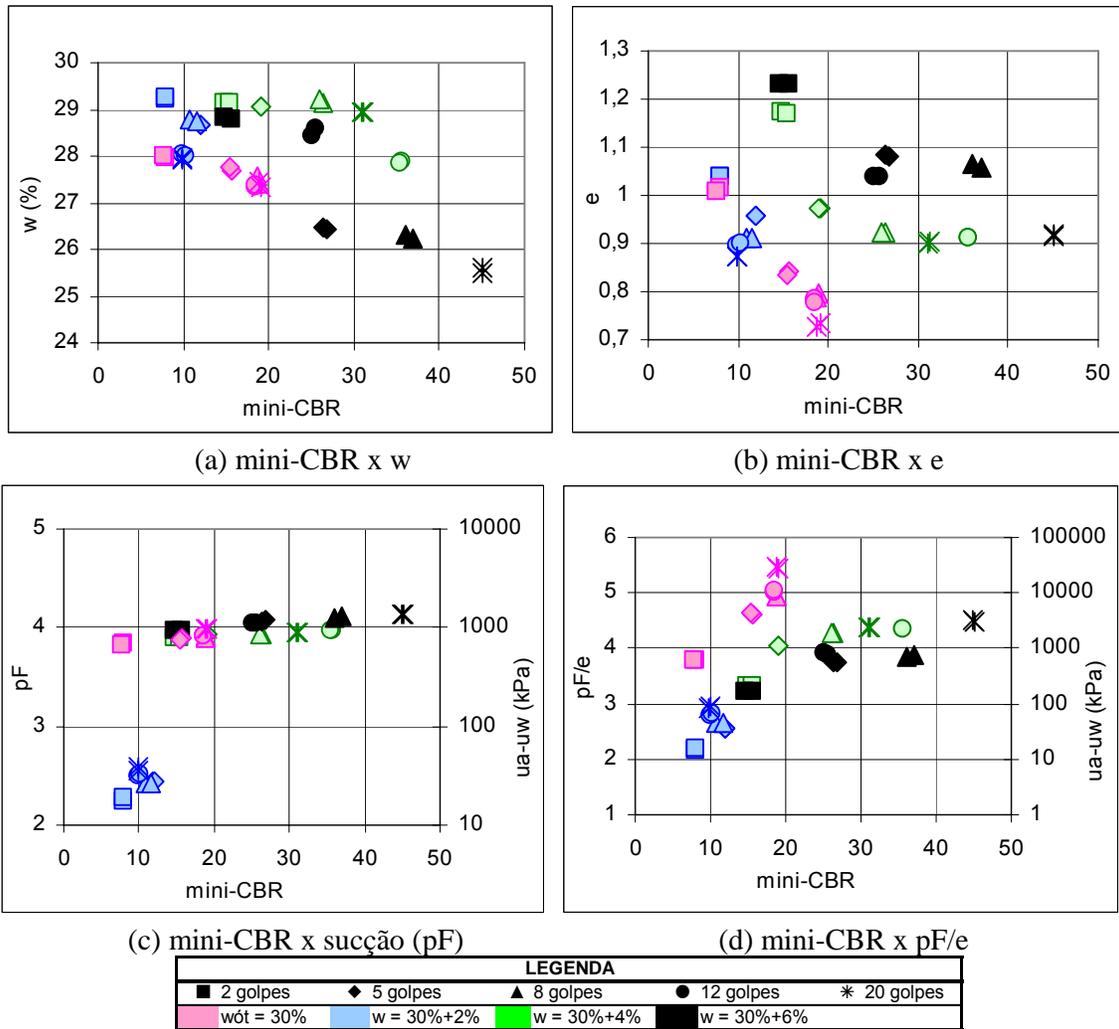


Figura 8.27 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB7.

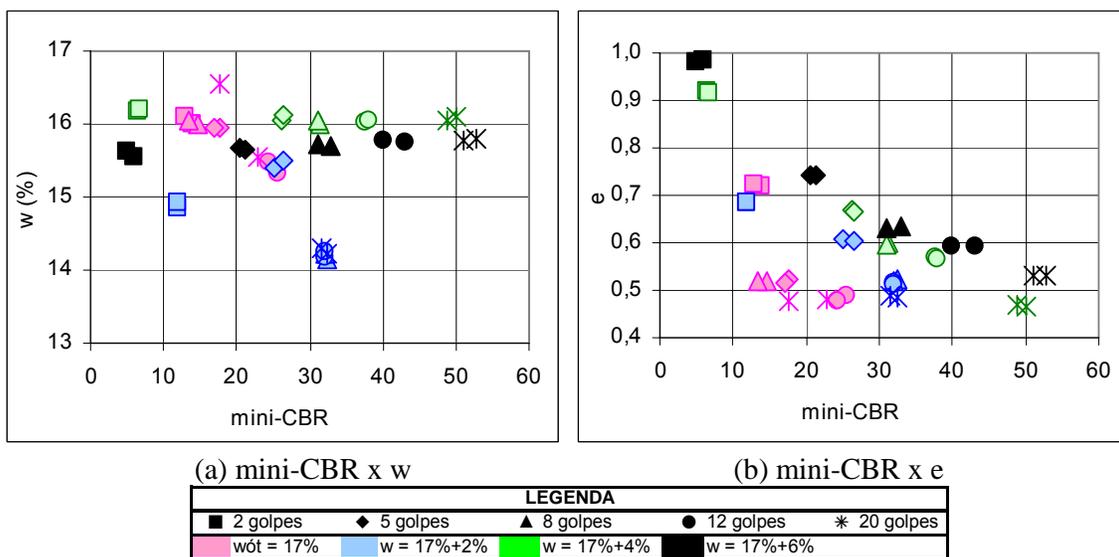
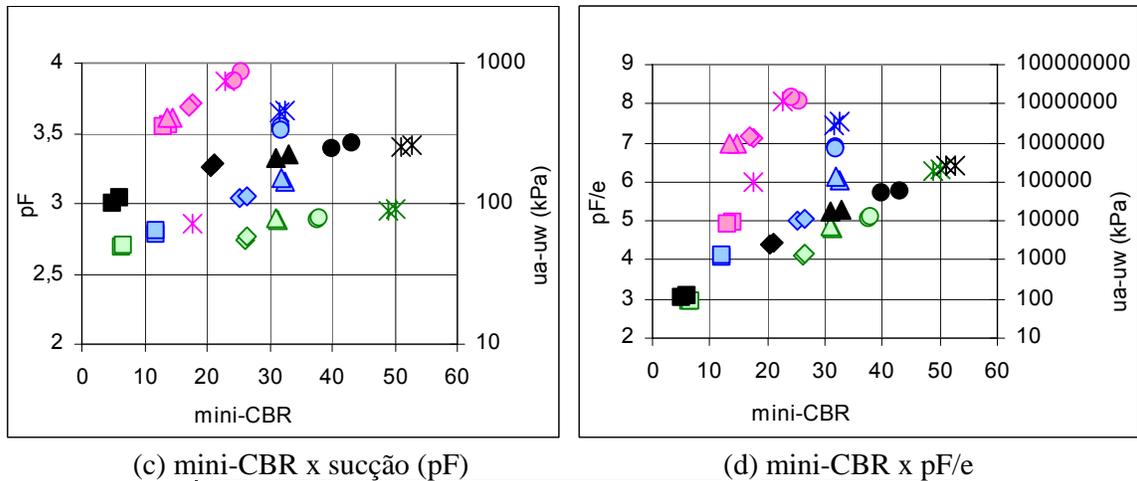
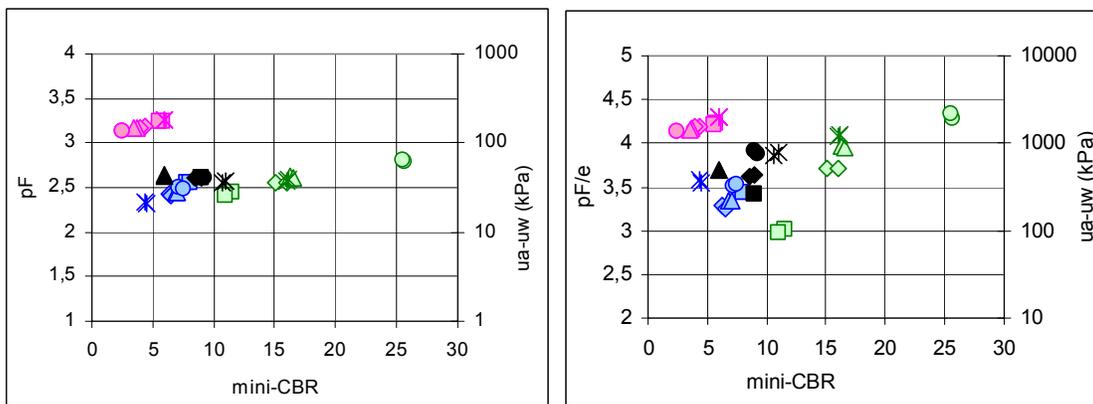
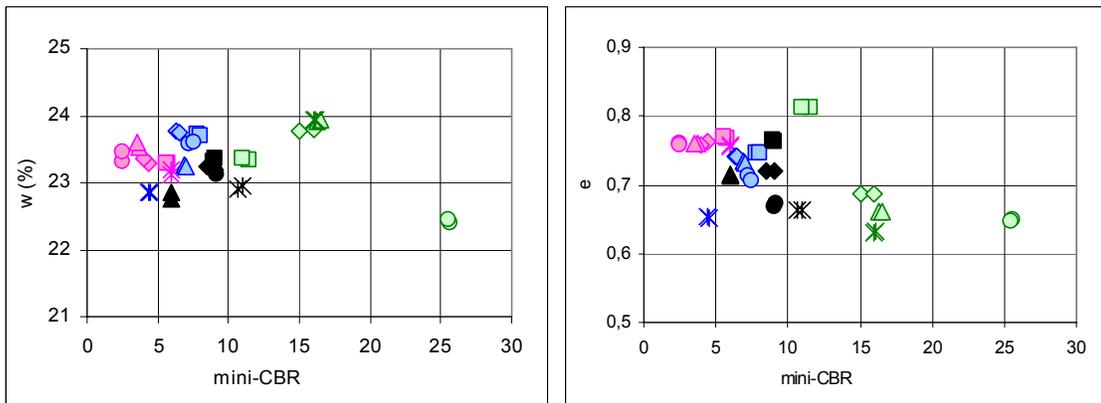


Figura 8.28 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB11.



| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 17% | ■ w = 17%+2% | ■ w = 17%+4% | ■ w = 17%+6% |             |

Figura 8.28 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB11 - Continuação.



| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 24% | ■ w = 24%+2% | ■ w = 24%+4% | ■ w = 24%+6% |             |

Figura 8.29 - Variação do Mini-CBR para o Solo HBR1.

É válido ainda lembrar que, de acordo com o método de Eades & Grim (1966), *apud* Santos (2004), os teores ótimos de cal a serem usados seriam divergentes daqueles em que o solo apresenta melhor condição de suporte, portanto pode-se afirmar que em termos de comportamento mecânico não é válida a estimativa dos autores para a condição não saturada dos solos.

Os resultados da estabilização dos solos pertencentes à zona mosqueada são apresentados nas Figuras 8.30 e 8.31. Os resultados do solo ZM3 (Figura 8.30) mostram a ocorrência de pequeno acréscimo na sucção ao incorporar a cal, acréscimos estes que provavelmente contribuíram para gerar os aumentos de mini-CBR verificados para o material estabilizado. As diferenças mais significativas ocorreram, com a incorporação da cal, em termos de índice de vazios (aumento de  $e$ ), é provável que as parcelas referentes à sucção e índice de vazios contribuam conjuntamente para a melhoria do comportamento mecânico, tendo em vista o ganho de resistência com a relação  $pF/e$ . Neste solo o papel das reações químicas fica aparentemente em segundo plano em relação à melhoria do comportamento, devendo ainda ser levado em conta o elevado teor de quartzo presente nesse solo. Destaca-se ainda que, apesar da melhoria de resistência (Figura 8.35(b)), esta não foi suficiente para a aplicação deste material além de camada de reforço de subleito. Já para o solo ZM6 (Figura 8.31), observa-se que a incorporação da cal resultou acréscimo de índice de vazios, manteve os valores de sucção similares e mostrou melhoria da capacidade de resistência do material já para 2% de cal na mistura. A Figura 5.46 mostrou (subítem 5.3) que a cal propiciou a desagregação do solo e, esta conduziu, ao contrário dos solos profundamente intemperizados, a uma menor eficiência da compactação. Essa alteração proporcionou o destaque dos resultados de  $pF/e$ , para solo natural, em relação aos demais. Uma vez que, a incorporação de maiores percentuais de cal não resultou em variações consideráveis de resistência (Figura 8.35(b)), apesar de percentualmente serem significativas, pode-se afirmar que 2% seria o teor ótimo de cal para o solo ZM6 compactado no teor ótimo de umidade. É importante, no entanto, observar que tais variações positivas de resistência podem estar ligadas a alterações estruturais e a pequena alteração da resistência, ocorridas a partir de 2% de cal, fato este que se explica pela estabilização do pH a partir de 2% de cal (Tabela 5.3). Destaca-se, portanto, que ao contrário do observado para os solos profundamente intemperizados, aqui, o critério de Eades & Grim (1966) se ajusta à perfeição.

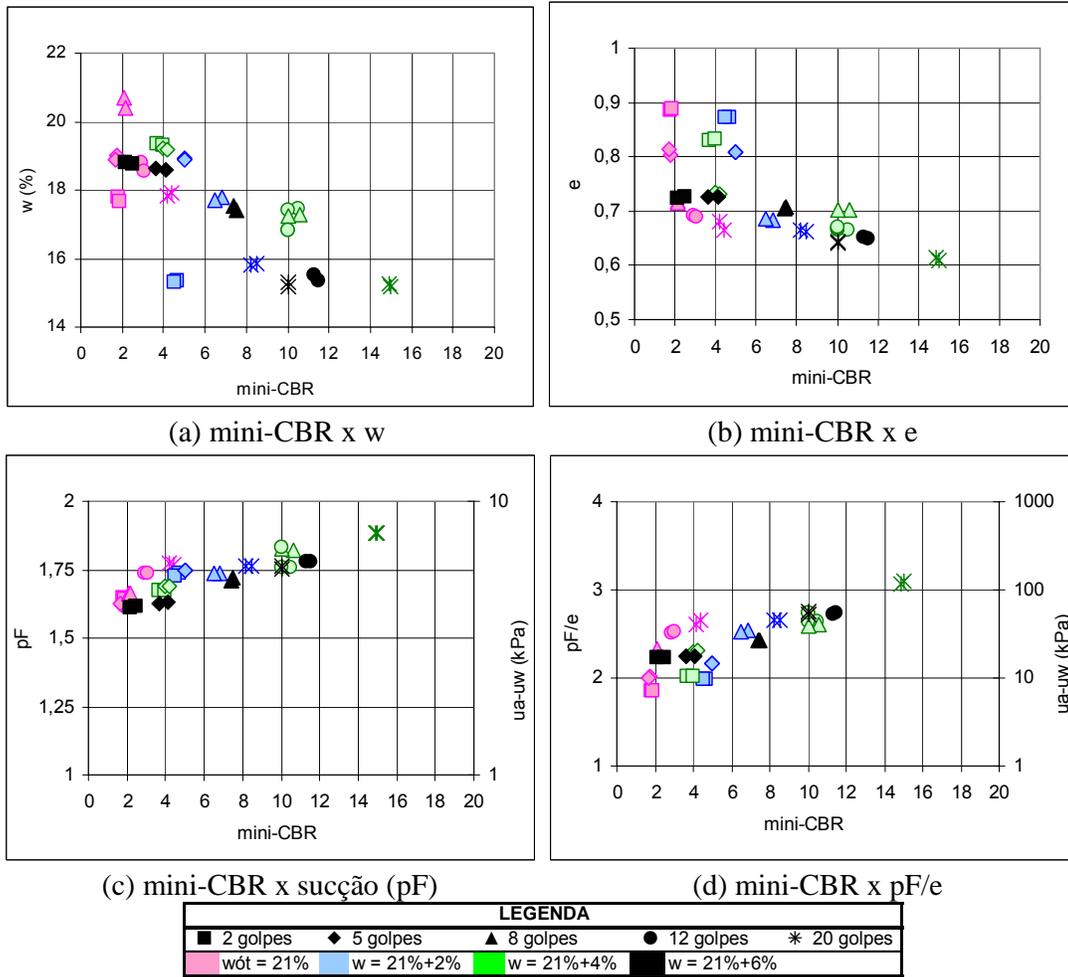


Figura 8.30 - Variação do Mini-CBR para o Solo ZM3.

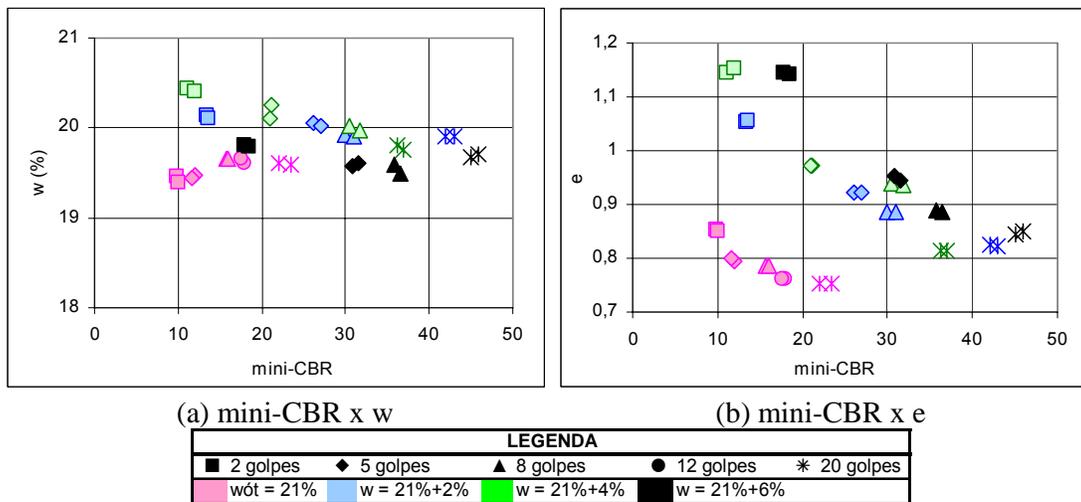


Figura 8.31 - Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6.

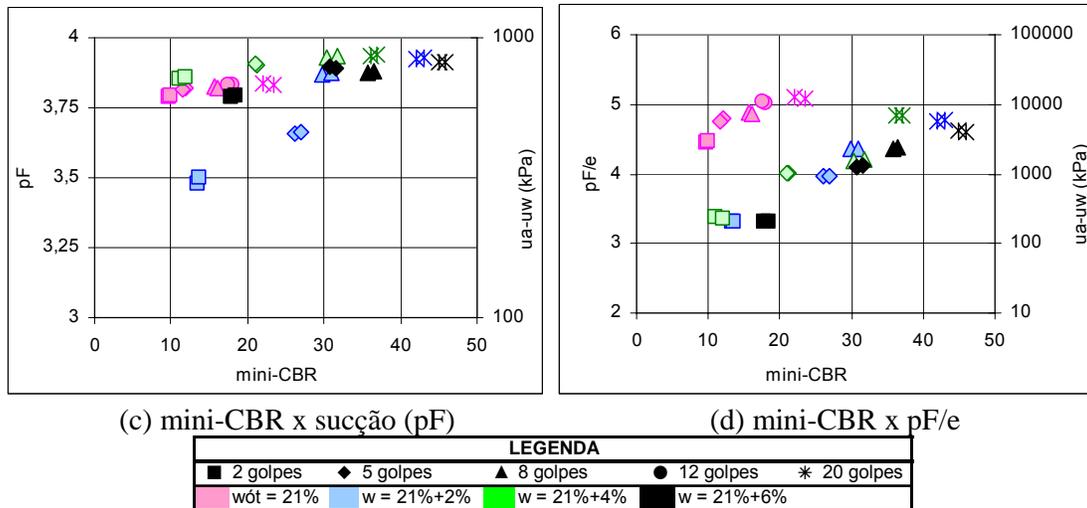


Figura 8.31 - Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6 - Continuação.

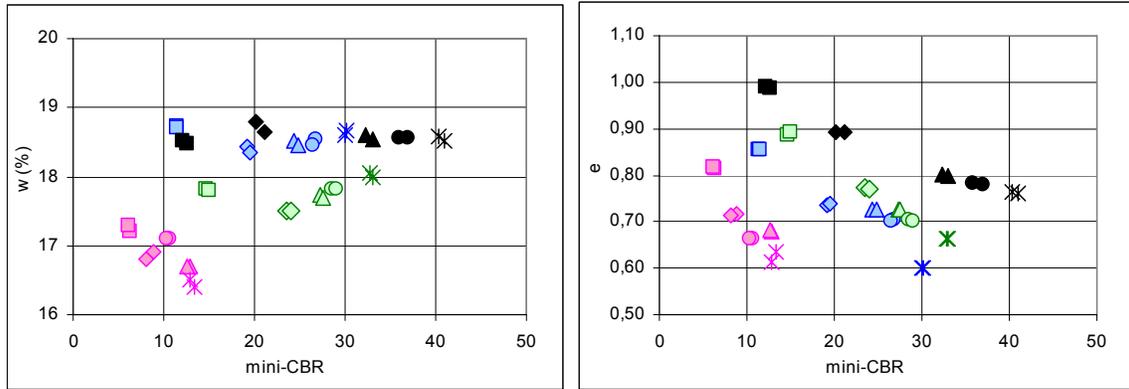
De forma similar aos grupos de solos HB e ZM, são apresentados nas Figuras 8.32 e 8.33, resultados típicos obtidos quando da estabilização dos solos saprolíticos.

Para o solo SF2 (Figura 8.32) os resultados mostram que a mistura realizada gera gradual elevação de índice de vazios até o teor de 4%, sendo o aumento mais substancial, verificado para 6%. Apesar deste aumento de porosidade, se tem a elevação do mini-CBR com o acréscimo do teor de cal. O efeito da cal na sucção não é bem definido, no entanto, no gráfico de mini-CBR em função do pF/e, ficam bem definidas três tendências que se deslocam para a direita e para baixo, com o aumento do teor de cal, refletindo provavelmente distribuições de poros distintas. A não ocorrência de acréscimo na sucção apesar da elevação do mini-CBR, mostra o papel marcante das reações químicas em um solo com valores de CTC consideráveis e ainda onde se observa elevação marcante de pH com a adição da cal. Incorporando 4% de cal ao solo SF2, observa-se que o índice de vazios aumenta e a sucção também, havendo aparentemente uma compensação que faz com que a resistência praticamente não varie. Já ao se usar 6% de cal, ocorre redução da sucção e aumento de índice de vazios e, conjuntamente se verifica a elevação discreta do mini-CBR, em relação à mistura com 4% de cal. Portanto, esse ganho pode ser atribuído às reações químicas geradas pela cal. As variações percentuais médias de resistência (Figura 8.36(a)), para uma mesma energia de compactação (N), apontam para a possibilidade de uso de diferentes percentuais de cal, na estabilização do solo SF2. A Figura 5.58, apresentada no subitem 5.3, mostrou que para 6% de cal ocorre uma substancial agregação do solo.

Este padrão comportamental, verificado para o solo SF2, pode ser observado ainda no solo SF13 (anexo VI), embora não se verifique o mesmo efeito quanto aos acréscimos percentuais de mini-CBR (Figura VII.2 (b)) para uma mesma energia de compactação (N). É necessário destacar que para o solo SF13, possivelmente o mecanismo de reação se distingue do verificado para o SF2. Observa-se, por exemplo, que apesar do pH crescer com a incorporação da cal, a CTC é bem menor do que a apresentada pelo solo SF2, o que pode justificar as pequenas variações da resistência.

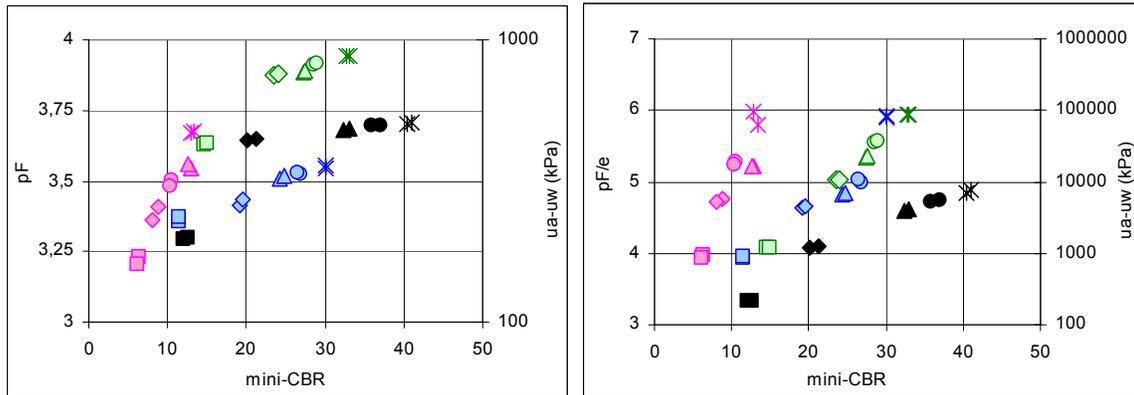
Quanto ao solo SF4 (Figura 8.33) a incorporação de cal aparentemente gerou apenas pequenas variações de índice de vazios, sendo responsável, no entanto, pela redução da sucção e da relação pF/e. Quanto à capacidade de suporte, esta praticamente não foi afetada pela incorporação da cal. Portanto, é notável que para este material compactado no teor ótimo de umidade, a incorporação da cal não conduz a melhoria de mini-CBR (Figura 8.36(b)), apesar da substancial elevação de pH já para 2% de cal.

É importante ainda destacar que o solo SF8 (anexo VI) mostra acréscimos elevados de resistência para 2% de cal, estes sendo reduzidos à medida que maior percentual de cal são incorporados ao solo (Figura VII.2 (a)). Nota-se ainda que a redução de mini-CBR se dá à medida que o teor de cal é acrescido e a sucção diminui. Desta forma, observa-se que a cal inicialmente contribui para o acréscimo da sucção, talvez pela própria redução no teor de umidade, e conseqüentemente da resistência e ainda, para teores de 4% e 6% de cal, aparentemente ocorre uma maior saturação do material, gerando decréscimo de sucção e resistência. De forma similar ao solo ZM3, por se tratarem de solos arenosos, destaca-se ainda que, o aspecto textural e mineralógico da amostra influem de forma significativa no comportamento mecânico, tanto do material natural quanto no estabilizado, sobretudo diminuindo no último caso, a possibilidade de reações químicas por falta de minerais de argila no solo.



(a) mini-CBR x w

(b) mini-CBR x e

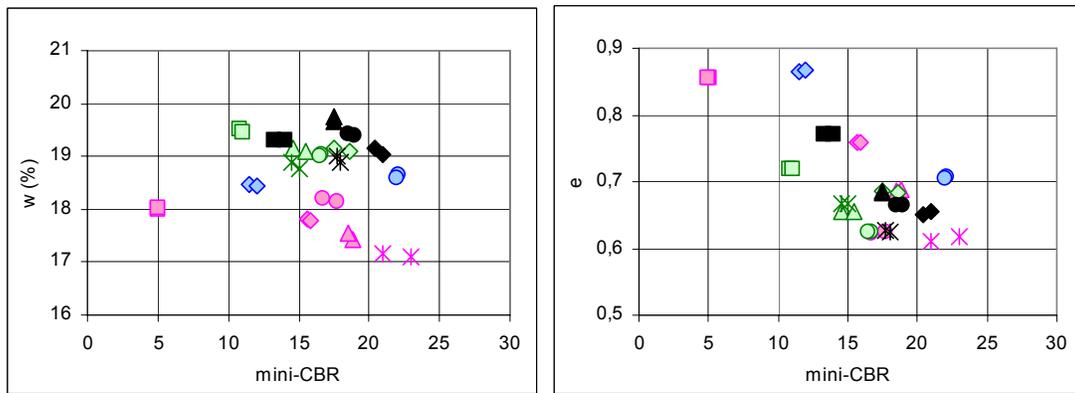


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 19% | ■ w = 19%+2% | ■ w = 19%+4% | ■ w = 19%+6% |             |

Figura 8.32 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF2.

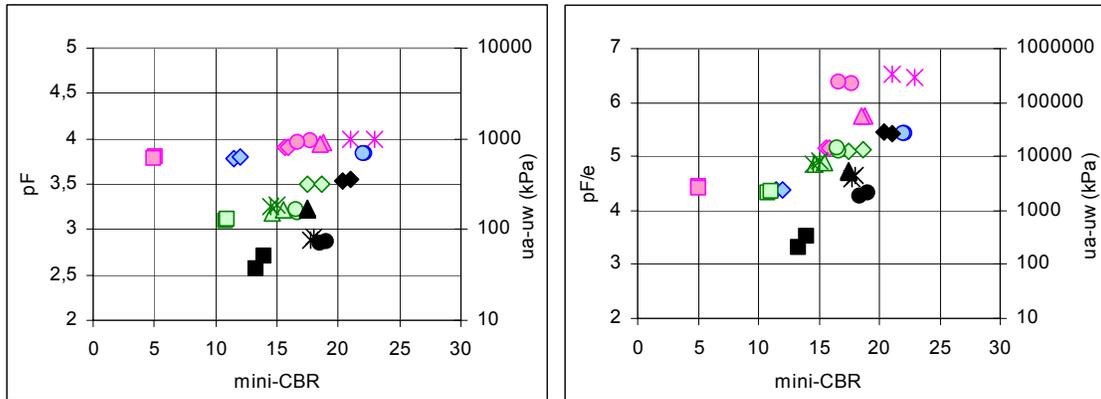


(a) mini-CBR x w

(b) mini-CBR x e

| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 20% | ■ w = 20%+2% | ■ w = 20%+4% | ■ w = 20%+6% |             |

Figura 8.33 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF4.

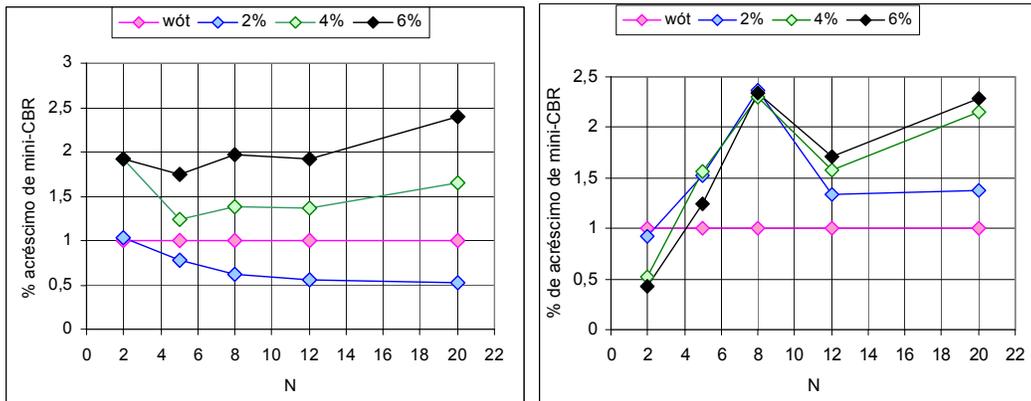


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

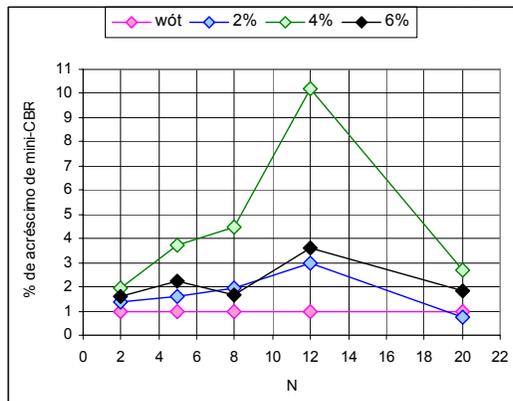
| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 20% | ■ w = 20%+2% | ■ w = 20%+4% | ■ w = 20%+6% |             |

Figura 8.33 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF4 - Continuação.



(a) Solo HB7

(b) Solo HB11



(c) Solo HBR1

Figura 8.34 - Acréscimo (%) do Mini-CBR com a Estabilização Química – Solos HB.

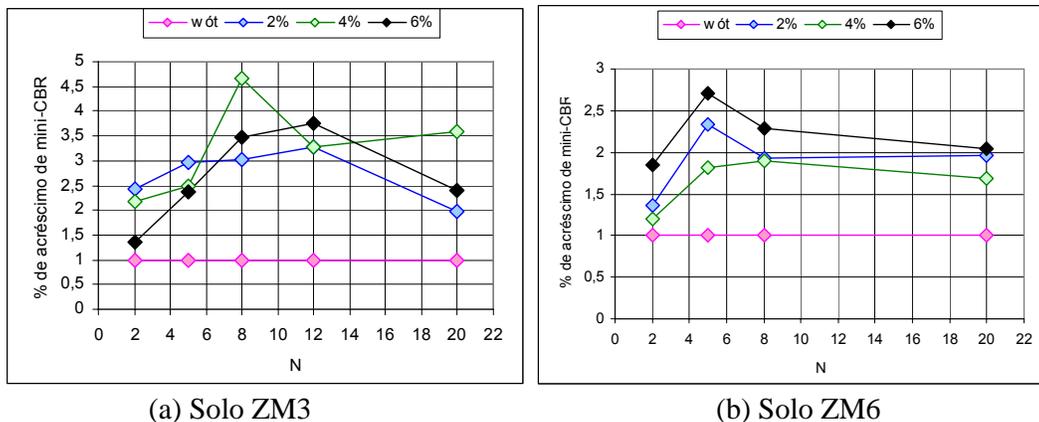


Figura 8.35 - Acréscimo (%) do Mini-CBR com a Estabilização Química – Solos ZM.

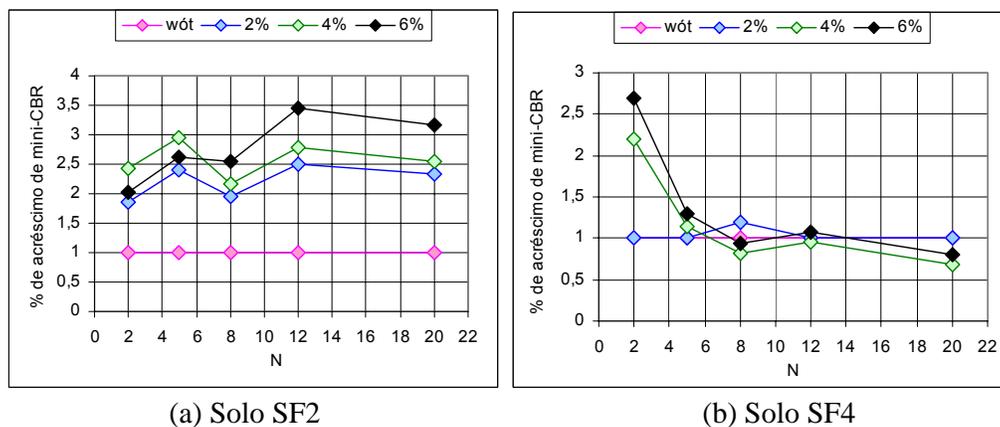


Figura 8.36 - Acréscimo (%) do Mini-CBR com a Estabilização Química – Solos SF.

### 8.2.4 – Solos Estabilizados Saturados e Compactados na Umidade Ótima

Conforme apresentado no subitem 8.2.2, serão apresentados os resultados de mini-CBR imerso para a condição de compactação no teor de umidade ótimo de cada solo, considerando os diferentes teores de cal usados para a estabilização química.

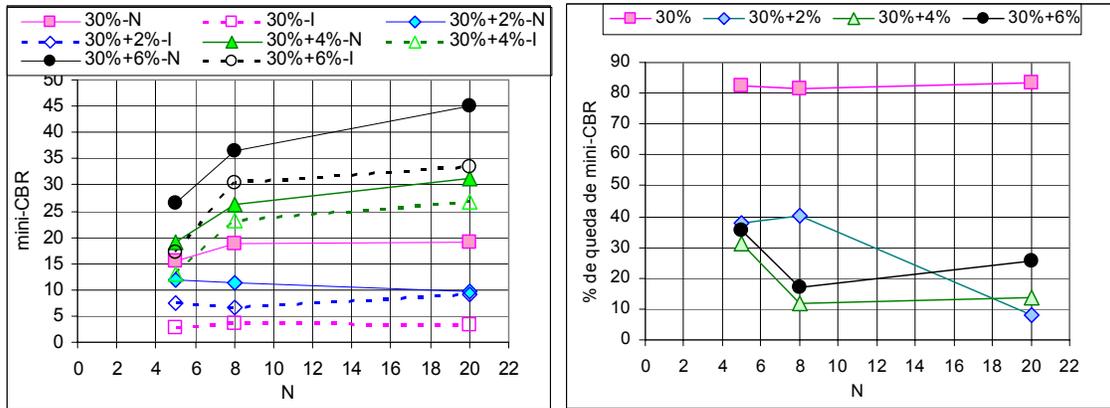
As Figuras 8.37 apresentam alguns dos resultados obtidos para o grupo dos latossolos, sendo os demais dados mostrados no anexo VIII. As Figuras mostram que, para uma mesma energia (N), existem três comportamentos distintos no que se refere ao decréscimo de mini-CBR com a saturação, sendo: (a) queda de resistência bem inferior ao verificado para o solo natural; (b) queda de resistência inferior ao solo natural para 2% de cal e para os demais teores de cal este decréscimo é superior também ao verificado para a amostra natural e; (c) elevação no percentual de decréscimo de resistência para 2% de cal e, queda de tal percentual para 4% e

6% de cal. Portanto é possível verificar que os comportamentos estão associados aos percentuais de cal incorporados ao solo, e ainda a energia de compactação aplicada. Observa-se que, assim como para as amostras naturais, trabalhar-se com o ISC dos solos na condição saturada, significa perda de uma parcela significativa de resistência e, exclusão de materiais que poderiam ser aplicados como camadas estruturais do pavimento. Por outro lado, a consideração de tal parcela de resistência significa um aumento do risco que envolve as obras geotécnicas e mais especificamente as obras rodoviárias, uma vez que se deveria priorizar a implantação de sistema de drenagem e um programa de manutenção eficaz, para que se garanta a durabilidade do pavimento.

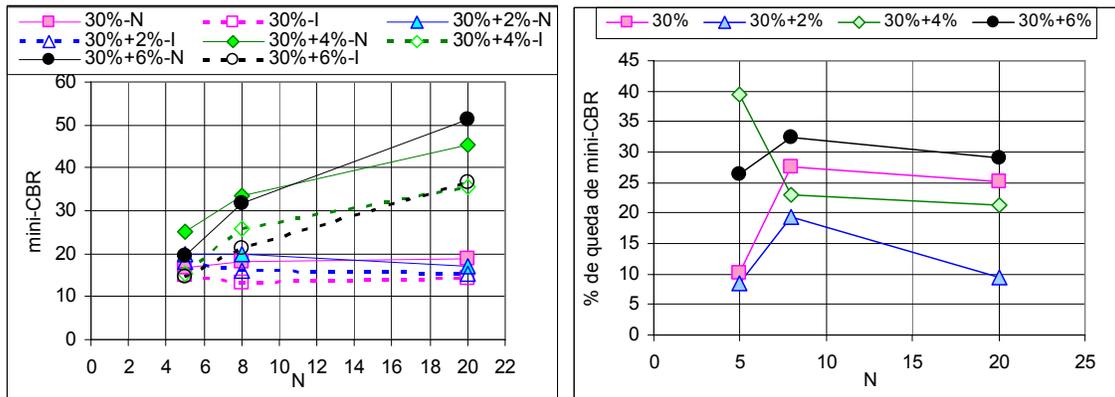
É importante observar ainda que, os percentuais de decréscimo de resistência com a saturação aparentemente não estão diretamente associados com o comportamento de floculação ou defloculação gerado pela estabilização química e também, não podem ser associados aos teores ótimos de cal determinados pelo método de Eades & Grim.

Tendo-se por finalidade avaliar o uso do solo como material de construção, a Tabela 8.3 apresentará as possíveis aplicações do material estabilizado e compactação no teor de umidade ótimo, considerando a condição não saturada e a condição saturada. A observação dessa Tabela indica inicialmente que a estabilização química não conduz a melhoramento dos materiais suficientes para o uso como base de pavimentos rodoviários; no entanto, verifica-se que muitos dos solos (dos três grupos considerados) passam a ter aplicação tanto para sub-base quanto para reforço do subleito, nas condições não saturada e saturada. Verifica-se então que a estabilização com cal é interessante para tais materiais, podendo-se aproveitar o solo local para a execução da camada de sub-base, para quase todos os solos (exceto o HBR1 e o ZM3), nas condições não saturada e saturada.

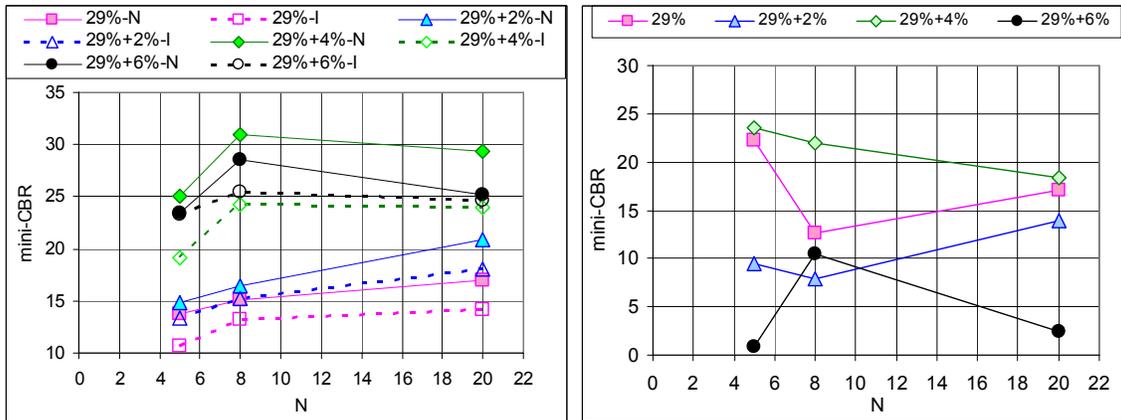
O conjunto de resultados (Figuras 8.37 e o anexo VIII) mostra ainda que melhoria da resistência com a estabilização, de forma semelhante aos solos não estabilizados, pode ser encarada sob dois aspectos: (a) o crescimento de resistência em si, aqui apresentado pelas Figuras 8.27 a 8.36 e Figuras do anexo VI e VII e, (b) o crescimento útil da resistência, aqui representado pela Tabela 8.3, que apresenta a aplicabilidade do solo como material de construção rodoviária; aspecto este focado nesta pesquisa, pois por mais que a resistência apresente elevados crescimentos percentuais, o material só será aplicado para sub-base se apresentar ISC superior a 20% e, para base, se o ISC for superior a 60%.



(a) Solo HB7

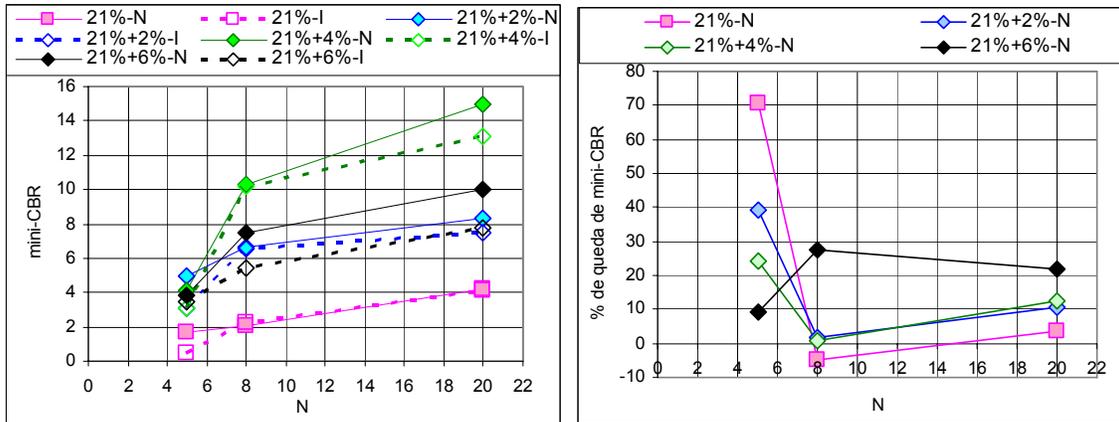


(b) Solo HB9b

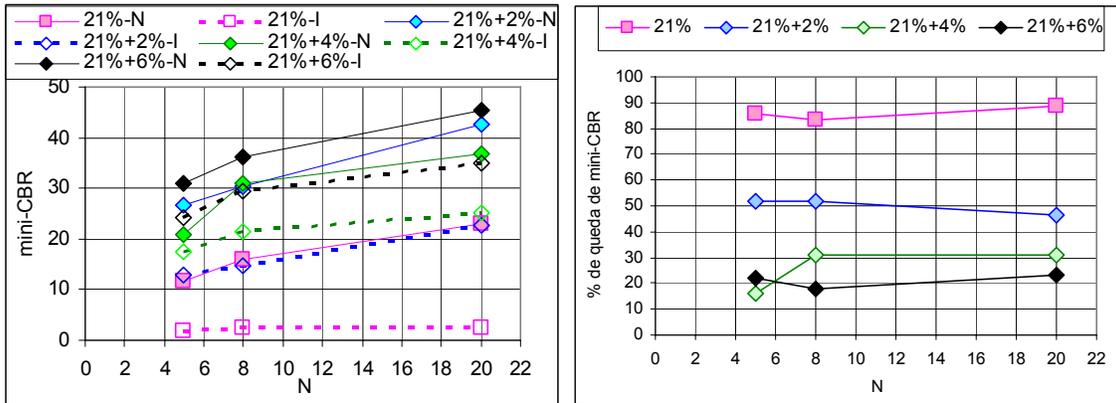


(c) Solo HB12

Figura 8.37 - Comparação Entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Latossolos (HB).

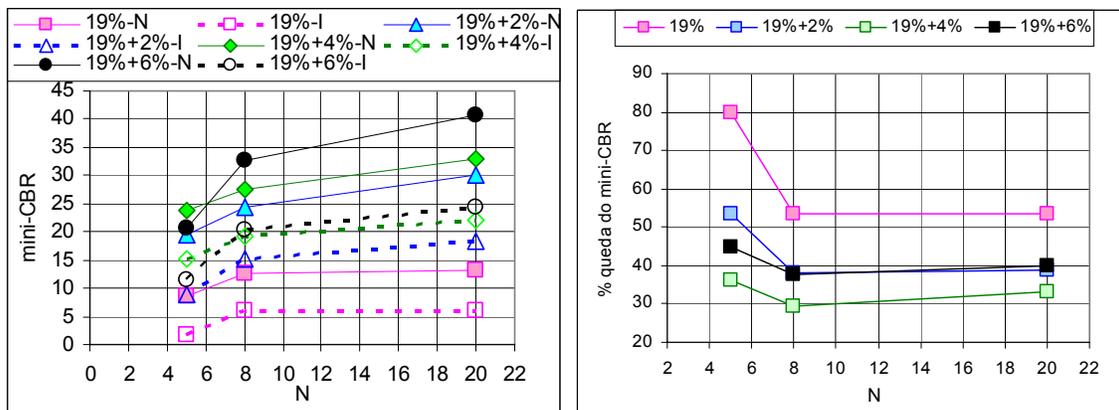


(a) Solo ZM3



(b) Solo ZM6

Figura 8.38 - Comparação Entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos pertencentes a Zona Mosqueada (ZM).



(a) Solo SF2

Figura 8.39 - Comparação Entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos Saprolíticos Finos (SF).

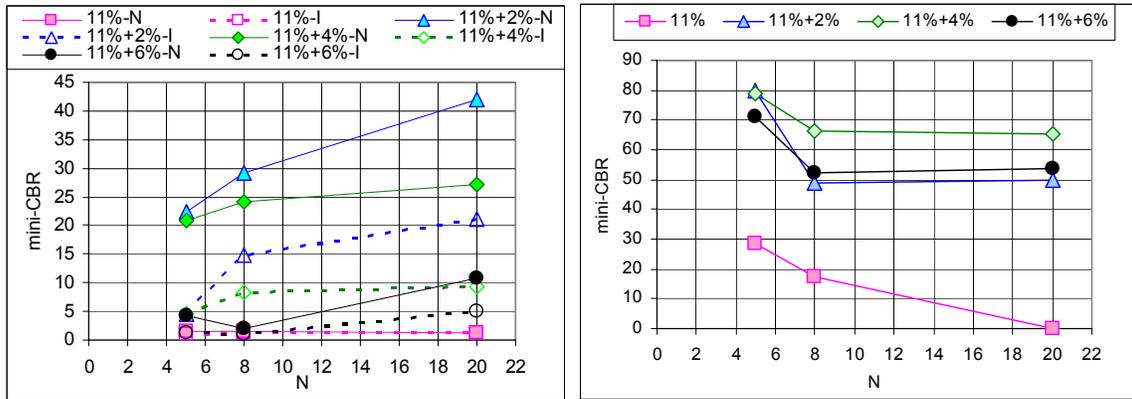


Figura 8.39 - Comparação Entre os Valores de Mini-CBR Não Saturado e Saturado dos Solos Saprolíticos Fins (SF) - Continuação.

Tabela 8.3 – Aplicabilidade dos Materiais Estabilizados na Pavimentação Rodoviária.

| Material         | teor de cal (%) | AMOSTRAS SEM IMERSAO |    |    |          |    |    |                  |    |    | AMOSTRAS COM IMERSAO |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
|------------------|-----------------|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|---|
|                  |                 | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    |   |
|                  |                 | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM |   |
| HB7 - wót=30%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB7 - wót=30%    | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB7 - wót=30%    | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB7 - wót=30%    | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB9b - wót=30%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB9b - wót=30%   | 2%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB9b - wót=30%   | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB9b - wót=30%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB10 - wót=15,5% | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB10 - wót=15,5% | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB10 - wót=15,5% | 4%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB10 - wót=15,5% | 6%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB11 - wót=17%   | 0%              |                      |    |    | x        |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB11 - wót=17%   | 2%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB11 - wót=17%   | 4%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB11 - wót=17%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB12 - wót=29%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB12 - wót=29%   | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB12 - wót=29%   | 4%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HB12 - wót=29%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HBR1 - wót=24%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| HBR1 - wót=24%   | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  |    |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |   |
| HBR1 - wót=24%   | 4%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HBR1 - wót=24%   | 6%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HBR2 - wót=30%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HBR2 - wót=30%   | 3%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| HBR2 - wót=30%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| ZM3 - wót=21%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM3 - wót=21%    | 2%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| ZM3 - wót=21%    | 4%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| ZM3 - wót=21%    | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| ZM6 - wót=21%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM6 - wót=21%    | 2%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM6 - wót=21%    | 4%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| ZM6 - wót=21%    | 6%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - wót=19%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - wót=19%    | 2%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - wót=19%    | 4%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - wót=19%    | 6%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - wót=20%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - wót=20%    | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - wót=20%    | 4%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - wót=20%    | 6%              |                      |    |    | x        |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - wót=11%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - wót=11%    | 2%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - wót=11%    | 4%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - wót=11%    | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF13 - wót=18%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF13 - wót=18%   | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF13 - wót=18%   | 4%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF13 - wót=18%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |

## 8.2.5 – Solos Estabilizados Não Saturados Compactados em Diferentes Umidades

No subítem 8.2.1 foi verificada a importância da sucção para a melhoria da resistência a penetração (mini-CBR) para os solos compactados sem estabilização química. Como foi observado, para quase todos os latossolos (exceto o solo HBR1), solo ZM6 e solo SF4 a condição de compactação em umidade ótima determinada no Proctor normal, conduz a possibilidade de uso destes solos como camada de sub-base rodoviária. Fazendo um paralelo com o solo natural, apresentam-se resultados considerando a estabilização química para teores de umidade inferiores e superiores ao teor ótimo, visando ainda à aplicação de tais misturas para a pavimentação. É importante ressaltar que, os resultados apresentados no anexo IX e nas Figuras 8.41, mostram que apenas o solo HB9b atinge suporte suficiente para ser aplicado como material de base rodoviária, muito embora para os demais solos ocorram acréscimos de resistência percentualmente elevados ao se considerar conjuntamente os efeitos da sucção elevada, quando da compactação em teor de umidade inferior ao ótimo, e da estabilização química. As Figuras 8.40 a 8.43 exemplificam alguns dos resultados obtidos para os três grupos de solos. Nessa Figuras, os símbolos cheios se referem aos solos sem cal e os vazios com 2% (letras (a), (b), (c) e (d)) e 6% ((e), (f), (g), (h)) de cal. As cores dos símbolos foram relacionadas aos teores de umidade de compactação.

Os latossolos serão aqui representados pelos solos HB7 e HB9b, devendo-se destacar, no entanto que, os mecanismos de reação da cal com os diferentes latossolos se diferenciam. Os gráficos das Figuras 8.40 e 8.41 mostram inicialmente que os comportamentos observados quanto à variação de mini-CBR com a umidade, índice de vazios e sucção, diferem com a umidade e energia de compactação usada e ainda, com o teor de cal incorporado; tal afirmação sendo também confirmada pela análise conjunta das Figuras 8.42 e, as inseridas no anexo X.

No solo HB9b compactado a diferentes teores de umidade e estabilizado com 2% de cal, nota-se que para umidades de 26%, 30% e 32%, a sucção praticamente não varia. Já em relação à mini-CBR, os valores praticamente duplicam para 26% de umidade de compactação, enquanto que para 30% e 32%, o suporte quase não varia. Os resultados tratados em termos de pF/e, mostram que o conjunto de pontos, se ajusta a uma tendência única. Com a incorporação de 6% de cal (Figura 8.41(e), (f), (g) e (h)), há um melhor ajuste de tendência no gráfico de mini-CBR em função as sucção, dividindo-se o gráfico de pF/e em duas tendências. No gráfico apresentado na Figura 8.41(g), a tendência relativa ao solo com cal tende a situar-se abaixo daquela que concentra a maioria dos pontos sem cal. Este comportamento está aparentemente

associado à agregação do solo com 6% de cal, o que proporciona ao solo uma distribuição de poros distinta daquela verificada para 0% e 2% de cal.

Para o solo HB7 foi verificada a variação textural com o teor de cal (Figura 5.6, subitem 5.3) e comportamentos semelhantes ao do solo HB9b nos gráficos de mini-CBR em função do índice de vazios e de  $pF/e$ . Para este solo é notável a existência de uma forte agregação com 8% de cal sendo esta, portanto, uma tendência capaz de gerar distribuição bimodal dos poros no solo. Destaca-se que a química (Tabela 5.2), a mineralogia (Tabela 5.4) e a variação do pH com o teor de cal (Tabela 5.3) nos dois solos guardam certa semelhança.

A respeito dos latossolos é importante ainda salientar as variações percentuais de resistência em relação às resistências obtidas na umidade ótima. Com esta finalidade, no anexo X e Figuras 8.42 são apresentados os gráficos das variações percentuais de resistência em relação às umidades ótimas do material compactado sem estabilização, considerando-se diferentes energias. O conjunto de resultados mostra que as maiores variações percentuais se referem ao material estabilizado compactado no teor de umidade ótimo (Figura 8.42(a)) ou no teor de umidade mais baixo (Figura 8.42(b)) e ainda que, estas não são diretamente proporcionais à energia de compactação usada, o que dá exata noção do papel da estabilização e da própria sucção na resistência dos solos compactados.

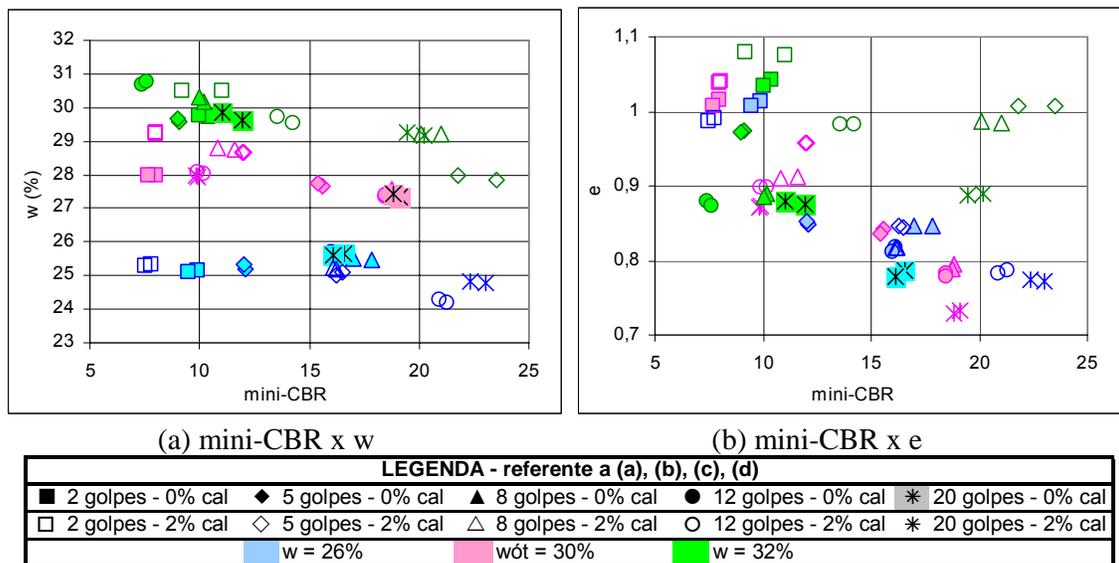
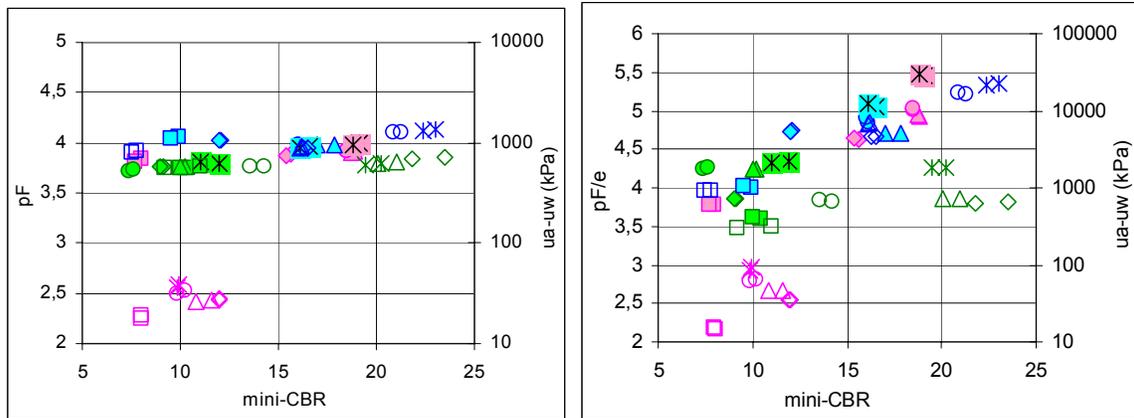


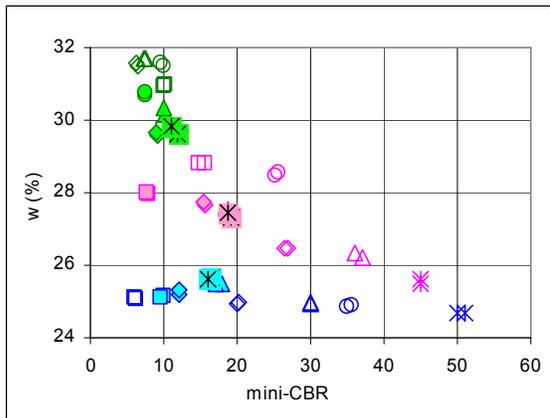
Figura 8.40 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB7.



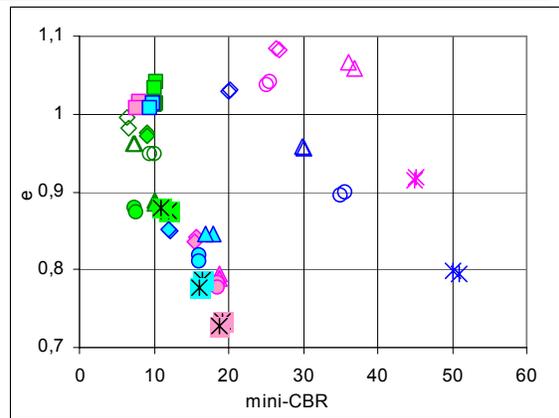
(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

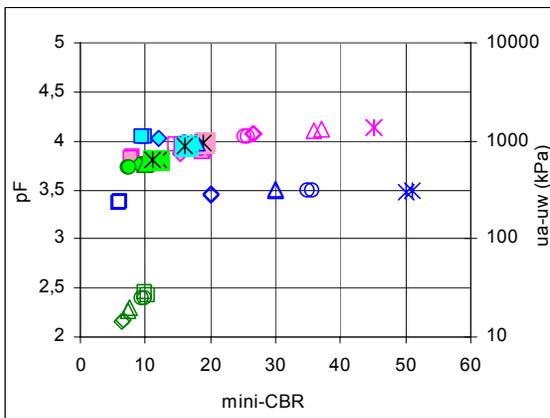
| LEGENDA - referente a (a), (b), (c), (d) |                     |                     |                      |                      |                                     |
|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ■ 2 golpes - 0% cal                      | ◆ 5 golpes - 0% cal | ▲ 8 golpes - 0% cal | ● 12 golpes - 0% cal | * 20 golpes - 0% cal |                                     |
| □ 2 golpes - 2% cal                      | ◇ 5 golpes - 2% cal | △ 8 golpes - 2% cal | ○ 12 golpes - 2% cal | * 20 golpes - 2% cal |                                     |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ w = 26%   ■ wót = 30%   ■ w = 32% |



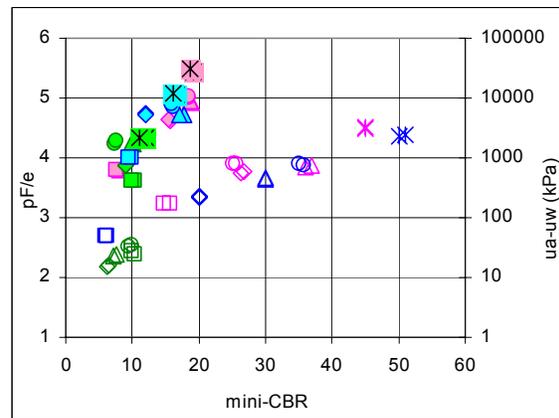
(e) mini-CBR x w



(f) mini-CBR x e



(g) mini-CBR x sucção (pF)



(h) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA - referente a (e), (f), (g), (h) |                     |                     |                      |                      |                                     |
|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ■ 2 golpes - 0% cal                      | ◆ 5 golpes - 0% cal | ▲ 8 golpes - 0% cal | ● 12 golpes - 0% cal | * 20 golpes - 0% cal |                                     |
| □ 2 golpes - 6% cal                      | ◇ 5 golpes - 6% cal | △ 8 golpes - 6% cal | ○ 12 golpes - 6% cal | * 20 golpes - 6% cal |                                     |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ w = 26%   ■ wót = 30%   ■ w = 32% |

Figura 8.40 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB7 - Continuação.

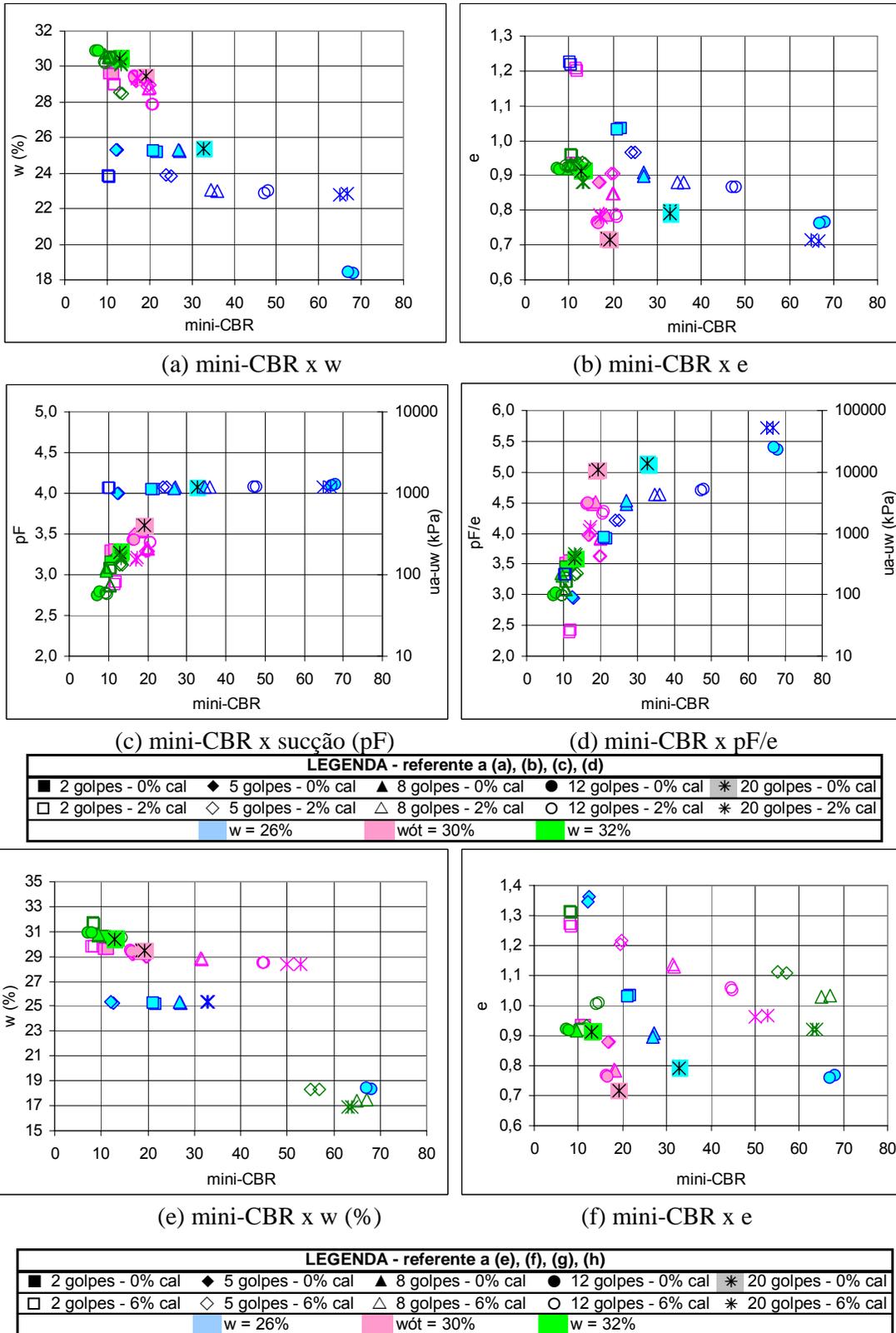


Figura 8.41 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB9b.

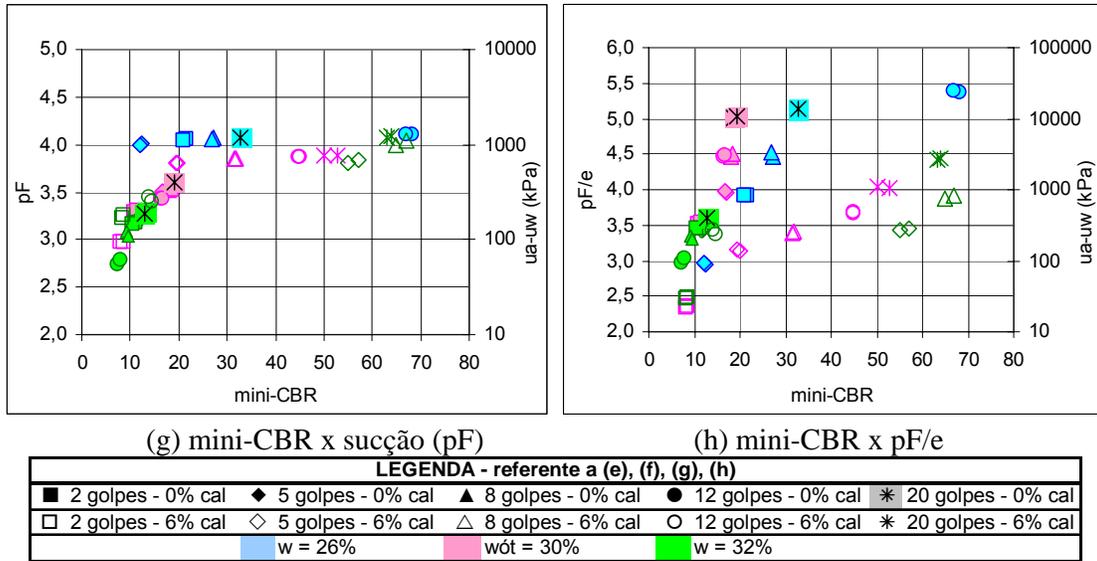


Figura 8.41 - Variação do Mini-CBR para o Solo HB9b - Continuação.

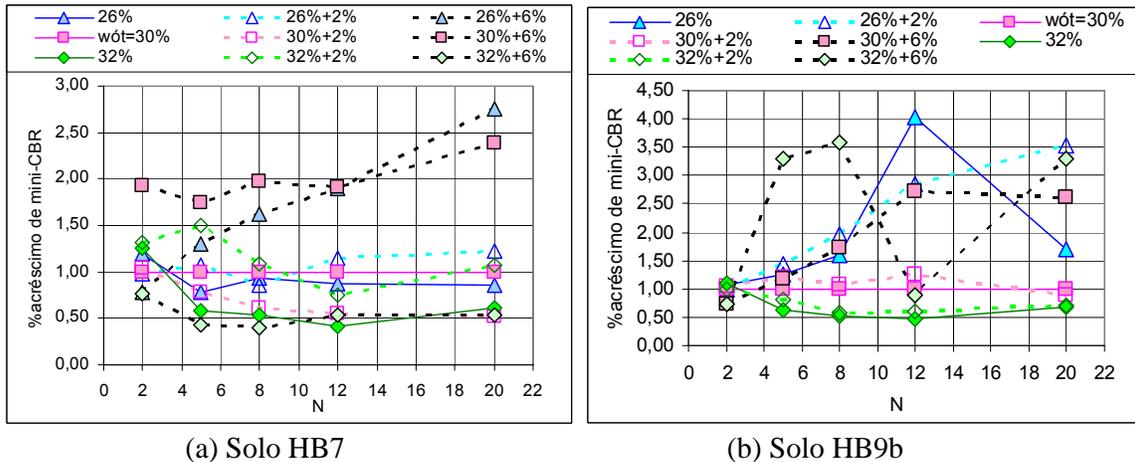


Figura 8.42 - Variação Percentual do Mini-CBR.

De modo semelhante aos latossolos, representando os solos pertencentes à zona mosqueada serão apresentados na Figura 8.43 os resultados referentes ao solo ZM6. Para os solos deste grupo foram ensaiados apenas corpos de prova estabilizados com 6% de cal. Para o solo ZM6 observa-se que para 17% de umidade ocorre queda de sucção do solo estabilizado em relação ao não estabilizado. Para a umidade ótima o comportamento difere, apresentando valor de sucção igual ao obtido para o material com 0% de cal incorporada e, acréscimo de mini-CBR. O gráfico de mini-CBR em função de pF/e guarda certa semelhança com os obtidos para os latossolos, no entanto, as tendências aqui, variaram com o teor de cal e também com o teor de umidade, ou seja, após a estabilização a umidade de compactação afeta a distribuição de

poros. A Figura apresentada para o solo ZM3 no anexo IX mostra que, dada à natureza quartzosa desse solo, desaparece a influência da distribuição de poros nos gráficos pF/e versus mini-CBR. Essa mesma natureza quartzosa faz com que as sucções no solo ZM3 sejam muito inferiores as registradas para o solo ZM6, o que torna os resultados de mini-CBR mais dependentes da própria porosidade. Observa-se na Figura 8.43(c) que, os valores de sucção para a umidade ótima (21%), considerando 0%, 2% e 6% de cal, apresentam sucções semelhantes. No entanto, quando se considera os ganhos de resistência, percebe-se que estes são proporcionais ao teor de cal. Tal característica conduz a dedução que a cal na verdade possibilita a alteração estrutural do solo e esta, a de resistência. Esses resultados não significam que a sucção não influencia no comportamento, haja vista que, para os teores de umidade 17% e 24% , as menores sucções obtidas quando do uso da cal não induzem perda de resistência, pois a mesma foi provavelmente compensada pela ação positiva da cal.

Este comportamento aparentemente é similar ao verificado para o solo HB7, o que aponta para semelhante mecanismo de reação. Já para o solo ZM3 (anexo X), verificam-se valores de sucção constantes com acréscimo de resistência. Uma vez que o solo apresenta CTC elevada e pH crescente, à reação solo-cal conduz ao crescimento da resistência, no entanto, observa-se que o acréscimo percentual de resistência não é muito significativo (Figura 8.44).

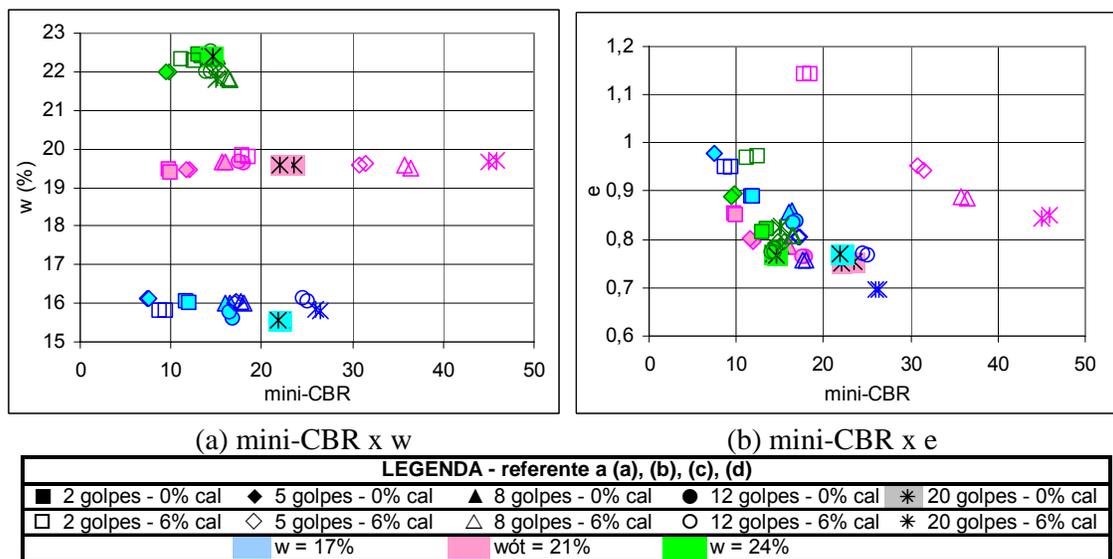
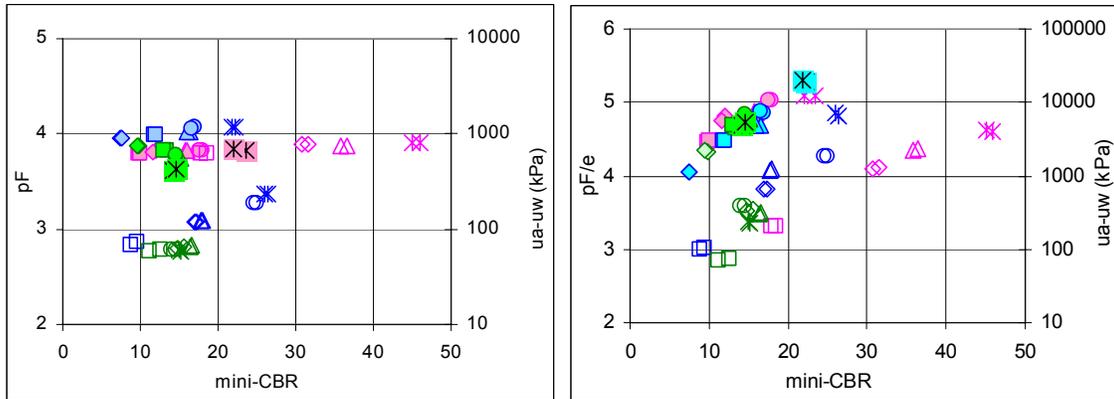


Figura 8.43 – Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6.



(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA - referente a (a), (b), (c), (d) |                     |                     |                      |                      |  |
|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--|
| ■ 2 golpes - 0% cal                      | ◆ 5 golpes - 0% cal | ▲ 8 golpes - 0% cal | ● 12 golpes - 0% cal | * 20 golpes - 0% cal |  |
| □ 2 golpes - 6% cal                      | ◇ 5 golpes - 6% cal | △ 8 golpes - 6% cal | ○ 12 golpes - 6% cal | * 20 golpes - 6% cal |  |
| ■ w = 17%                                |                     | ■ wót = 21%         |                      | ■ w = 24%            |  |

Figura 8.43 – Variação do Mini-CBR para o Solo ZM6 - Continuação.

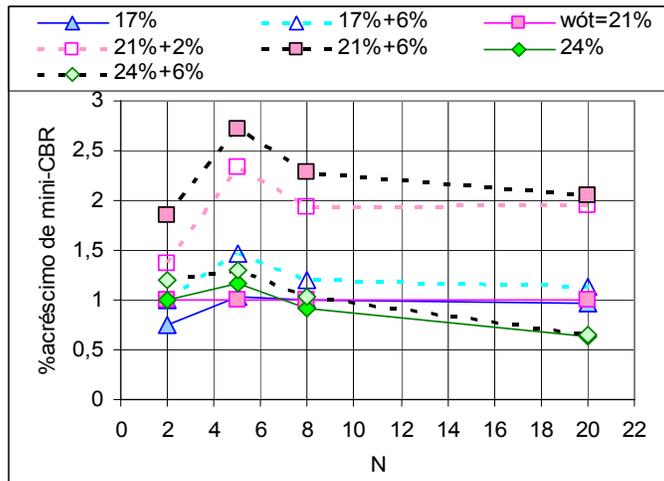


Figura 8.44 - Variação Percentual do Mini-CBR para o Solo ZM6.

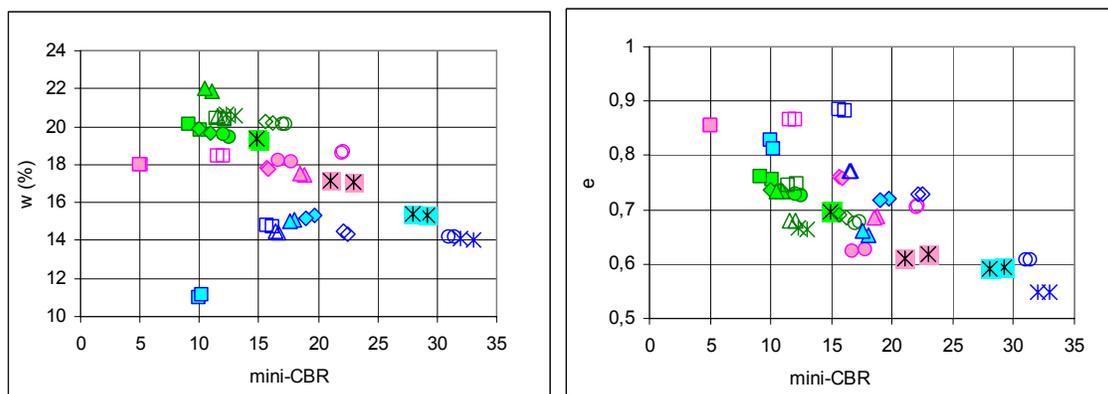
Representando o grupo dos solos saprolíticos, a Figura 8.45 mostra os resultados obtidos para o solo SF4. Ao analisar os resultados obtidos para a mistura com 2% de cal, observa-se que o mini-CBR passa a ser independente da sucção ao atingir o pF igual a 4. Tal constância não é verificada ao se analisar o mini-CBR em função do pF/e, devido à intervenção do índice de vazios. É importante observar neste gráfico (Figura 8.45(d)) que, os pontos referentes ao ramo seco e da umidade ótima, se deslocam dos oriundos do solo natural e do ramo úmido com 2% de cal. Para 6% de cal (Figura 8.45(h)), todos os pontos obtidos para o solo estabilizado se deslocam daqueles oriundos do solo natural. Com este deslocamento tem-se que na mistura solo-cal, o índice de vazios é maior para a mesma sucção atuante no solo natural. Esse

comportamento distinto, provavelmente se deve, a diferenças nas distribuições de poros. Destaca-se, no entanto que, as curvas granulométricas desse solo praticamente não se alteraram com o teor de cal (Figura 5.64, subitem 5.3). Isso se deve, talvez, a baixa resistência dos agregados oriundos da mistura em 24 horas, ou ainda que, a cal interfere na estrutura, mas não exatamente em termos de cimentação. Para ambos os teores de cal e para o solo natural observa-se que, de forma geral, o mini-CBR diminui com o aumento da umidade e do índice de vazios. É importante observar que, os solos SF2 e SF13 apresentam tendências semelhantes, as verificadas para o solo SF4, ao considerar o gráfico de  $pF/e$ .

Observando-se as variações de  $pH$ , com a adição da cal, para esse solo, verifica-se que a 2%, eles já apresentam ligeiro aumento ao se passar por 3% de cal, o que aponta para um aumento nas reações químicas.

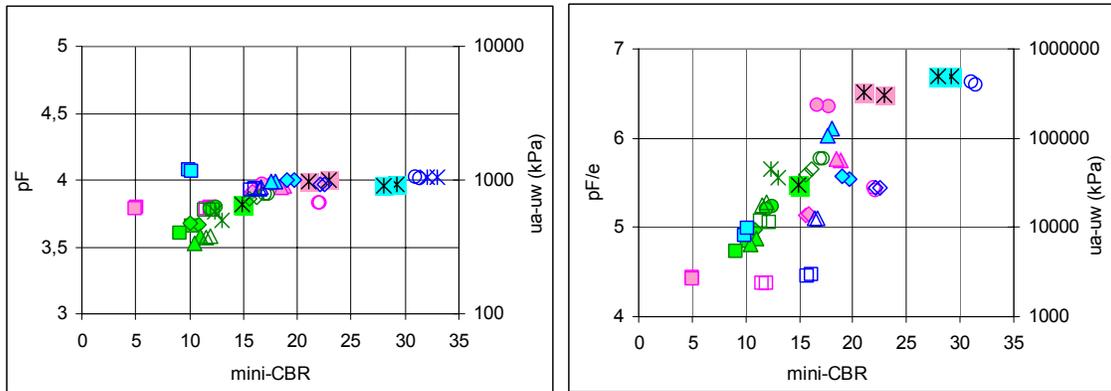
Para 6% de cal é verificado aumento da resistência para o solo compactado em teor de umidade inferior ao ótimo, o que aponta para a reação da cal. Já para os teores de umidade equivalentes ao ótimo e superior ao mesmo, o comportamento quanto à sucção e a resistência são iguais aos verificados para as amostras compactadas com 0% de cal. A Figura 8.46 mostra a variação percentual de ganho de resistência com a incorporação da cal, podendo-se observar que os pontos estabilizados e compactados com teor de umidade inferior à ótima se destacam, o que não ocorre para os demais solos saprolíticos (anexo X). Esses mostram que, a análise dos dados não pode ser feita considerando-se isoladamente a sucção, a ação da cal, a porosidade e a distribuição de poros.

Ao avaliar o conjunto dos resultados (Figura 8.45, anexo IX e anexo X) obtidos para este grupo de solos é importante verificar que os acréscimos de resistência são inferiores aos verificados para os latossolos e ainda que, de forma similar aos solos HB e ZM, os mecanismos de reação com a cal diferem para tipo de solo estudado.



(a) mini-CBR x  $w$

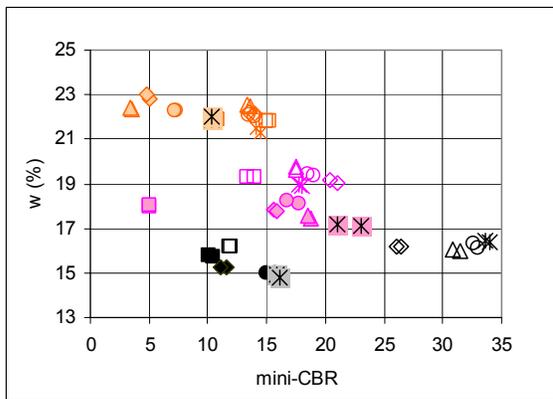
(b) mini-CBR x  $e$



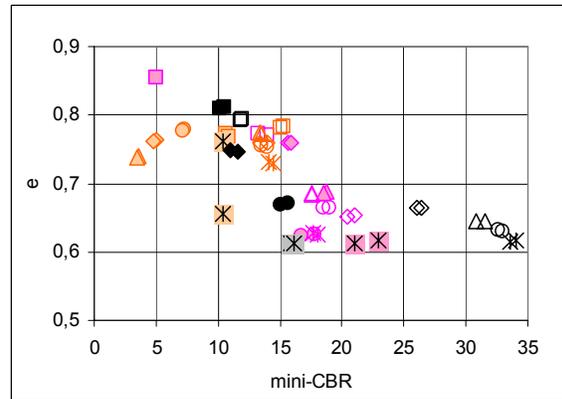
(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

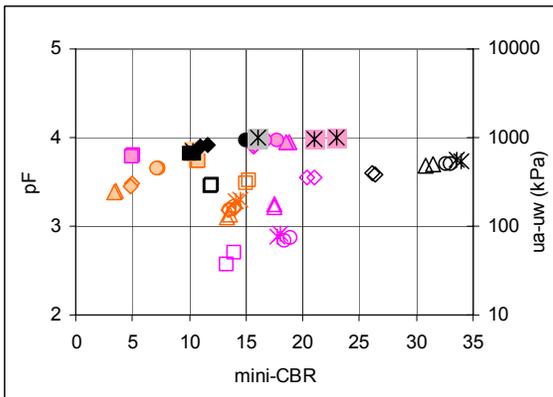
| LEGENDA - referente a (a), (b), (c), (d) |                     |                     |                      |                      |             |
|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| ■ 2 golpes - 0% cal                      | ◆ 5 golpes - 0% cal | ▲ 8 golpes - 0% cal | ● 12 golpes - 0% cal | * 20 golpes - 0% cal |             |
| □ 2 golpes - 2% cal                      | ◇ 5 golpes - 2% cal | △ 8 golpes - 2% cal | ○ 12 golpes - 2% cal | * 20 golpes - 2% cal |             |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ w = 16%   |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ wót = 20% |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ w = 22%   |



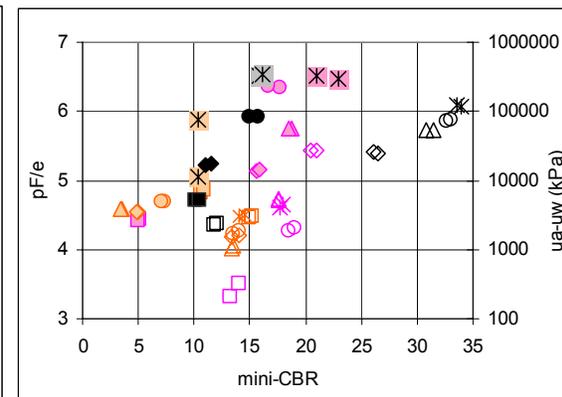
(e) mini-CBR x w



(f) mini-CBR x e



(g) mini-CBR x sucção (pF)



(h) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA - referente a (e), (f), (g), (h) |                     |                     |                      |                      |             |
|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| ■ 2 golpes - 0% cal                      | ◆ 5 golpes - 0% cal | ▲ 8 golpes - 0% cal | ● 12 golpes - 0% cal | * 20 golpes - 0% cal |             |
| □ 2 golpes - 6% cal                      | ◇ 5 golpes - 6% cal | △ 8 golpes - 6% cal | ○ 12 golpes - 6% cal | * 20 golpes - 6% cal |             |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ w = 24%   |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ wót = 30% |
|  |                     |                     |                      |                      | ■ w = 18%   |

Figura 8.45 - Variação do Mini-CBR para o Solo SF4 - Continuação.

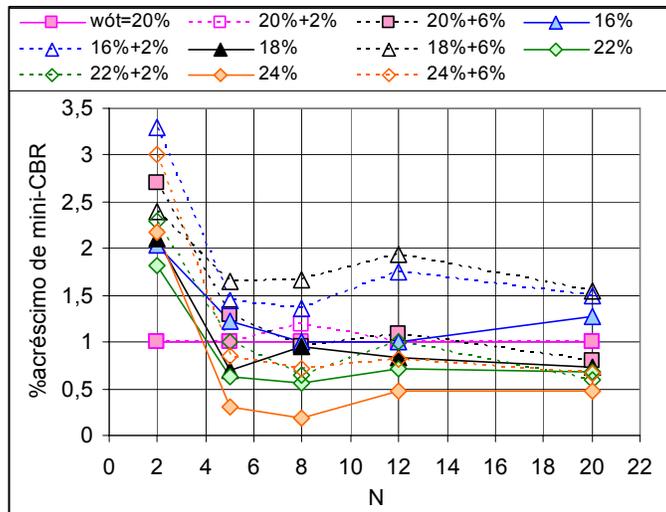


Figura 8.46 - Variação Percentual do Mini-CBR para o Solo SF4.

### 8.2.6 – Solos Estabilizados Compactados em Diferentes Umidades e Saturados

Este subitem tem por finalidade complementar o estudo iniciado no item anterior, apresentando o reflexo da saturação nos valores de resistência obtidos para os solos estabilizados e compactados em diferentes umidades. Com este intuito, as Figuras 8.47 a 8.51 apresentam alguns dos resultados obtidos. De forma similar ao subitem anterior serão apresentados os resultados referentes aos solos HB7 e HB9b, como ilustrações do comportamento dos latossolos ao solo ZM6, para ilustrar representando os solos da zona mosqueada e, os solos SF2 e SF4, como representativos dos solos saprolíticos.

As Figuras 8.47 e 8.48 mostram os resultados obtidos para os solos HB7 e HB9b conjuntamente a variação percentual de decréscimo de mini-CBR com a saturação. Os gráficos da Figura 8.47 mostram que apesar da incorporação da cal a perda de resistência ainda é considerável para umidades a partir da ótima. Por se tratar do mesmo solo fica evidente, a partir dos resultados apresentados, a influência da umidade de compactação na perda de resistência do solo HB7. Dois aspectos merecem destaque ao analisar tal influência: a umidade e o índice de vazios do solo interferem na sucção e nas próprias condições de estabilização do solo, afetando assim, a perda de resistência. A umidade de compactação interfere no nível de quebra dos agregados e na estrutura do solo e, como isso, na perda de resistência com a saturação. É importante observar que a estabilização do solo com cal reduz a perda de resistência por saturação, mas não a impede para os teores de cal estudados.

As Figuras 8.48 mostram os resultados obtidos para o solo HB9b. Nota-se que contrariamente ao solo HB7, a maior estabilidade estrutural do material é obtida para o solo estabilizado com 2% de cal e compactado no teor de umidade mais alto, muito embora se observe que apesar de apresentar menor queda de resistência esta ainda é alta, quando comparada com o valor do material compactado na mesma umidade sem estabilização (Figura 8.48(c)). A Figura 8.48(d) mostra a variação percentual de resistência obtida em relação à amostra natural. Observa-se que, enquanto no solo HB7 a perda de resistência diminui com a incorporação de 6% de cal, no solo HB9b ela se amplia. Chama-se atenção para o comportamento distinto dos dois solos quanto à influência da cal no índice de plasticidade (IP), pois enquanto no solo HB7 ele aumenta com a incorporação de cal, no solo HB9b ele diminui (Tabela 4.6).

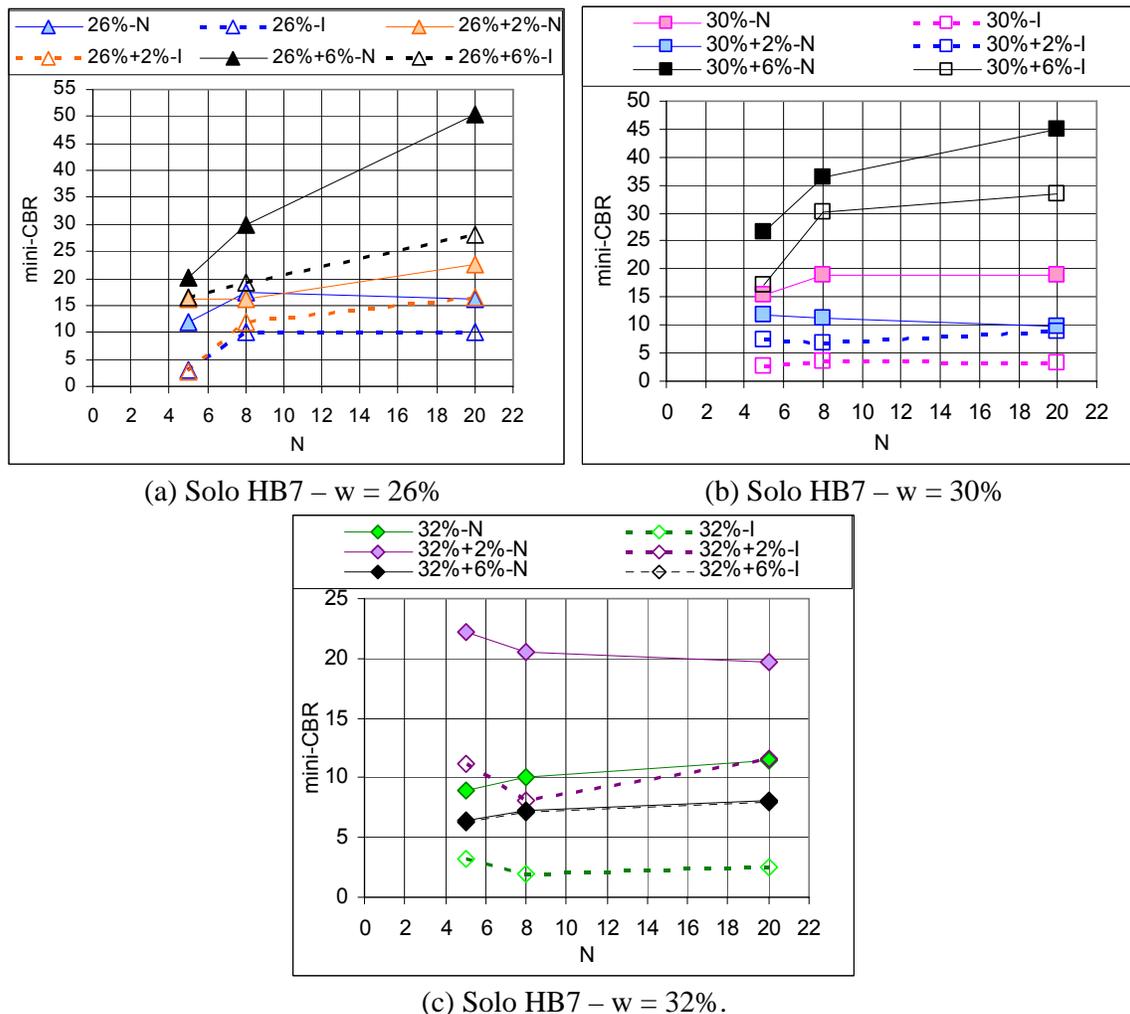
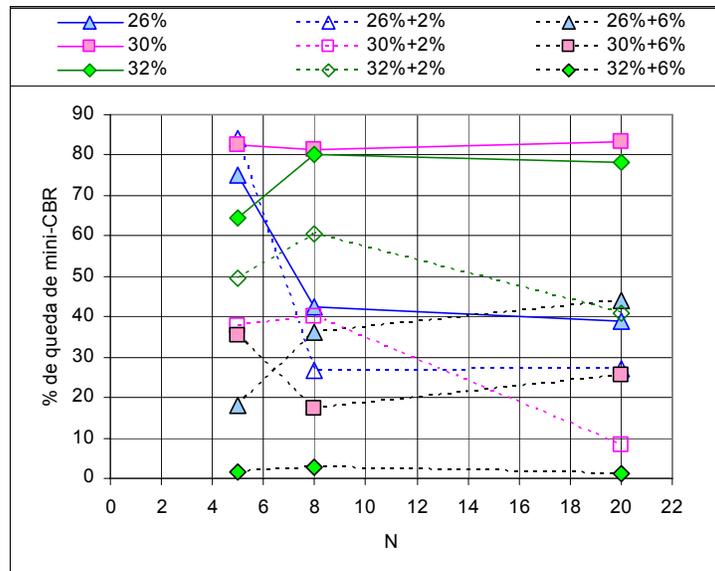
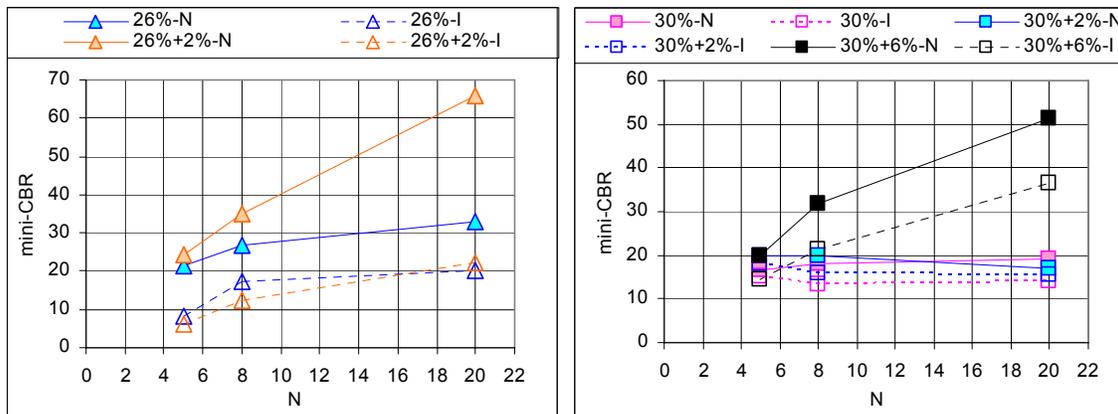


Figura 8.47 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo HB7.



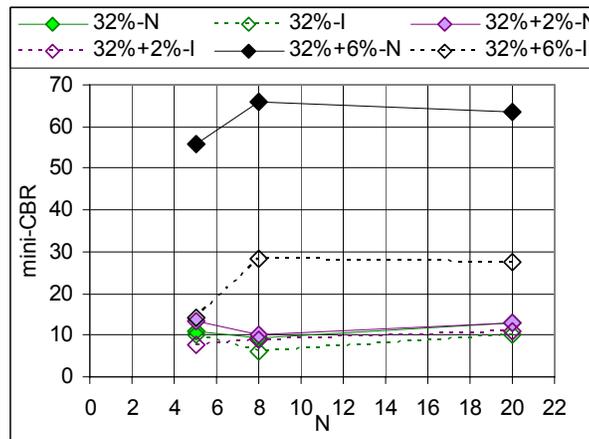
(d) Variação percentual do solo HB7

Figura 8.47 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo HB7 - Continuação.



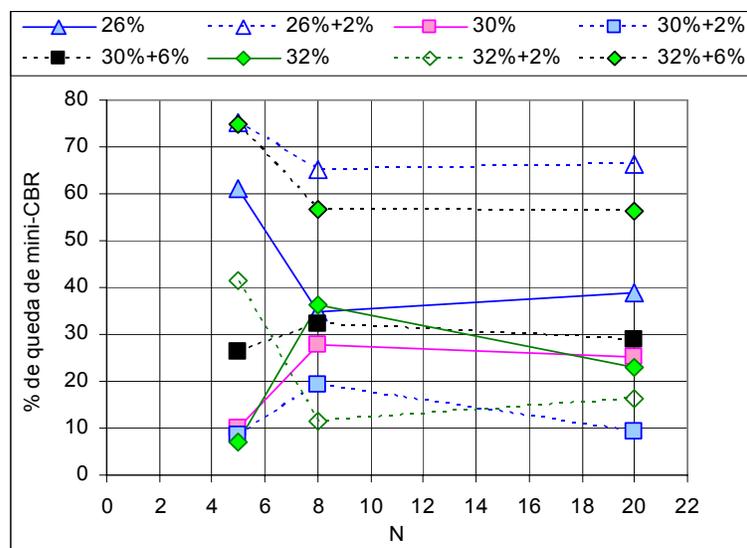
(a) Solo HB9b – w = 26%

(b) Solo HB9b – w = 30%



(c) Solo HB9b – w = 32%.

Figura 8.48 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo HB9b.



(d) Variação percentual do solo HB9b

Figura 8.48 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo HB9b - Continuação.

Os gráficos da Figura 8.49 mostram os resultados obtidos para o solo ZM6. Nota-se que, de forma geral, a estabilização com 6% de cal resulta em menores quedas de resistência que o solo sem estabilização. No entanto, de forma similar aos latossolos, estas reduções ainda são consideráveis (Figura 8.49(d)). Para o solo ZM3 (anexo XI) observa-se que ocorre ampliação da perda ao se adicionar cal. Destaca-se que enquanto a sucção é elevada no solo ZM6, ela é pequena no solo ZM3, o que, de certa forma, a isenta de ser nomeada como responsável pelo aumento da perda de resistência no solo estabilizado.

As Figuras 8.50 e 8.51 mostram os resultados obtidos para os solos SF2 e SF4. Nota-se ainda que, de forma geral e similarmente aos latossolos, a estabilização dos solos garante uma menor perda de resistência quando submetidos à imersão; tal perda sendo variável com o tipo de solo e a umidade de compactação. No solo SF4 (Figura 8.51) cabe destaque a falta de constância na tendência de variação da resistência em consequência da inundação, quando se aumenta o teor de umidade. Assim, com a incorporação de cal, a perda se mantém para as umidades de compactação de 16% e 22% e, diminui para as demais. Comportamento este também observado para os demais solos saprolíticos.

Posteriormente a verificação das perdas de resistências para os materiais compactados em diferentes teores de umidade nas condições naturais e estabilizados com cal, apresenta-se uma Tabela resumo (Tabela 8.4) com a aplicabilidade dos materiais resultantes deste estudo em camadas da estrutura de pavimento. Tal Tabela é apresentada com o intuito de resumir as

condições em que os solos estudados podem ser aplicados, quando consideradas as variações de teor de umidade de compactação, percentual de cal na estabilização química, variação de energia de compactação e capacidade de suporte nas condições imersa e não imersas. Portanto, avaliando-se a Tabela 8.4 se verifica que quase todos os materiais (exceto os solos HBR1 e ZM3) são passíveis de serem usados para a execução da camada de sub-base, apresentando suporte suficiente tanto quando ensaiado na condição não saturada como na saturada. No entanto, as variações oriundas da umidade e energia de compactação são mais extensas ao se considerar a resistência obtida na condição não imersa. Para o solo HB9b nota-se que este pode ser usado, mantendo-se a umidade de compactação, como material de base rodoviária, no entanto, este pavimento necessitaria possuir um sistema de drenagem eficaz assim como boa conservação para garantir sua durabilidade. A Tabela 8.4 enfatiza também o importante papel da sucção na resistência dos solos, destacando que ao se considerar a melhoria do suporte gerado pela condição de não saturação, é possível o dimensionamento de pavimentos mais econômicos através do uso do solo regional.

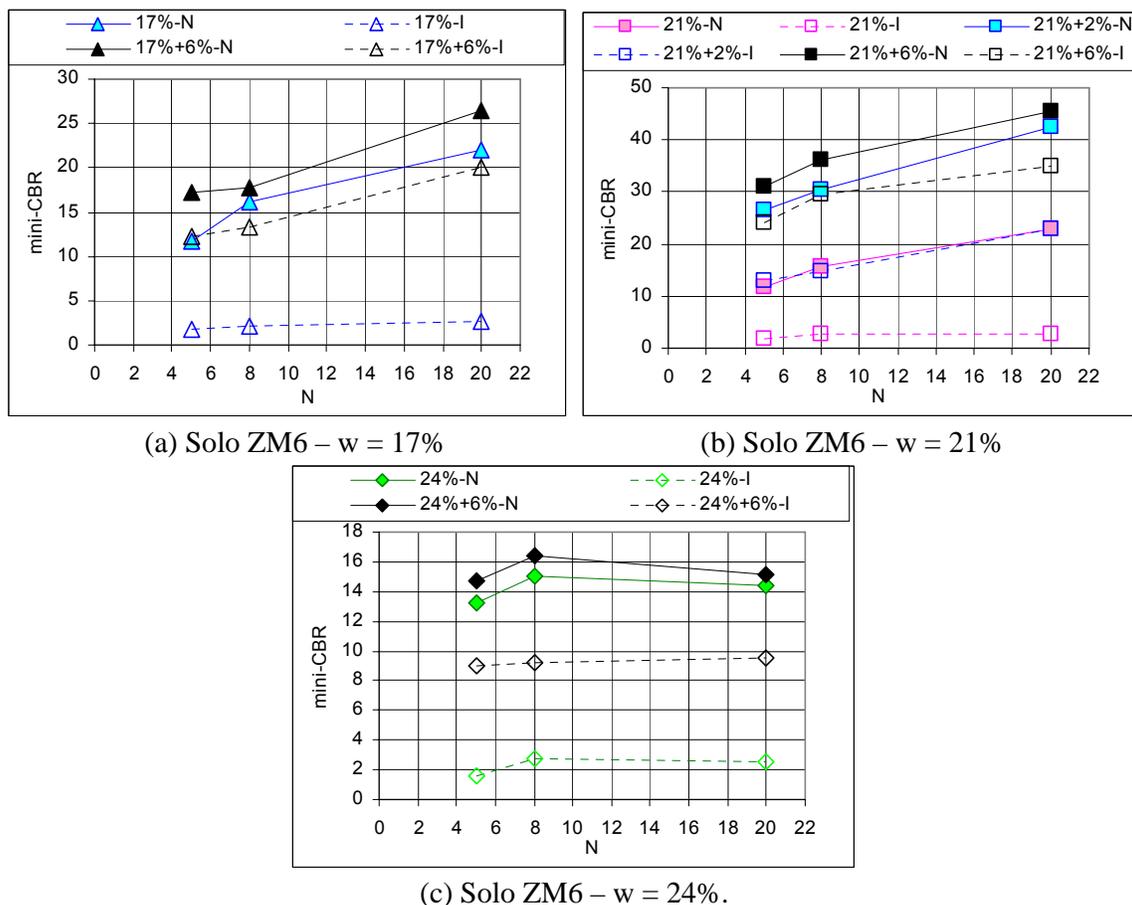
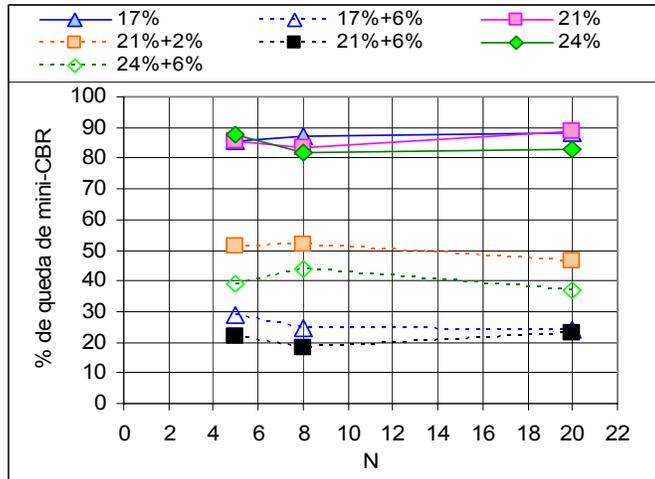
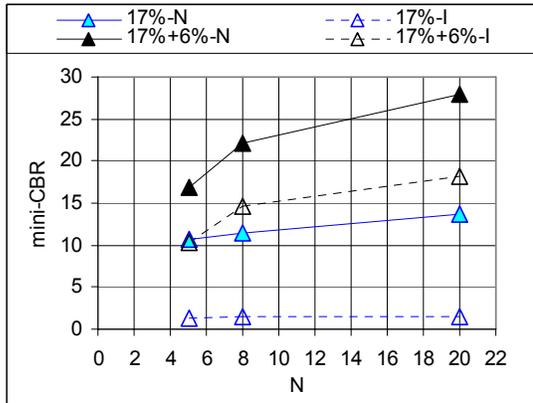


Figura 8.49 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo ZM6.

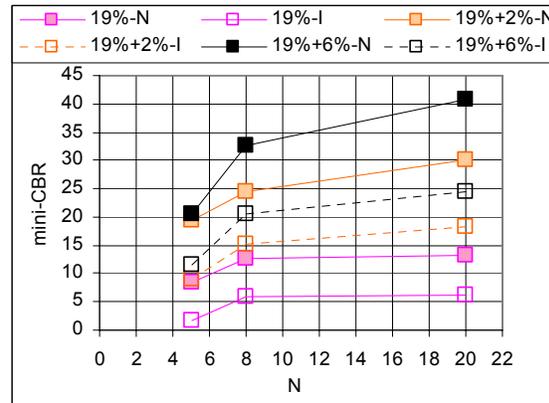


(d) Variação percentual do solo ZM6

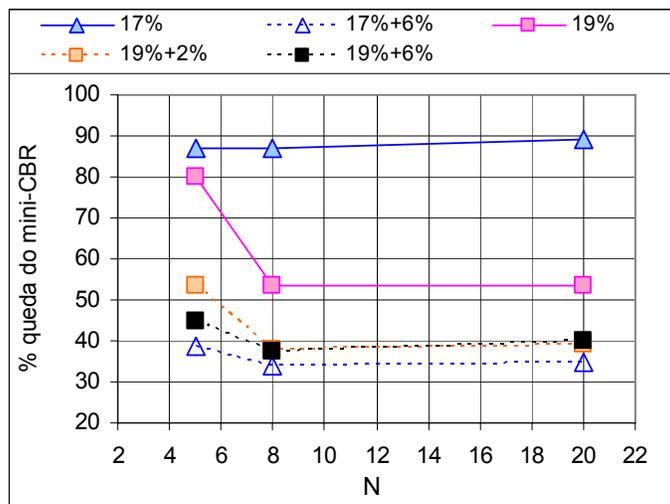
Figura 8.49 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo ZM6 – Continuação.



(a) Solo SF2 – w = 17%

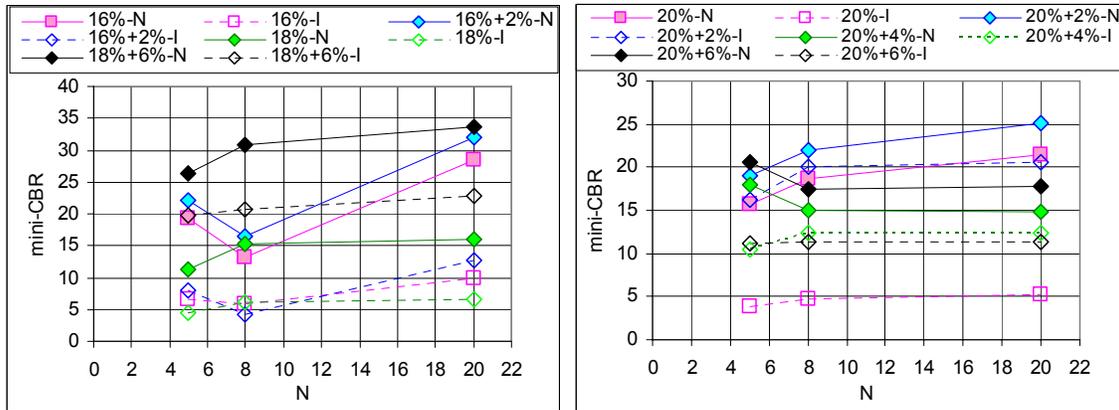


(b) Solo SF2 – w = 19%



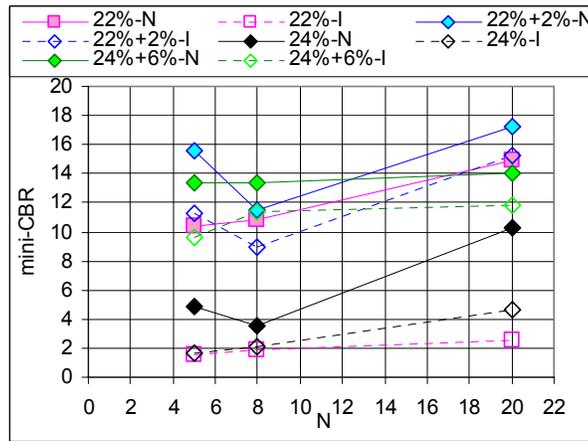
(c) Variação percentual do solo SF2

Figura 8.50 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo SF2.

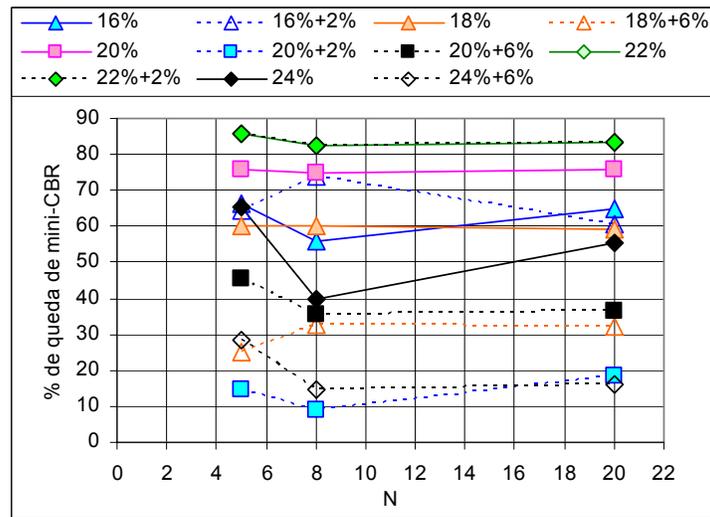


(a) Solo SF4 – w = 16% e 18%

(b) Solo SF4 – w = 20%



(c) Solo SF4 – w = 22% e 24%



(d) Variação percentual do solo SF4

Figura 8.51 - Efeito da Saturação na Resistência do Solo SF4.

Tabela 8.4 – Aplicabilidade dos Materiais Estabilizados na Pavimentação Rodoviária Considerando Todas as Variações Estudadas – Com e Sem Imersão.

| Material         | teor de cal (%) | AMOSTRAS SEM IMERSÃO |    |    |          |    |    |                  |    |    | AMOSTRAS COM IMERSÃO |    |    |          |    |    |                  |    |    |
|------------------|-----------------|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|
|                  |                 | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    |
|                  |                 | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM |
| HB7 - w=26%      | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| HB7 - w=26%      | 2%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB7 - w=26%      | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB7 - w=29%      | 0%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB7 - wót=30%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| HB7 - wót=30%    | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB7 - wót=30%    | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB7 - wót=30%    | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB7 - w=32%      | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| HB7 - w=32%      | 2%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB7 - w=32%      | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - w=26%     | 0%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - w=26%     | 2%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - wót=30%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - wót=30%   | 2%              |                      |    |    | x        | x  |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - wót=30%   | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - wót=30%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - w=32%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - w=32%     | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - w=32%     | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB9b - w=32%     | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB10 - w=13,5%   | 0%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB10 - w=13,5%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB10 - wót=15,5% | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB10 - wót=15,5% | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB10 - wót=15,5% | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB10 - wót=15,5% | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB10 - w=17,5%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| HB10 - w=17,5%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - w=11%     | 0%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - w=13%     | 0%              |                      |    | x  | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - w=13%     | 2%              |                      |    | x  | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - w=15%     | 0%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - wót=17%   | 0%              |                      |    |    | x        |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - wót=17%   | 2%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - wót=17%   | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - wót=17%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - w=19%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  |    |
| HB11 - w=19%     | 2%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB11 - w=21%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  |    |
| HB11 - w=21%     | 6%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB12 - w=26,5%   | 0%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB12 - w=26,5%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB12 - wót=29%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB12 - wót=29%   | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB12 - wót=29%   | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB12 - wót=29%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HB12 - w=32%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR1 - w=21%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR1 - w=21%     | 2%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR1 - wót=24%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| HBR1 - wót=24%   | 2%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR1 - wót=24%   | 4%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR1 - wót=24%   | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR2 - w=26%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR2 - w=26%     | 3%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR2 - w=26%     | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR2 - wót=30%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR2 - wót=30%   | 3%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR2 - wót=30%   | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| HBR2 - w=32%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  |    |
| HBR2 - w=32%     | 3%              |                      |    |    |          |    |    | x                |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  |    |
| HBR2 - w=32%     | 6%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM3 - w=17%      | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| ZM3 - w=17%      | 6%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| ZM3 - wót=21%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| ZM3 - wót=21%    | 2%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM3 - wót=21%    | 4%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM3 - wót=21%    | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM3 - w=24%      | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| ZM6 - w=17%      | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |
| ZM6 - w=17%      | 6%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM6 - wót=21%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM6 - wót=21%    | 2%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM6 - wót=21%    | 4%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM6 - wót=21%    | 6%              |                      |    |    | x        | x  | x  | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM6 - w=24%      | 0%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |
| ZM6 - w=24%      | 6%              |                      |    |    |          |    |    | x                | x  | x  |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  |

Tabela 8.4 – Aplicabilidade dos Materiais Estabilizados na Pavimentação Rodoviária Considerando Todas as Variações Estudadas – Com e Sem Imersão.

Continuação.

| Material       | teor de cal (%) | AMOSTRAS SEM IMERSÃO |    |    |          |    |    |                  |    |    | AMOSTRAS COM IMERSÃO |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
|----------------|-----------------|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|----------------------|----|----|----------|----|----|------------------|----|----|---|
|                |                 | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    | Base                 |    |    | Sub-base |    |    | Reforço Subleito |    |    |   |
|                |                 | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM | PN                   | PI | PM | PN       | PI | PM | PN               | PI | PM |   |
| SF2 - w=17%    | 0%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - w=17%    | 6%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  |    |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| SF2 - wót=19%  | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF2 - wót=19%  | 2%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    | x  |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| SF2 - wót=19%  | 4%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    | x  |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| SF2 - wót=19%  | 6%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    | x  |    |          |    |    |                  | x  | x  | x |
| SF2 - w=21%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF4 - w=14%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=16%    | 0%              |                      |    |    |          |    | x  |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=16%    | 2%              |                      |    |    |          |    | x  |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=18%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=18%    | 6%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - wót=20%  | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - wót=20%  | 2%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - wót=20%  | 4%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - wót=20%  | 6%              |                      |    |    |          |    | x  |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=22%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=22%    | 2%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=24%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF4 - w=24%    | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF8 - w=9%     | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF8 - wót=11%  | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - wót=11%  | 2%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF8 - wót=11%  | 4%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF8 - wót=11%  | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF8 - w=13%    | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    |   |
| SF13 - w=16%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - w=16%   | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - wót=18% | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  |    |    | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - wót=18% | 2%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - wót=18% | 4%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - wót=18% | 6%              |                      |    |    |          |    | x  | x                | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - w=20%   | 0%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |
| SF13 - w=20%   | 6%              |                      |    |    |          |    |    |                  | x  | x  | x                    |    |    |          |    |    |                  |    |    | x |

### 8.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A CAPACIDADE DE SUPORTE DOS SOLOS ESTUDADOS

A partir dos resultados apresentados neste capítulo, nota-se que é importante considerar que, fisicamente a sucção e o comportamento mecânico de um determinado solo não saturado dependem da umidade (w) e do índice de vazios (e). Variando-se a umidade modificam-se as forças de ligação entre a estrutura mineral e a água e, alterando o índice de vazios, mudam as forças de interação entre as partículas, as forças de contato e o raio dos meniscos. Os resultados apresentados nesse capítulo comprovam a validade do modelo de transformação proposto por Camapum de Carvalho & Pereira (2001), para o caso do mini-CBR. Observa-se, de forma geral, que há tendência bem definida de aumento do CBR com a sucção e com a sucção normalizada (pF/e). Considerando-se que para uma obra trabalha-se com uma faixa estreita de umidades e peso específico de compactação, o modelo ganha em precisão na avaliação de casos reais.

O conjunto de Figuras apresentada neste capítulo demonstram ainda que, mesmo considerando-se a normalização da sucção, não ocorre tendência a um comportamento único, pois a distribuição de poros varia com a umidade e energia de compactação. A aparente

coincidência de porosidade visualizada para alguns solos, não representa regra, mas exceção aos comportamentos geralmente observados.

Delgado (2002) ao estudar o comportamento de um perfil de solo tropical, observou que, o comportamento depende do nível de intemperização sofrido pelo solo. No presente estudo, este é um elemento importante, embora outros, como a própria composição química-mineralógica sejam fundamentais.

Em síntese, é possível dizer que o mini-CBR depende da intemperização pela qual passou o solo no perfil de alteração e que, a compactação do solo no ramo seco, na umidade ótima ou no ramo úmido reflete no seu comportamento mesmo considerando-se a mesma umidade de equilíbrio, ou seja, para a mesma relação  $pF/e$ .

Estas constatações são importantes do ponto de vista prático, pois realçam a necessidade de estudos em perfil dos mantos intemperizados a serem usados em obras rodoviárias.

## **9 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES**

O ensaio de resistência à compressão simples é o mais empregado na avaliação do comportamento das misturas solo-cal. O uso do CBR é muitas vezes criticado, no entanto, acredita-se que para os teores de cal utilizados, ambas as técnicas de ensaio podem ser utilizadas sem restrições, resguardadas as limitações que lhes são próprias. Esse capítulo apresenta os resultados de resistência à compressão simples obtidos para os diferentes materiais estudados, considerando ainda diferentes tempos de ensaio para uma dada energia de compactação (no caso, 8 golpes ou PI).

### **9.1 – AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE**

A reatividade à cal foi avaliada pelo parâmetro de Thompson (1966), que é definido pela diferença entre a resistência à compressão máxima do solo estabilizado aos 28 dias e, a resistência do solo sem aditivo, nas condições ótimas de compactação. Foram realizados, para cada solo, ensaios de compressão simples para corpos de prova compactados no ramo seco, na umidade ótima e no ramo úmido da curva de compactação. Os corpos de prova compactados nos ramos seco e úmido foram ensaiados com teores de 0% e 6% de cal incorporada, enquanto os compactados na umidade ótima foram com a incorporação de 0%, 2% e 6% de cal. A metodologia de compactação e a energia aplicada são descritas no capítulo 3 (Materiais e Métodos) e a Tabela 9.1 a seguir descreve a quantidade e as condições de compactação usadas.

Nos gráficos das Figuras 9.1 a 9.4 são apresentados, para os solos HB7, HB9b, ZM6 e SF4, os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) obtidos para diferentes tempos de cura não imersa. Destaca-se que a totalidade dos resultados obtidos são apresentados nas Figuras 9.1 a 9.5 e, no anexo XII.

Observa-se que a adição de 2% de cal, para os solos compactados na umidade ótima, nem sempre proporciona ganho de resistência, como exemplo cita-se os solos HB7 (Figura 9.1), HB10 (Figura XII.1), HB12 (Figura XII.3), HBR1 (Figura XII.4), HBR2 (Figura XII.5) e SF8 (Figura XII.8). É importante ressaltar que pelo método de dosagem de Eades & Grim (1966) os solos HB7, SF4 e SF8 deveriam estabilizar com 2% de cal, o que não ocorre conforme os resultados o comprovam.

Para o teor de 6% de cal na umidade ótima, verifica-se que para nenhum dos solos estudados ocorreu estabilização da RCS. Aspecto este observado a partir dos resultados

obtidos para pH em água em função do teor de cal (Tabela 5.3), que mostram que praticamente todos os solos apresentam pelo menos pequenas variações de pH entre 2% e 6% de cal. Tal comportamento aponta para discordância do método de dosagem de Eades & Grim, que não indica estabilização com cal apenas para os solos SF13, ZM3 e ZM6.

Tabela 9.1 – Parâmetros dos Corpos de Prova Submetidos à RCS.

| Tipo de Solo | Umidade % | % cal    | Energia (golpes) | tempo de cura (dias) | Quantidade |
|--------------|-----------|----------|------------------|----------------------|------------|
| HB7          | 28        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB7          | 30        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| HB7          | 32        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB9b         | 30        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB9b         | 32        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| HB10         | 13,5      | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB10         | 15,5      | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| HB10         | 17,5      | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB11         | 15        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB11         | 17        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| HB11         | 19        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB12         | 26        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HB12         | 29        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| HB12         | 32        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HBR1         | 20        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HBR1         | 24        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| HBR1         | 26        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HBR2         | 28        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| HBR2         | 30        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| HBR2         | 32        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| ZM3          | 19        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| ZM3          | 21        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| ZM3          | 24        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| ZM6          | 19        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| ZM6          | 21        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| ZM6          | 24        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF2          | 17        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF2          | 19        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| SF2          | 21        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF4          | 17        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF4          | 20        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| SF4          | 24        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF8          | 9         | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF8          | 11        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| SF8          | 13        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF13         | 15        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| SF13         | 17        | 0, 2 e 6 | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 30         |
| SF13         | 21        | 0 e 6    | PI               | 0, 7, 14, 28, 58     | 20         |
| <b>TOTAL</b> |           |          |                  |                      | 890        |

Avaliando os resultados em relação ao critério de reatividade de Thompson, nota-se que a exceção do solo HB10 estabilizado com 6% de cal, os demais não apresentam ganho de resistência não imersa superior a 345 KN/m<sup>2</sup>. É importante ressaltar ainda que, dependendo do teor de umidade estudado e do tipo de solo, a estabilização com cal mostra valores de RCS mais ou menos próximos do acréscimo de RCS de 345 KN/m<sup>2</sup>.

O parâmetro de reatividade (RC) apresentou variação mínima de 9,2% para o solo HB12 e, máxima de 290% para o solo SF8. Ganhos substanciais indicam que o solo é passível de

utilização como camadas de pavimentos rodoviários. No entanto, há de se considerar o parâmetro de resistência mini-CBR, valor este que ainda é usado para o dimensionamento das estruturas de pavimentos rodoviários. De acordo com a Tabela 8.4, apresentada no capítulo 8, verifica-se que a maioria dos solos só pode ser usada como material de construção para sub-bases rodoviárias e, que os solos HBR1, ZM3 e SF8 compactados e estabilizados com 6% de cal só são aplicáveis como reforço de subleito. É interessante observar que em termos de variação de RCS o solo SF8 é o de maior ganho percentual de resistência, no entanto tal critério não o classifica como um bom material constituinte das camadas de um pavimento rodoviário.

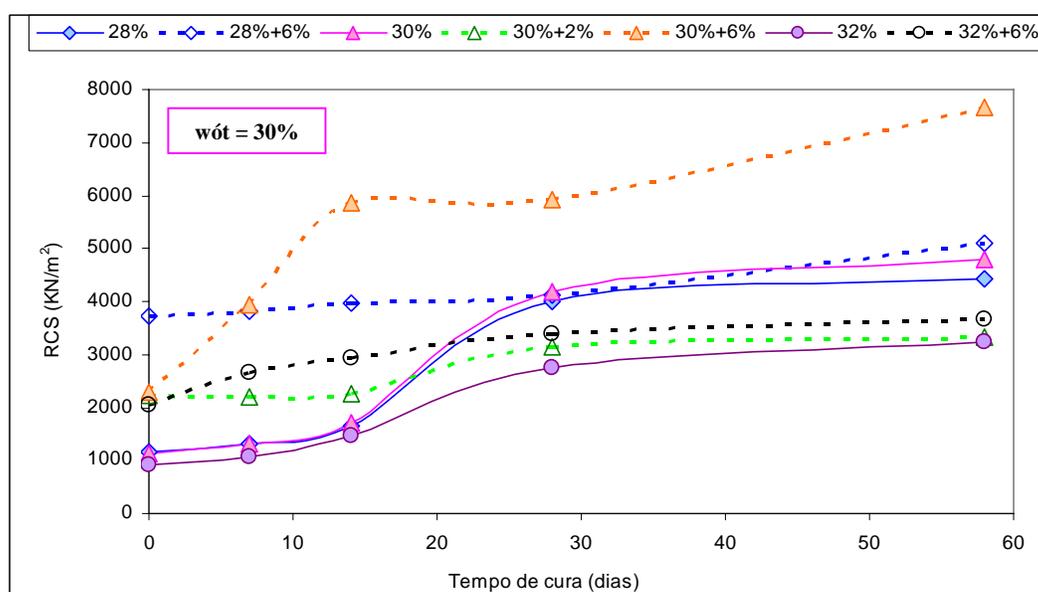


Figura 9.1 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo HB7.

Fazendo uso de semelhante critério para avaliar o comportamento dos materiais compactados e estabilizados no ramo seco e no úmido, verifica-se que nenhum dos solos atende ao critério de Thompson para estabilização com 6% de cal incorporada.

Queiroz de Carvalho (1983) analisou 19 solos lateríticos, estabilizados com 4 teores de cal, onde verificou que o aumento líquido de resistência, ou seja, os valores do parâmetro de reatividade à cal (RC), não indicaram, em vários casos, a resposta dos solos a estabilização, não havendo tendência lógica entre este parâmetro e o aumento de resistência expresso em porcentagem. Além disso, o parâmetro RC traduz o incremento na resistência quando a cal é adicionada a um solo, porém, não indica o potencial do solo em reagir com a cal. Em virtude

destas limitações, o autor sugere definir a reatividade dos solos lateríticos pelo ganho de resistência em termos absolutos de unidade de resistência (RC).

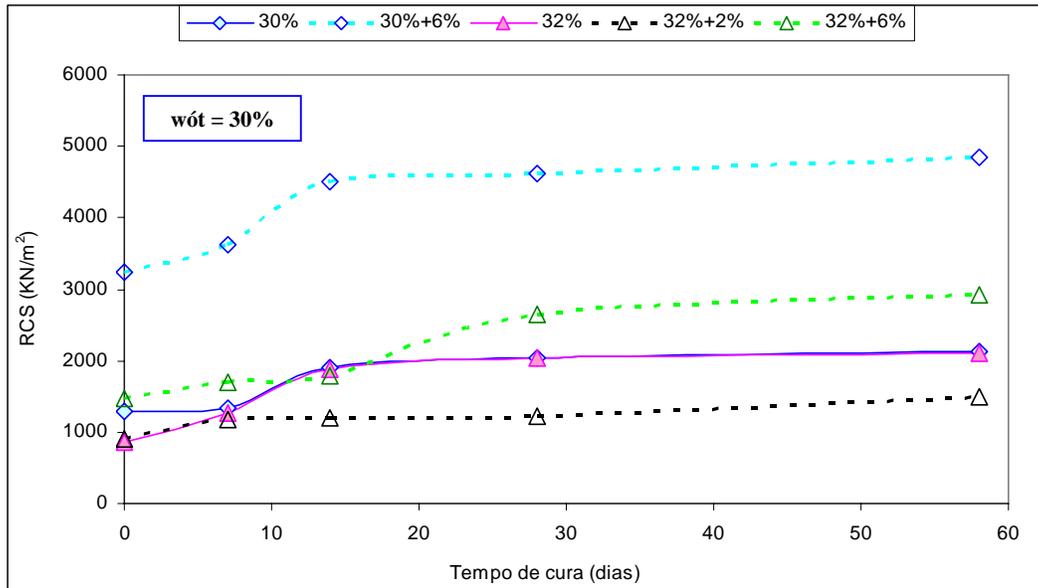


Figura 9.2 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo HB9b.

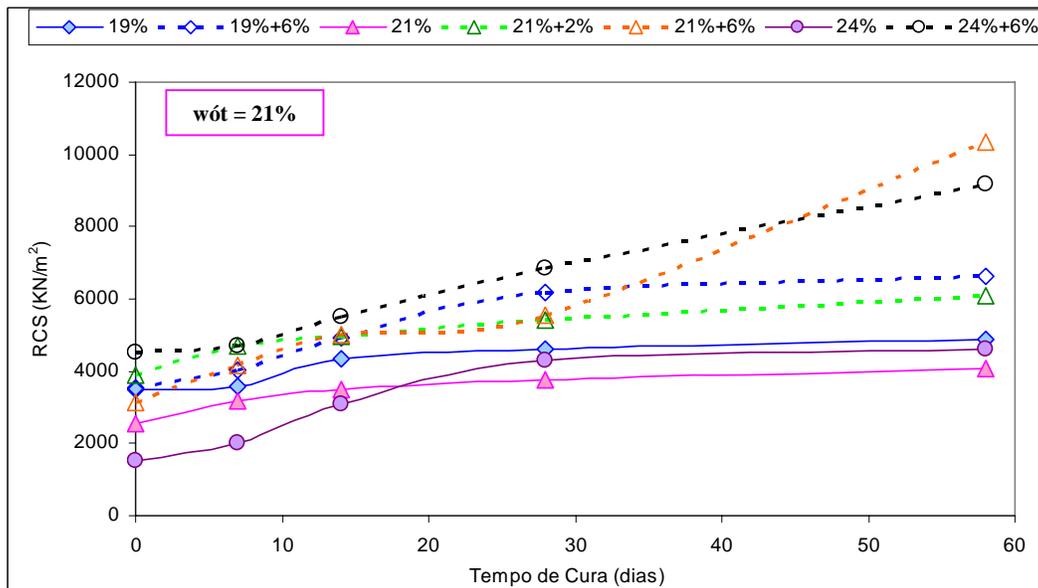


Figura 9.3 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo ZM6.

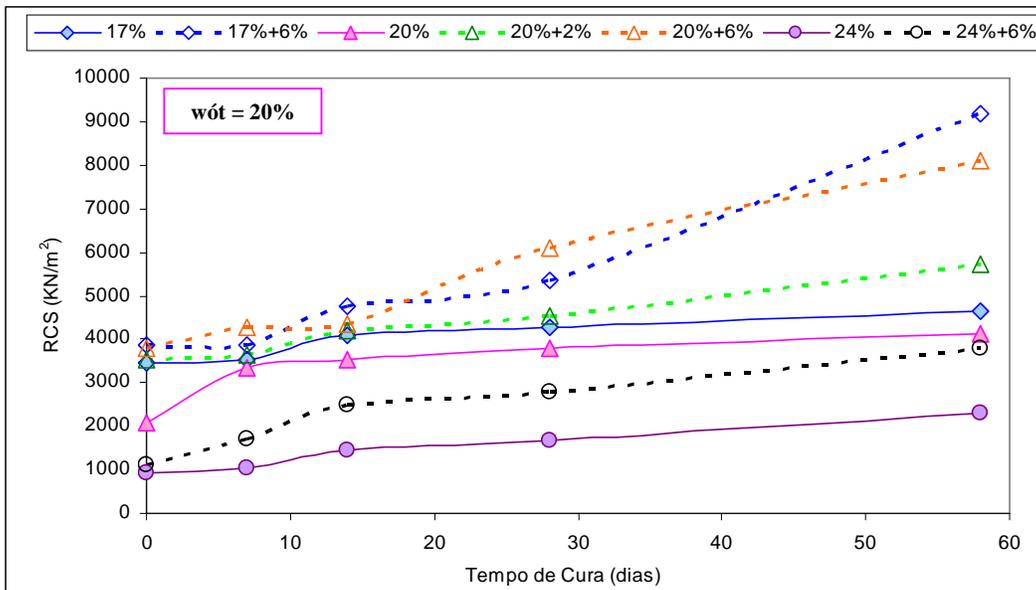


Figura 9.4 – Evolução da RCS com o Tempo de Cura para o Solo SF4.

## 9.2 – AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM O TEMPO DE CURA

A avaliação da resistência com o tempo de cura deve ser feita separadamente para cada tipo de solo e, posteriormente verificar-se a comparação de diferentes tipos de solos, com teores de umidade aproximados ou idênticos.

A Figura 9.1 (solo HB7) mostra curvas de RCS *versus* tempo de cura, similares para os teores de umidade de 28% e 30%. Já para 32% verificou-se que a RCS é bem menor, com a curva se localizando abaixo das demais umidades, sendo necessário destacar a ocorrência do ponto de inflexão das curvas para períodos inferiores a 10 dias. Destaca-se, no entanto, que por se tratar de solos não saturados, a comparação de resistências para umidades e índices de vazios distintos, deixa a desejar, pois a sucção atuante certamente não é a mesma. Para o material estabilizado verifica-se que a incorporação da cal ocasionou elevação nos valores de resistência obtidos para 0 e 7 dias, no entanto a partir de 14 dias verifica-se que a curva se aproxima bastante da obtida para 32% de umidade com o solo em estado natural. Tal comportamento pode indicar a ocorrência de desagregação para este solo quando da incorporação de 2% de cal, comportamento este similar ao observado para o mini-CBR que apresentaram decréscimo de resistência ao se incorporar 2% de cal. Para 6% de cal, nota-se que a RCS inicial (0 dias) é similar à obtida para 30%+2% de cal, mas que tende a crescer

significativamente a partir daí, apresentando os maiores valores de RCS, a partir dos 14 dias de cura. Para o ramo seco o aumento da RCS com 6% de cal foi insignificante. Quanto ao ramo úmido observa-se também apenas um pequeno acréscimo de RCS inicial.

A Figura 9.2 (solo HB9b) mostra, para o solo natural, curvas de RCS *versus* tempo de cura, similares para os teores de umidade de 30% e 32%, apresentando pontos de inflexão idênticos e inferiores a 10 dias. Para estabilização com cal nota-se que para a umidade ótima (30%+6% de cal) a RCS inicial sobe, mantendo-se o ponto de inflexão, e apresentando os maiores valores de RCS. Já para 32%+2% mantêm-se a RCS inicial e praticamente não há variação de RCS para os demais tempos de cura. Já para 32%+6% de cal, verifica-se elevação da RCS inicial, o ponto de inflexão eleva para 14 dias e, as demais RCS sobem, embora não atinjam as obtidas para 30%+6% de cal.

Para o solo HB10 (Figura XII.1) no estado natural, foram obtidas curvas de RCS *versus* tempo de cura, com comportamento similar ao verificado para o solo HB7, ou seja, no ramo seco e na umidade ótima, os resultados foram semelhantes e no ramo úmido, os valores de RCS são inferiores aos demais. Para estabilização com cal nos pontos compactados na umidade ótima, o comportamento também é semelhante ao verificado para o solo HB7, já para 13,5%+6% de cal, ocorre pequena elevação da RCS inicial e pequeno acréscimo de RCS (aproximadamente 6%) até um período de 14 dias. A partir daí, ocorrem elevações mais significativas de RCS. Já para a umidade de 17,5%+6% de cal ocorre também, pequena elevação de RCS inicial, com estes valores sendo superiores aos obtidos para 13,5%+6% até 20 dias de cura. A partir daí, como os valores de RCS praticamente não sofre variação, a curva para 13,5%+6% de cal se sobressai. Apesar do comportamento dos solos HB7 e HB10 guardarem semelhança, suas propriedades físico-químicas e mineralógicas são distintas, o que conduz a idéia de ocorrência de certa compensação entre elas. Por exemplo, o solo HB7 é mais argiloso, no entanto é o HB10 que apresenta maior CTC. Com isso, a incorporação da cal faz com que o solo HB10, inicialmente não plástico no estado natural, passe a apresentar índice de plasticidade um pouco superior ao do solo HB7 (Tabela 4.6). Aqui, mais uma vez, fica claro a importância de análises multiparamétricas, como desenvolvimento de redes neurais, no entendimento do comportamento desses solos.

Em relação ao solo HB11 (Figura XII.2) foram obtidas curvas de RCS *versus* tempo de cura, próximas, para as umidades de compactação de 17% (wót) e 19% e, curva totalmente diferenciada com os maiores valores de RCS para 15% de umidade. Estas curvas se diferenciam quanto as RCS, no entanto os pontos de inflexão das curvas são aparentemente iguais e inferiores a 10 dias. Para estabilização com cal nos solos compactados na umidade

ótima já se verifica crescimento da resistência com 2% de cal. Para 6% de cal às RCS se elevam significativamente em relação às obtidas com o solo natural. Este ganho de RCS, para o solo estabilizado com 6% de cal, diminui com o aumento da umidade de compactação. Tal comportamento pode ser atribuído à sucção, pois maior a umidade, menor a sucção. É interessante observar ainda que as RCS para 17%+6% e 15%+6% são praticamente iguais para tempo de cura igual a 58 dias.

Para o solo HB12 (Figura XII.3) foram obtidas curvas de RCS *versus* tempo de cura, próximas, para as umidades de compactação de 29% ( $w_{ót}$ ) e 26% e, curva totalmente diferenciada para 32%. É interessante observar que os valores de RCS tendem a coincidir para o maior período de cura, nos pontos em que o solo foi compactado a 26% e 29% de umidade. Exceto para 2% de cal na umidade ótima, o solo HB12 apresentou ganho de resistência com a incorporação de cal.

Para o solo HBR1 (Figura XII.4) no estado natural a RCS diminui com o aumento da umidade de compactação. Os resultados finais obtidos para o maior tempo de cura aproxima as RCS do solo natural daquelas obtidas para o solo estabilizado com 6% de cal. No entanto, observa-se que a estabilização do solo compactado na umidade ótima com 2% de cal apresenta uma substancial redução da RCS. Esse é talvez o melhor exemplo da influência da cal no estado de agregação do solo com reflexo na resistência. A Figura 5.33 mostra que a incorporação de 2% de cal ao solo gera uma grande desagregação, voltando o solo a agregar para 6% de cal, o que explica o comportamento quanto as RCS. Esse mecanismo de desagregação desse solo já havia sido colocado em evidência por Rezende (2003).

Para o solo HBR2 (Figura XII.5) no estado natural, as RCS diminuem com o aumento da umidade de compactação, a exemplo do observado para o solo HBR1. Como a adição da cal esse solo se distingue do anterior apenas pelo fato de que no ramo úmido a incorporação de 6% de cal não propiciou ganho de resistência no solo. Texturalmente os dois solos são semelhantes apresentando, no entanto, pequenas distinções nas propriedades químicas, daí a alteração de comportamento, por predomínio da alteração estrutural.

Para o solo ZM3 (Figura XII.6) as curvas de RCS *versus* tempo de cura, obtidas para o ramo seco apresenta maior resistência e se distingue das determinadas para a umidade ótima (21%) e o ramo úmido (24%). Ao incorporar cal, observa-se que ocorreu elevação de resistência para todas as umidades trabalhadas. Para a umidade ótima, a incorporação de 2% de cal elevou a RCS em até 54%, enquanto para 6% de cal são verificados acréscimos de resistência de até 86%. Para os pontos compactados no ramo seco ( $w=19%$ ) a incorporação de cal provocou acréscimos de resistência a percentuais similares aos obtidos para a umidade

ótima com 2% de cal. E para o ramo úmido são verificados acréscimos de resistência a percentual de até 88%, ou seja, similares aos obtidos para a umidade ótima com 6% de cal. É interessante observar que os maiores valores de RCS são obtidos para os pontos compactados no ramo seco e no úmido, estabilizados com 6% de cal; curvas estas, bastante similares até tempo de cura igual a 28 dias. Apesar da melhoria de comportamento verificada com a adição da cal é importante destacar que as resistências obtidas situam-se entre as menores determinadas para os solos estudados.

Quanto ao solo ZM6 (Figura 9.3) no estado natural, observa-se semelhança entre as curvas de RCS *versus* tempo de cura, obtidas para as diferentes umidades de compactação, entre as com maior aproximação dos pontos compactados no ramo úmido ( $w=24\%$ ) daqueles obtidos para o ramo seco ( $w=19\%$ ) para períodos de cura superiores a 28 dias. De forma similar ao obtido para o solo ZM3 a incorporação da cal gera acréscimos de resistência para qualquer umidade trabalhada. Para a umidade ótima apenas se verificam acréscimos consideráveis de resistência entre 2% e 6% de cal para período de cura superior a 28 dias e, para os ramos seco e úmido, a partir de 7 dias já ocorrem elevações consideráveis de resistência; observando-se maiores percentuais para o ramo úmido. Apesar de aumentar a RCS com a adição de cal, como ocorreu no solo ZM3, é importante destacar que o comportamento do solo ZM6 é muito superior ao verificado para o solo ZM3. Isso se deve provavelmente à grande diferença mineralógica e textural entre os dois solos (Tabelas 5.4 e 4.3).

Para o solo saprólítico SF2 (Figura XII.7) observam-se ainda curvas de RCS distintas para 0% de cal, sendo os menores valores obtidos para a umidade ótima ( $w_{ót}=19\%$ ) e os maiores valores para o ramo seco. Ao incorporar cal, de forma semelhante aos solos ZM3 e ZM6, ocorre elevação de resistência para os diferentes teores de cal e umidades de compactação. É importante observar, porém que, os percentuais de elevação são baixos, ocorrendo aproximação entre as curvas para períodos de cura inferiores a 40 dias. A partir deste período, se destacam as curvas obtidas no ramo úmido e na umidade ótima estabilizadas com 6% de cal. Esta Figura indica que o solo SF2 aparentemente apresenta tendência à estabilização da RCS, para tempos de cura inferiores a 40 dias, sendo esta não superior a  $422,5 \text{ KN/m}^2$ .

Para o solo SF4 (Figura 9.4) observam-se ainda curvas de RCS distintas para 0% de cal, sendo que a resistência diminui com o aumento da umidade de compactação. Ao incorporar cal, ocorrem acréscimos de resistência para todos os teores de cal e umidades considerados. Para o ramo úmido, apesar da elevação da resistência esta curva ainda apresenta os menores

valores de RCS, mesmo em relação ao solo natural compactado no ramo seco e na umidade ótima. Para o solo compactado na umidade ótima e estabilizados com 2% de cal apenas se verificam acréscimos de RCS a partir de 7 dias, estes atingindo percentuais que variam de 8% a 41%; já para 6% de cal estes percentuais se elevam para 18% a 49%. Os valores de RCS obtidos para tal condição são próximos dos verificados para o ramo seco com o solo estabilizado com 6% de cal. Portanto, pode-se afirmar que os maiores valores de RCS são obtidos para 17%+6% de cal e 20%+6% de cal, este último apresentando menores valores de resistência para os maiores períodos de cura.

O solo SF8 (Figura XII.8) mostra ainda curvas de RCS distintas para 0% de cal, queda de resistência na medida em que se aumenta a umidade de compactação. Ao incorporar 6% de cal, ocorrem acréscimos de resistência para todas as umidades de compactação, com maiores valores para a umidade ótima estabilizada com 6% de cal, para período de estabilização superior a 20 dias. Para períodos de cura inferiores é verificada certa aproximação entre os materiais compactados no ramo seco e na umidade ótima, quando estabilizados com 6% de cal. Para o teor de 2% de cal nota-se acréscimo de RCS até 20 dias e a partir daí, os valores estabilizam apresentando resultados de resistência ligeiramente inferiores àqueles obtidos para a curva com 0% de cal incorporada. Esse solo se aproxima texturalmente e mineralogicamente do solo ZM3, daí a semelhança de comportamento quanto a RCS.

Para o último dos solos estudados, solo SF13 (Figura XII.9), verifica-se ainda curvas de RCS distintas para 0% de cal, com maiores valores de resistência para o ramo seco ( $w=15\%$ ) e úmido ( $w_{ót}=21\%$ ). Ao incorporar cal, ocorrem acréscimos de resistência consideráveis apenas para a umidade ótima e para o ramo úmido, com maiores valores de RCS para os pontos compactados no ramo úmido e estabilizados com 6% de cal.

Embora outros fatores como índice de vazios, composição química e mineralógica interfira no comportamento do solo a Figura 9.5 apresenta a comparação de curvas de RCS obtidos para solos compactados em umidades semelhantes.

A Figura 9.5 mostra curvas de diferentes solos compactados em um teor de umidade igual a 30% e 29%. Nota-se que nos latossolos os valores finais dependem do solo, mas os ganhos são mais ou menos similares e não muito importantes, podendo ocorrer perda de resistência para baixos teores de cal, como se verifica para os solos HB7, HB12 e HBR2 com 2% de cal, em relação ao solo natural.

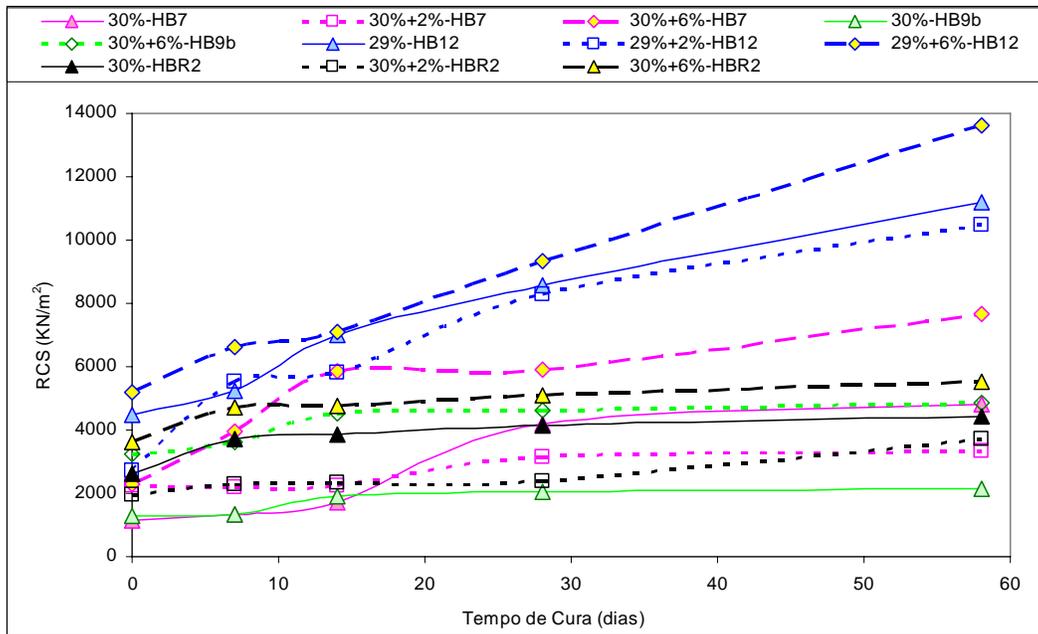


Figura 9.5 – Comparação Entre os Latossolos Compactados a 30% e 29% de Umidade.

O conjunto de resultados aqui apresentados, reafirma que o comportamento do solo natural e estabilizado compactado representa uma função complexa em que age conjuntamente o estado físico, químico e mineralógico, conjuntamente ao arranjo estrutural das partículas, sendo tarefa difícil e arriscada a elaboração de associações diretas.

## 10 – PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

Como já descrito no capítulo 3 (Materiais e Métodos), foram determinadas as perdas de massa por imersão (PMI) dos corpos de prova compactados nas energias equivalentes ao Proctor Normal (PN - 5 golpes) e Proctor Intermediário (PI - 8 golpes), inicialmente submetidos à determinação da sucção. Foram considerados 2 corpos de prova por situação de compactação, destacando-se que a obtenção da sucção foi efetuada em apenas um deles.

As Figuras 10.1 a 10.3 mostram a variação na PMI quando ocorre a estabilização química e a modificação da energia de compactação, citando-se ainda que os valores plotados nos gráficos, representam à média das determinações de PMI.

Avaliando o conjunto das Figuras para todos os solos estudados, são notáveis comportamentos diferenciados quanto a PMI, estes sendo provavelmente decorrentes das composições de cada material e de suas reatividades a incorporação da cal. Verifica-se ainda, a tendência ao decréscimo de PMI com o aumento da energia de compactação aplicada, comportamento este mais notável para os latossolos. Sabendo-se que o procedimento de compactação afeta consideravelmente as resistências dos solos, conforme verificado no capítulo 8, o comportamento verificado relativo à PMI, não pode ser generalizado sem verificação para outra metodologia de compactação.

O solo HB7 (Figura 10.1(a)) mostra maiores PMI para o material compactado a umidade de 26% (ramo seco) e, à medida que é incorporada água estes valores decrescem. Ao misturar 2% de cal para a umidade mais baixa ( $w=26\%+2\%$  de cal) verifica-se que ocorreu elevação na PMI para os pontos compactados na energia PN e decréscimo para os compactados na energia PI. Ao misturar um maior teor de cal (6%) não foi verificada a ocorrência de PMI. Para o solo compactado na umidade ótima, a incorporação de 2% de cal ocasionou comportamento igual ao observado para o ramo seco e, ao acrescer este percentual de cal verifica-se decréscimo de PMI para 4% e inexistência de perda para 6% de cal. Para a compactação no ramo úmido (32%) também é verificado comportamento similar quando da incorporação de 2% de cal, ocorrendo, no entanto, decréscimo de PMI, em relação ao solo com 0% de cal, quando se incorpora 6% de cal. É interessante observar que uma das finalidades do uso da cal é obter uma melhor estabilidade do material quando na presença de água, o que não foi verificado para o teor de 2% de cal. Este parâmetro vem a reafirmar a tendência de alguns solos de desagregar para baixos teores de cal, o que resulta em piores características do solo compactado e estabilizado em relação ao solo natural. Já para 6% de

cal ao ocorrer tendência à agregação nota-se uma maior estabilidade para todas as umidades de compactação usadas, ocorrendo PMI apenas para o ponto mais úmido.

Para o solo HB9b (Figura 10.1(b)) nota-se comportamento distinto em relação ao HB7, pois para o ramo seco não foi verificada PMI. Acrescendo a umidade ocorrem perdas de aproximadamente 30%, este valor decrescendo ao se elevar a umidade de compactação. De forma semelhante ao observado no solo HB7, a incorporação de 2% de cal ocasionou elevação na PMI para todas as umidades trabalhadas, comportamento este também coincidente com as variações de resistência observadas no capítulo 8. E, à medida que se acresce o teor de cal, estas PMI são menores, chegando a inexistir para a umidade ótima quando da estabilização com 6% de cal. Tal aspecto conduzindo a observação de maior estabilidade estrutural quando se trabalha com amostras imersas, o que pode também pode ser verificado no capítulo 8.

O comportamento do solo HB10 (Figura 10.1(c)) também é diferenciado dos anteriores, com valores de PMI similares para a compactação no ramo úmido (17,5%) e na condição ótima (15,5%), e com valores inferiores para o ramo seco (13,5%). Ao incorporar cal a este material, verifica-se que para qualquer teor de cal e umidade de compactação as perdas são inexistentes. Este comportamento dá uma idéia da boa reatividade do material à estabilização com cal, uma vez que promove melhor comportamento frente à umidade. É ainda importante ressaltar que praticamente não ocorreu perda de resistência quando da inundação do material estabilizado, o que concorda com o comportamento verificado para a PMI.

O solo HB11 (Figura 10.1(d)) mostra inexistência de PMI para o ponto de compactação mais seco ( $w=13\%$ ), assim como para o mesmo estabilizado com 2% de cal. Ao elevar a umidade de compactação nota-se que os pontos compactados na umidade ótima ( $w_{ót}=17\%$ ) apresentam os maiores valores de PMI. As PMI decrescem para a umidade de 19% e, torna a elevar para a umidade de 21%, esta se aproximando os valores obtidos para a  $w_{ót}$ . Ao incorporar a cal, as perdas de massa decrescem em relação às verificadas para o material natural (0% de cal), apresentando baixos percentuais, exceto para a maior umidade de compactação. Ao observar a variação de resistência obtida quando da incorporação de 2% de cal (capítulo 8) verificou-se que tal teor praticamente não conduz a mudanças de suporte. Já para 6% de cal, o comportamento para as maiores umidades de compactação (19% e 21%) também concordam com a variação de resistência, que mostra provável ocorrência de desarranjo estrutural para tais umidades, o que gera PMI. O solo HB11 mostrou-se mais instável que o HB10. No entanto, comparando-se a mineralogia e a textura dos dois materiais, observa-se que eles apresentam certa semelhança. A grande diferença entre os dois solos está

no pH, sendo o solo HB10 mais ácido que o solo HB11 e, portanto, mais propenso à agregação.

Para o solo HB12 (Figura 10.1(e)) são verificadas PMI apenas para o ramo úmido (32%) na condição natural (0% de cal). Tal comportamento indo de encontro ao observado no solo HB11. Este material apesar de não mostrar grandes variações de resistência com a estabilização, mostra ter se tornado estável em relação à PMI, quando da adição de cal.

Para o solo HBR1 (Figura 10.1(f)) são verificadas perdas de massa apenas para o solo compactado no ramo seco ( $w=21\%$ ), embora o decréscimo de resistência com a imersão não seja tão significativo (em torno de 15%). Já para os demais teores de umidade e ainda ao material estabilizado, verifica-se que não ocorre PMI. Sendo assim, verifica-se que a cal contribuiu para um melhor comportamento do material em termos de estabilidade a presença de água. Já para o solo HBR2 (Figura 10.1(g)) verificam-se PMI para a umidade ótima ( $w_{ót}=30\%$ ) e para o ramo seco ( $w=32\%$ ), a incorporação da cal ocasionando a inexistência de PMI.

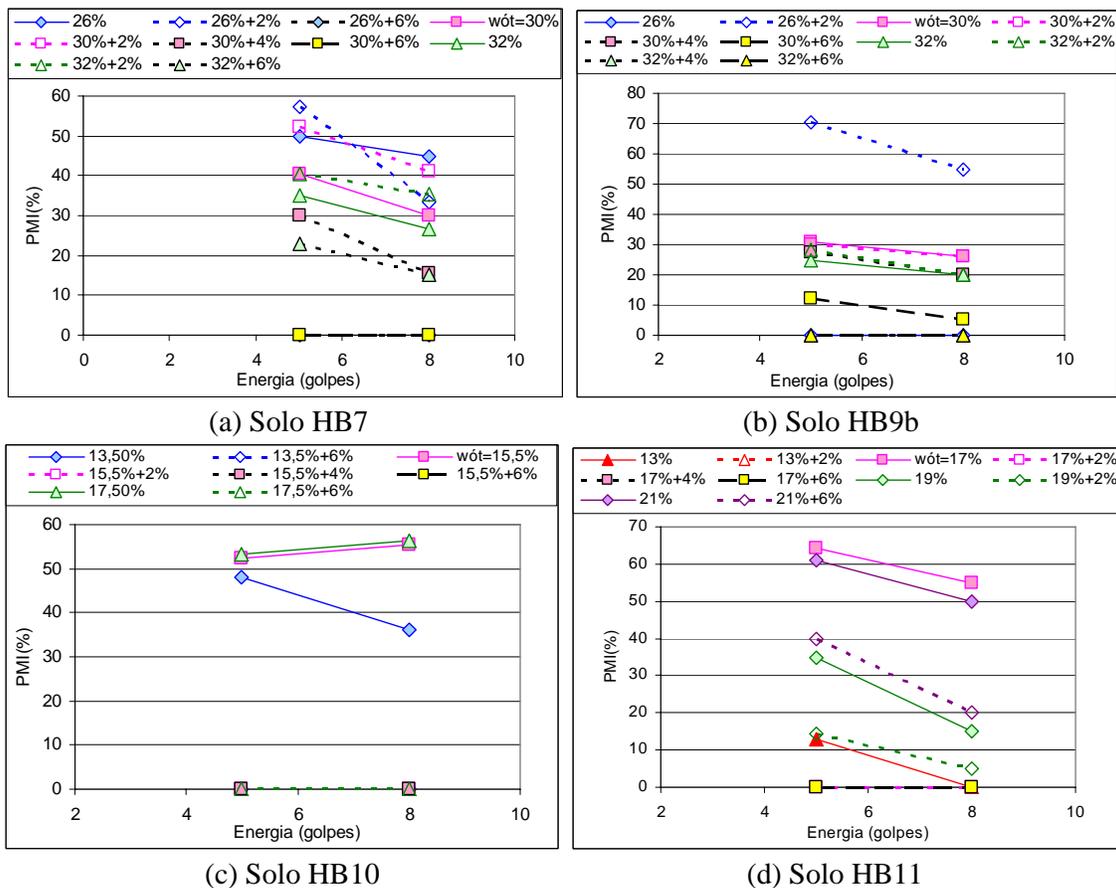
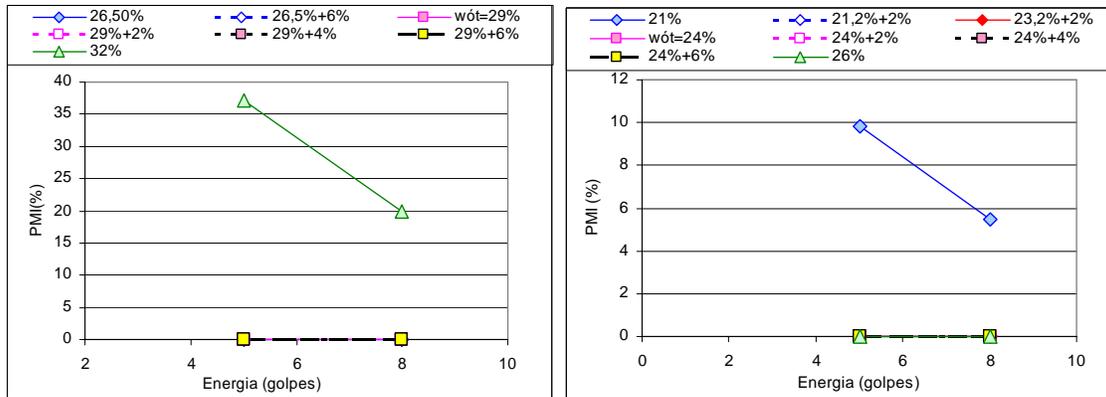
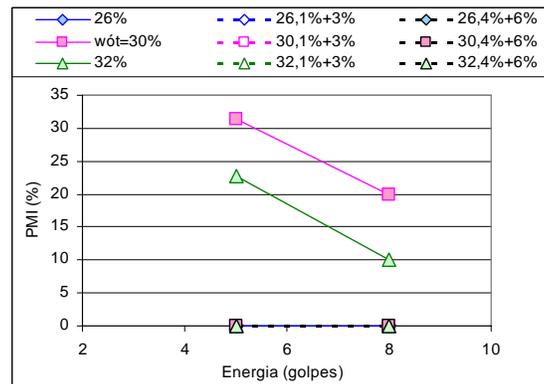


Figura 10.1 – PMI Obtidas para os Latossolos Com e Sem Estabilização Química.



(e) Solo HB12

(f) Solo HBR1



(g) Solo HBR2

Figura 10.1 – PMI Obtidas para os Latossolos Com e Sem Estabilização Química - Continuação.

De forma semelhante aos latossolos, ao analisar os solos pertencentes à zona mosqueada (ZM) são verificados comportamentos distintos.

O solo ZM3 (Figura 10.2(a)) mostra queda de PMI à medida que o material é compactado com menores umidades. Ao se incorporar 6% de cal, a PMI torna-se nula no ramo seco ( $w=17\%+6\%$  de cal). Para a umidade ótima ao se incorporar 2% e 4% de cal o solo apresenta grande redução na PMI. No entanto, com 6% ela volta a aumentar, mantendo-se, porém, inferior à do solo natural. Este comportamento aponta para teor ótimo de cal de até 4% com vias a melhorar o comportamento quanto à imersão, tanto em termos de PMI como de resistência à penetração, onde são verificados os maiores valores de mini-CBR.

Para o solo ZM6 (Figura 10.2(b)) no estado natural, nota-se que os maiores valores de PMI foram obtidos para as umidades de 24% e 17%. Ao se acrescer a umidade para o teor ótimo, tal absorção foi feita de forma mais lenta, o que gerou uma maior estabilidade estrutural, resultando em menores valores de PMI. Ao incorporar cal ao solo nas diferentes

umidades de compactação, nota-se que ocorreram decréscimos nos valores de PMI na medida em que se acresceu o teor de cal, chegando a inexistir para as umidades de 21%+6% de cal e 24%+6% de cal. Embora tanto o solo ZM3 como o ZM6 pertençam à zona mosqueada, os dois apresentam propriedades físico-químicas e mineralógicas distintas, o que justifica a diferença de comportamento quanto à PMI entre os dois solos.

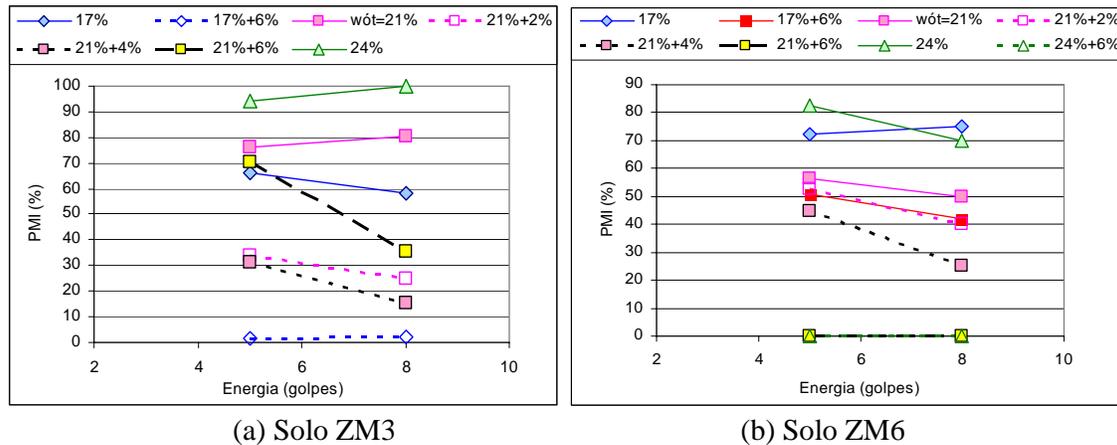


Figura 10.2 – PMI Obtidas para os Solos da Zona Mosqueada Com e Sem Estabilização Química.

O solo SF2 (Figura 10.3(a)) no estado natural apresenta pouca variação na PMI com a mudança da umidade de compactação. É importante ressaltar ainda que este solo mostre baixa reatividade quanto à melhoria de resistência pela estabilização química, o que se reflete nas PMI medidas, só tendo sido registradas quedas substanciais de PMI para o solo compactado na condição ótima com 6% de cal. É interessante destacar que enquanto o solo natural apresenta pouca variação na PMI com o aumento da energia de compactação, no solo estabilizado ocorre grande redução.

O solo SF4 (Figura 10.3(b)) no estado natural não apresenta uma tendência clara de variação de PMI com o aumento da umidade de compactação. A incorporação de 2% de cal para o solo compactado na umidade ótima, reduz a PMI do solo gerando, em seguida, elevação para os teores de 4% e 6% de cal. Fato este indicando que o comportamento desagregador da cal atual para este solo há teores mais elevados. Comportamento semelhante foi verificado no capítulo 8, em que foi visualizada queda de resistência à penetração para os teores de 4% e 6% de cal. Já para as demais umidades de compactação, a mistura com cal causa melhoria no comportamento frente à água, ou seja, decréscimo de PMI.

Para o solo SF8 (Figura 10.3(c)) no estado natural, são observados valores semelhantes de PMI para as umidades de compactação de 9% e 11%, com decréscimo para a umidade de 13%. Ao incorporar cal para os pontos compactados na umidade ótima ( $w_{ót}=11\%$ ) nota-se que para 2% e 4% (chega à zero) ocorre decréscimo na PMI, no entanto ao trabalhar com 6% de cal este valor eleva. Já para o ramo seco ( $w=9\%$ ) a incorporação de 6% de cal ocasiona comportamento desagregador, conduzindo a maiores PMI.

Quanto ao solo SF13 (Figura 10.3(d)) são observados valores muito próximos de PMI para as diferentes umidades de compactação com 0% de cal. Ao incorporar cal para a umidade de compactação ótima ( $w_{ót}=18\%$ ) ocorreu redução de PMI com o aumento do teor de cal. Para este solo observa-se que o teor ótimo de cal a ser misturado é 4%, que conduz a menores PMI, no entanto, quanto à resistência, são verificados menores valores que os obtidos para o teor de 2% de cal.

Comparando os diferentes tipos de solo, verifica-se que os latossolos apresentam menor PMI, sendo os resultados obtidos para os solos ZM e SF relativamente semelhantes.

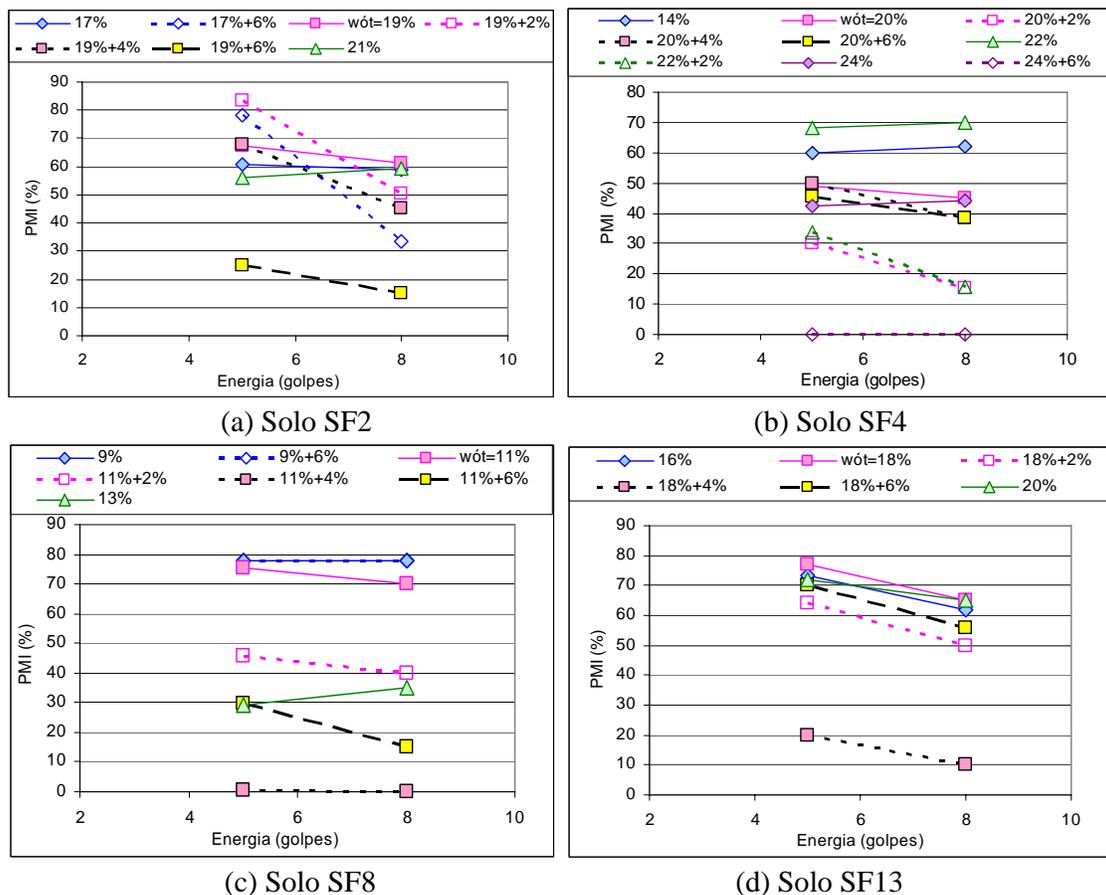


Figura 10.3 – PMI Obtidas para os Solos Saprólitos Com e Sem Estabilização Química.

## 11 – ENSAIO DE CAPILARIDADE OU ABSORÇÃO

Como já descrito no capítulo 3 (Materiais e Métodos), foi realizada uma adaptação do método de ensaio de Infiltrabilidade padronizado pela metodologia MCT, tendo-se por objetivo simular a situação de nível d'água em contato com a face inferior da sub-base do pavimento. Como a quantidade de amostras a serem ensaiadas era elevada e, ainda objetivando realizar medições de infiltração até que a amostra não mais absorvesse água, optou-se pelo uso simplificado de um molde de acrílico, em que foi compactado o corpo de prova a ser ensaiado, depositado diretamente sobre placa porosa (Figura 3.5). As verificações da infiltrabilidade ou absorção foram feitas por pesagem, sendo a síntese dos resultados apresentada na Tabela 11.1.

De acordo com Nogami & Villibor (1995) a infiltrabilidade é fenômeno freqüente nas camadas de solos envolvidas nas obras viárias e de pavimentação. No entanto, sua utilização prática apresenta sérias dificuldades, pois além da permeabilidade e tensão de sucção das camadas envolvidas, há de se considerar ainda as eventuais pressões hidrostáticas, que podem ser neutra, negativa ou positiva, dependendo das circunstâncias locais e da precipitação pluviométrica. Os autores afirmam ainda que, o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT é muito elementar e pouco preciso. No entanto, tendo em vista a verificação do comportamento hídrico geral para cada material, o procedimento aqui adotado atende, em princípio, aos objetivos estipulados.

As Figuras 11.1 a 11.3 mostram as curvas tempo *versus* variação de umidade devido à infiltração para alguns dos latossolos, horizontes mosqueados e saprólitos; apresentando-se os resultados de todos os solos estudados no anexo XIII conjuntamente as Figuras 11.1 a 11.6.

De modo geral é possível observar que a quantidade de água infiltrada diminui em função do tempo, até se aproximar ou atingir à linearidade. O ponto a partir do qual ocorre tendência à linearidade da curva, será aqui denominado de ponto de estabilização de umidade, citando-se ainda que tal ponto é variável com a condição de compactação, tipo de solo, permeabilidade, porosidade e distribuição dos poros e, portanto, com a forma da curva característica de retenção de água.

A Figura 11.1 mostra as curvas de infiltrabilidade obtidas para as diferentes condições de compactação a que é submetido o solo HB7. Na curva obtida para o ponto mais seco, o acréscimo de umidade se dá de forma aproximadamente constante após as primeiras 24 horas, em que se verifica crescimento de umidade da ordem de 0,25% ou 21% do total absorvido. A tendência à estabilização da umidade se dá apenas com 1176 horas (49 dias) ao atingir um

acrécimo total de 1,2% . Para as amostras compactadas na umidade ótima, observou-se um acréscimo de umidade total superior ao obtido para o ponto mais seco, este da ordem de 4,9%, e ainda, que este se dá em menor tempo (288h ou 12 dias). É importante ressaltar que, no decorrer do tempo total do ensaio, algumas pesagens indicaram perda e não ganho de umidade. Atribuí-se tal comportamento as variações climáticas (de temperatura) ocorridas nestes dias (27 a 29/março). Já para a amostra compactada no ponto mais úmido (32%), praticamente não são verificados acréscimos de umidade, ocorrendo à estabilização em 72 horas (3 dias). Sendo assim, o conjunto das curvas obtidas para esse solo compactado em diferentes teores de umidade sem a estabilização química aponta para a conclusão que, à medida que se acresce a umidade de compactação, o período em que ocorrem taxas constantes de elevação de umidade é menor. Essa conclusão não pode ser estendida para todos os latossolos. O HB12, por exemplo, apresenta tendência inversa a essa, cabendo destacar a presença marcante da illita nesse solo.

A incorporação da cal ao solo HB7 quando da compactação na umidade ótima provoca acréscimos totais de umidade diferenciados para os três teores considerados. Para 2% de cal a absorção é pequena (0,22% de umidade), estabilizando com 72 horas (3 dias); para 4% de cal verificam-se taxas mais elevadas e capacidade de infiltrabilidade atingindo 1,25% de umidade para 480 horas (20 dias), o que indica que a cal esta absorvendo mais água para que se desenvolvam as reações químicas e; para 6% de cal, nota-se similaridade entre as curvas e período de estabilização superior à curva de 4% de cal, embora se verifique capacidade total de absorção inferior (1,03% de umidade) a anterior. Observa-se assim que, em relação à infiltrabilidade o teor de cal ótimo seria 2% para o teor de umidade ótimo. Ao se verificar a PMI obtida para tal material, nota-se que ocorrem altas perdas, o que significa que em se tratando de lençol em contato com a superfície inferior do material compactado, este apresenta bom desempenho quanto ao acréscimo de umidade, ou seja, apresenta baixa permeabilidade, no entanto, trata-se de uma mistura altamente erodível quando totalmente submersa.

Já para o ramo úmido estabilizado com 2% e 6% de cal verifica-se comportamento similar ao observado para a umidade ótima, apresentando menor acréscimo de umidade para 2% (0,43% de umidade) e maior para 6% de cal (0,65% de acréscimo umidade).

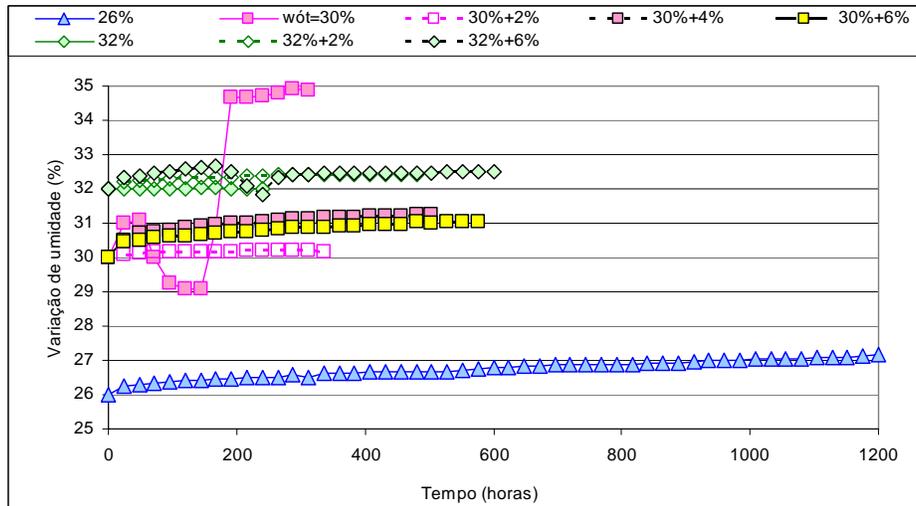


Figura 11.1 – Curva de Infiltrabilidade do Solo HB7 Natural e Estabilizado.

Para o solo HB9b (Figura 11.2) notam-se pequenas variações de umidade para todas as umidades e condições de compactação estudadas. É visível a similaridade entre as curvas com e sem estabilização com cal, separadas por umidade de compactação. Ao avaliar as curvas em termos de acréscimo total de umidade, ocorrem variações máximas da ordem de 0,17% de umidade, o que indica que este material tanto natural como estabilizado, compactado a teores de umidade iguais ao ótimo ou mesmo 2% acima do ótimo, possui bom comportamento hídrico, não havendo variações significativas de umidade em decorrência da absorção. Considerando os resultados obtidos de PMI verifica-se ainda que para o material estabilizado as perdas por imersão são menores, chegando apenas a faixa máxima de 14%, o que também indica um bom comportamento quanto à erodibilidade. Deve-se observar que com o crescimento da umidade de compactação, mais rapidamente a estabilização da capacidade de absorção é obtida, assim como ao se incorporar a cal, o período de estabilização varia de acordo com a umidade de compactação trabalhada. Tal comportamento é notável ao se incorporar 2% de cal e compactar o solo no teor de umidade ótimo, verifica-se que o tempo de estabilização é de 192 horas (8 dias); e, para 4% e 6% de cal, as curvas são praticamente iguais, atingindo a estabilização em 456 horas (20 dias). Ao considerar a mistura com a cal e a compactação do solo em teor de umidade superior ao ótimo, nota-se que para 2% de cal o tempo de estabilização é similar ao verificado para o material sem cal (264 horas ou 11 dias) e, para 4% de cal, cai para 168 horas (7 dias). Já para o teor de umidade de 32% ocorre menor período de estabilização da umidade para o maior teor de cal incorporada, o que indica que o

teor de cal mobilizou as reações químicas da mistura para a umidade de compactação trabalhada.

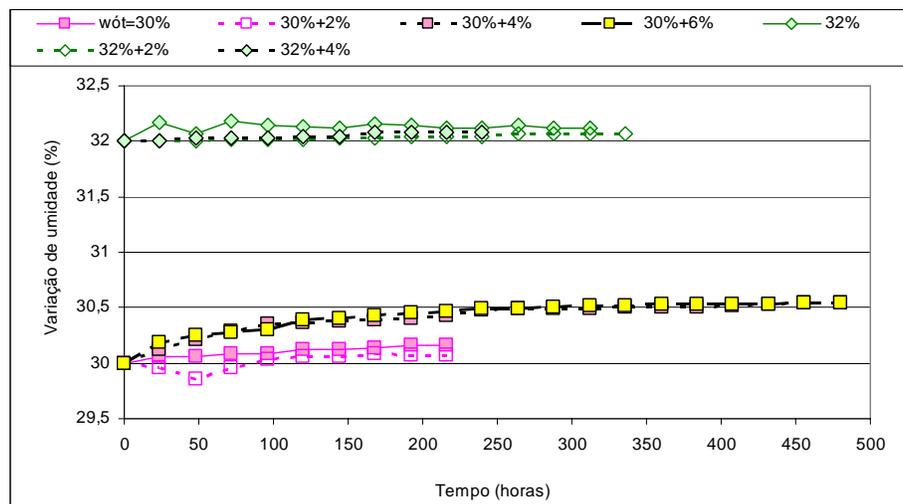


Figura 11.2 – Curva de Infiltrabilidade do Solo HB9b Natural e Estabilizado.

Para o solo HB10 (anexo XIII) inicialmente verifica-se o decréscimo da capacidade de absorção com o aumento da umidade de compactação, destacando-se que, para o ponto mais úmido (17%) o valor de absorção de umidade é semelhante ao obtido para o ponto de umidade ótima; assim como o tempo de estabilização decresce e se mantém entre 15,5% e 17,5%. Ao misturar 4% de cal para a umidade ótima de compactação (15,5%) nota-se queda no valor de absorção total, para 0,38%, e decréscimo no tempo de estabilização. Acrescendo-se a cal para 6%, o período de estabilização se mantém, mas, o percentual de umidade absorvida eleva para 2,50%. Sendo assim, pode-se afirmar que o teor ótimo de cal quanto ao comportamento hídrico seria 4%, no entanto, ao avaliar a queda da resistência com o processo de imersão (capítulo 8) verifica-se que os maiores valores de mini-CBR imersos são obtidos para o teor de 6% de cal, o que não se verifica ao se estudar o material não saturado. Portanto, conclui-se que, dependendo da situação em que se deseje trabalhar, o teor de cal ótimo é variável. Já em relação ao menor teor de umidade, verifica-se que a incorporação de 6% de cal gerou também acréscimo do total de água absorvida (de 1,1% para 1,6%) e queda do tempo de estabilização; comportamento contrário ao observado para o ponto mais úmido.

Para o solo HB11 (anexo XIII) nota-se a ocorrência da maior parte da absorção de 24 h a 72 h para a maioria das curvas obtidas, no entanto, a capacidade de absorção mais elevada é verificada para o ponto mais seco (2,18% de umidade), este estabilizando em período de

tempo igual a 72 horas (4 dias). Para este solo nota-se crescimento da umidade absorvida e do respectivo tempo de estabilização (de 288h para 360h) ao se incorporar 6% de cal para a mistura compactada a 15% de umidade (ponto mais seco); o que recai na idéia da não mobilização total das reações químicas. Já para o teor de umidade ótimo nota-se que a incorporação da cal causa redução da capacidade de absorção total de água e ainda do tempo de estabilização, apresentando menores valores para o teor de 4% de cal (0,58% de umidade e tempo de estabilização igual a 336 horas). Ao verificar aos resultados obtidos de PMI e variação de resistência com a estabilização nota-se que não ocorrem PMI exceto para os pontos em que a umidade de compactação seja superior à ótima e a resistência imersa obtida para a amostra compactada no teor de umidade ótimo apresenta melhores valores de mini-CBR que os apresentados para os demais teores. Portanto, para a umidade ótima, o teor ótimo de cal ao se considerar a situação imersa é o de 4%.

Para o solo HB12 (anexo XIII) são verificados os mais baixos percentuais de umidade absorvida para os corpos de prova compactados no teor de umidade ótima com e sem estabilização química. Valores estes que atingem apenas 0,40% de umidade máxima absorvida. Comportamento este confirmado pelos resultados de variação de resistência com a estabilização química, uma vez que os maiores valores de mini-CBR obtidos para a amostra submetida à imersão, são referentes aos corpos-de-prova compactados na umidade ótima. Dentre estes pontos verifica-se que a mistura com 4% de cal gerou acréscimo de umidade e de tempo de estabilização e que, ao se trabalhar com 6% de cal reduzem-se tais parâmetros. Quanto aos demais teores de umidade, são muito mais notáveis os acréscimos de umidade total absorvida, mas, quanto ao tempo de estabilização, a mistura com cal ocasiona acréscimo para a menor umidade de compactação e queda para a maior umidade de compactação, apresentando o maior crescimento de umidade absorvida verificada dentre os latossolos (5,28% de acréscimo de umidade). Então, pode-se afirmar que para este solo é ideal se trabalhar com o teor de umidade de compactação ótimo estabilizado com 4% a 6% de cal, pois apresenta melhor comportamento quanto à capacidade de absorção máxima, menor PMI e melhores resistências com a estabilização.

As curvas obtidas para o solo HBR1 (anexo XIII) mostram decréscimo de umidade, para os pontos compactados no teor de umidade ótima. Tal comportamento foi observado para o solo natural a partir de 408 horas (17 dias) de ensaio e, ainda verificado no decorrer de todo o tempo de ensaio para o teor de 2% de cal na mistura. Observa-se que apesar de ter absorvido 0,59% de umidade, o solo natural não recupera tal percentual de água após sofrer secagem, no entanto, se aproxima da umidade de compactação inicial. Já para a mistura, esta perde

aproximadamente 0,47% de umidade, estabilizando para período igual a 312 horas (13 dias). Já para o teor de umidade de 26% (ponto mais úmido) nota-se decréscimo de água absorvida (para 0,21% de umidade) e redução do tempo de estabilização para 120 horas (5 dias). Ao verificar a PMI e a variação de resistência, determina-se como teor ótimo de cal 4%.

Para o solo HBR2 (anexo XIII), os resultados mostram que é na umidade ótima que se obtém maior percentual de infiltrabilidade (2,57%) para o material sem estabilização. Já para a mistura com 3% e 6% de cal verifica-se decréscimo de absorção de umidade e aumento do tempo de estabilização, não se verificando diferenças consideráveis entre os teores de 4% e 6% de cal. Já para o solo compactado no menor teor de umidade de compactação há acréscimo de capacidade de absorção e tempo de estabilização da umidade ao se incorporar 6% de cal, passando de 0,41% absorvido em 432 horas (18 dias) para 2,01% absorvido em 912 horas (38 dias). E finalmente, para o maior teor de umidade de compactação observa-se a perda de umidade para o material sem cal, esta totalizando 2,51% de perda de umidade e estabilizando para 456 horas (19 dias). Ao se misturar cal, verifica-se acréscimo de umidade até 72 horas (cerca de 0,47% de umidade) e posterior secagem. No entanto, no balanço total de umidade ao fim do ensaio, ainda se têm ganho de umidade de 0,41% para 3% de cal incorporada. Para 6% de cal, ocorre decréscimo de umidade absorvida (para 0,12%) e de período de estabilização para 120 horas (5 dias). O conjunto de resultados mostra que, de forma similar ao solo HBR1, a melhor condição de compactação quanto à resistência, PMI e absorção é a compactação no teor de umidade ótimo, usando-se 6% de cal para estabilizar quimicamente.

A Tabela 11.1 vêm sintetizar os resultados de todos os solos estudados. Para os latossolos verifica-se que a absorção foi pequena. Ao adicionar cal, praticamente não houve modificação na absorção.

Para o solo ZM3 (Figura 11.3(a)) verificam-se maiores percentuais de variação de umidade para 21%, chegando a crescer 0,78% de umidade para as primeiras 72 horas (3 dias). Após este período a umidade tende a decrescer apresentando valor final um pouco mais baixo que a umidade de compactação inicial, com tempo de estabilização de 288 horas (12 dias). Com a estabilização química verificam-se decréscimo de variação na umidade com o aumento do teor de cal, os valores variando de 0,39% a 0,05%. Para o maior teor de umidade de compactação, o percentual (0,73%) de acréscimo de umidade se aproxima do obtido para o solo compactado com 21%, no entanto, para esta umidade não ocorreram pontos de secagem e, o material estabilizou com 192 horas (8 dias). Utilizando-se 6% de cal para a mistura, nota-se crescimento de umidade apenas para as primeiras 24 horas e, posterior decréscimo até

estabilizar com 288 horas (12 dias), apresentando umidade de aproximadamente 22,5%. Baseando-se no conjunto de informações referentes à PMI, resistência e absorção conclui-se que a umidade de compactação ótima é a ideal, desde que o material seja estabilizado com 4% de cal. Cabe destacar que o solo ZM3 é muito quartzoso.

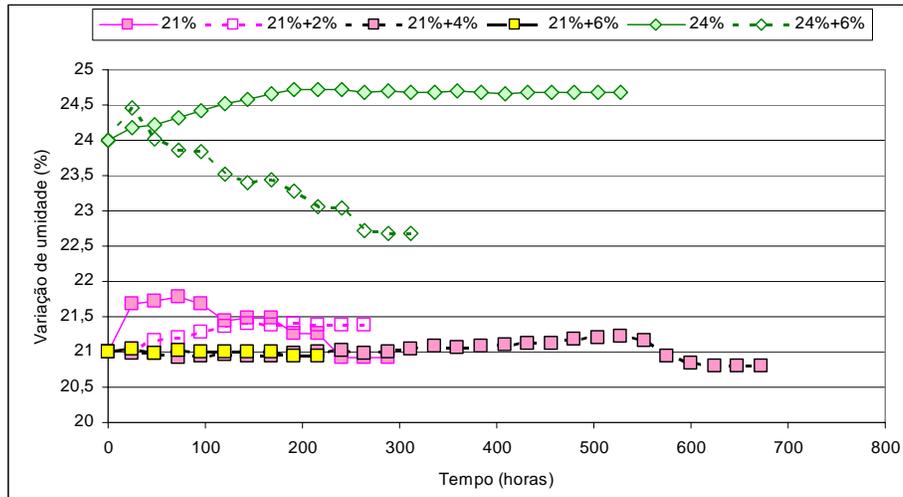


Figura 11.3 – Curva de Infiltrabilidade do Solo ZM3 Natural e Estabilizado.

Para o solo ZM6 (Figura 11.4) verificam-se maiores percentuais de variação de umidade para 17% de umidade de compactação. A variação de umidade chega a 8,17%, estabilizando após 96 horas (4 dias). Ao incorporar cal ao solo compactado na umidade ótima, verifica-se elevação do percentual de água absorvida, este variando de 3,11% para 6% de cal a 4,27% para 4% de cal. Já para o teor de umidade de compactação mais elevado, a mistura com 6% de cal gera decréscimo de variação de umidade (de 4,59% para 2,79%), embora o tempo de estabilização (288 horas ou 12 dias) se mantenha. Com base nestes dados, são nítidas as variações superiores a 2%, muito embora ao se avaliar o conjunto de resultados de PMI, resistência e absorção, nota-se que a condição ideal de compactação é o teor de umidade ótimo com o solo estabilizado com 6% de cal. Esses solos apresentam maior absorção que os latossolos, sendo que a maior parte dela ocorreu em 24 horas.

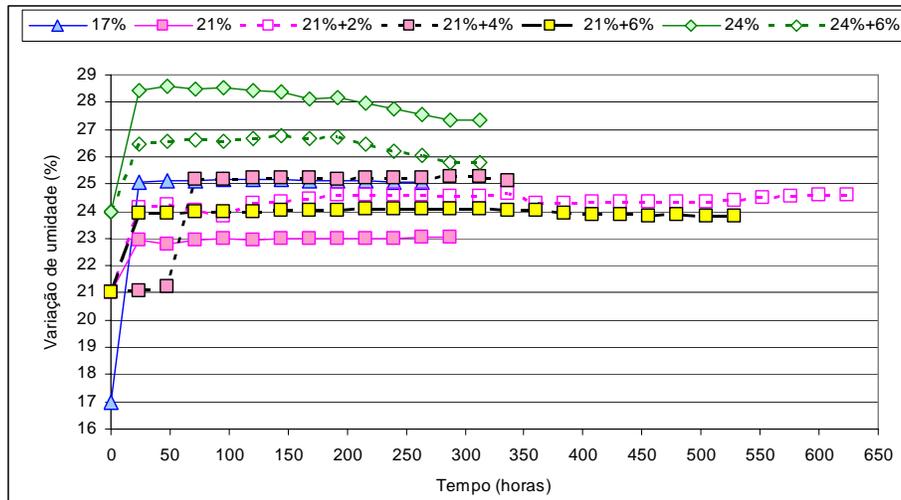


Figura 11.4 – Curva de Infiltrabilidade do Solo ZM6 Natural e Estabilizado.

Para o solo SF2 (Figura 11.5) verificam-se para o solo no estado natural, maiores percentuais de variação de umidade para a condição ótima. Na umidade ótima sem cal, o ganho de umidade chega a 10,46% em 96 horas (4 dias); teor este que é acrescido ao se incorporar 2% de cal, chegando a atingir 22% em 144 horas (6 dias). Já para 4% de cal verifica-se inicialmente pequena queda de umidade e posterior acréscimo com elevação de 0,96% na umidade. Observa-se assim, redução significativa da variação de umidade em relação a 2% de cal incorporada. No entanto cabe destacar que, ocorreu alguma perda de umidade antes que se desse à estabilização em 792 horas (33 dias). Nesse, como em outros casos, em que o fenômeno foi observado, trata-se provavelmente de equilíbrio com as condições climáticas do laboratório (temperatura e umidade relativa) variáveis ao longo do tempo. Elevando ainda mais o teor de cal, para 6%, a capacidade de absorção eleva para 1,45% de umidade, demonstrando que, quanto à absorção, o teor adequado de cal é 4%, o que não se verifica quanto à resistência (maiores valores para o teor de 6% de cal) e a PMI (não há PMI para 6% de cal); o que aponta para a pequena importância da diferença de umidade absorvida entre as misturas com 4% e 6% de cal. Estudando-se a incorporação de cal para o ponto mais seco, verifica-se decréscimo de capacidade de absorção assim como de tempo de estabilização. Comportamento contrário pode ser observado para o ponto mais úmido com cal incorporada, apresentando crescimento de capacidade de absorção e decréscimo de tempo de estabilização.

O comportamento desse solo ilustra bem a importância de se analisar o comportamento do solo considerando-se o conjunto de resultados. Sabe-se que no ramo seco os solos pouco

intemperizados apresentam tendência à floculação e que, o solo quando umedecido forma grumos tanto mais difíceis de serem desfeitos, quanto menor for à umidade de compactação. Com isso, têm-se no ramo seco a formação de macroporos e a redução da absorção. Esse mecanismo pode explicar o comportamento distinto dos ramos seco e úmido em relação à condição ótima.

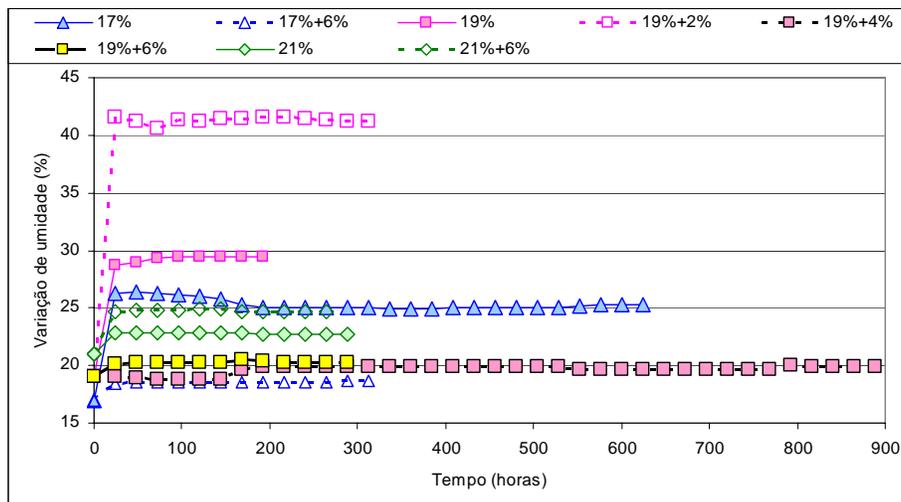


Figura 11.5 – Curva de Infiltrabilidade do Solo SF2 Natural e Estabilizado.

Para o solo SF4 (Figura 11.6) no estado natural, se verifica que a capacidade total de absorção de água é máxima no ponto mais seco (variação de 6,70%) e mínima para o solo compactado na umidade ótima (variação de 0,70%). Nota-se que a elevação da capacidade de absorção de água entre os corpos de prova compactados na umidade ótima, em relação aos compactados no ramo úmido, representam quase uma constante em todos os tipos de solo estudados nesta pesquisa. Quanto à estabilização química com diferentes teores de cal observa-se que para o teor de umidade ótimo, para a mistura com 2% de cal ocorre queda de capacidade de absorção, atingindo 0,51% em 168 horas (7 dias) e, ao acrescer o teor de cal ocorre acréscimo de absorção para 1,80% de umidade em 504 horas (21 dias), para 4% de cal, e, acréscimo de 14,86% de umidade em 72 horas (4 dias) para 6% de cal. Sendo assim, em relação à capacidade de absorção para o teor de umidade de compactação ótimo, o percentual de cal ideal é 2%, o que se confirma através de menor PMI e maiores valores de resistência. Já para a estabilização do material compactado no ponto mais seco com 6% de cal, nota-se que a capacidade de absorção cai de 6,7% de umidade (com 0% de cal) para 5,56% de umidade (para 6% de cal). É interessante observar que apesar da capacidade de absorção se

apresentar superior a verificada para a umidade ótima (mistura com 2% de cal), o valor de mini-CBR imerso é superior, o que indica que dependendo do teor de umidade de compactação usado, variações relativamente altas de capacidade de absorção não influem significativamente na resistência a penetração. Em relação a tempo de estabilização, o comportamento é similar ao já descrito para o solo compactado na umidade ótima com o material estabilizado com 4% de cal ( $w_c=20\%+4\%$ ).

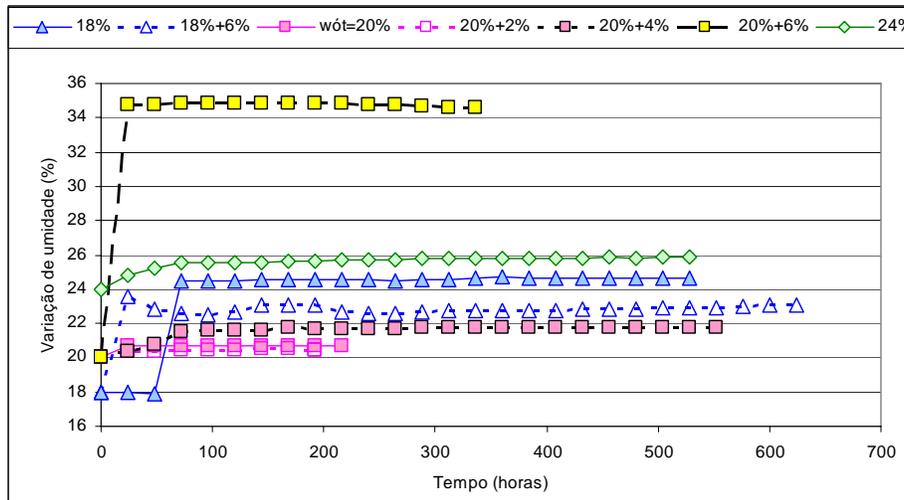


Figura 11.6 – Curva de Infiltrabilidade do Solo SF4 Natural e Estabilizado.

Para o solo saprolítico SF8 (anexo XIII) não se verificam variações de umidade superiores a 2%. Para os materiais compactados sem cal incorporada verifica-se comportamento similar ao dos demais solos quanto à variabilidade da capacidade de absorção. Para o teor de umidade ótimo de compactação verifica-se acréscimo de capacidade de absorção e de tempo de estabilização para a mistura com 2% de cal. Já para 4% e 6% ocorre decréscimo desta capacidade mantendo-se o tempo de estabilização. É importante observar que as variações de umidade para os diferentes teores de cal não ultrapassam 1,2%. Avaliando em relação ao conjunto de resultados têm-se a determinação de diferentes teores ótimos de cal, sendo 2% para garantir maior resistência, 4% para se obter menor PMI e, 6% para se obter menor capacidade de absorção. Para o material mais úmido e estabilizado com 6% de cal ocorre decréscimo de umidade total absorvida, de 1,29% de umidade para 0,35%, mantendo-se o tempo de estabilização. Comportamento diferenciado é verificado para o ponto mais seco estabilizado com 6% em que se verifica pequeno acréscimo de capacidade de absorção com decréscimo do período de estabilização.

Para o solo SF13 (anexo XIII) se verifica acréscimo considerável de teor de água absorvida entre os pontos correspondentes a menor umidade (2,34% de acréscimo de umidade) e a umidade ótima (2,02% de acréscimo de umidade) e o ponto mais úmido (6,64% de acréscimo de umidade) e, elevação do tempo de estabilização com o aumento da umidade de compactação. Já para a estabilização com cal dos pontos compactados no teor de umidade ótimo, verifica-se acréscimo para 2% e posterior decréscimo para 6% de cal incorporada. Avaliando-se a junção de resultados obtidos para capacidade de absorção, PMI e resistência, conclui-se que o teor de cal ótimo é o 6% em termos de absorção e resistência e, 4% para PMI.

Os resultados apresentados mostram que a absorção nos latossolos é inferior a registrada para o solo ZM6 e para os solos saprolíticos finos (SF). A natureza quartzosa do solo ZM3 faz com que ele apresente menor absorção que o ZM6 e valor semelhante aos obtidos para os latossolos. A absorção depende das propriedades do solo, da alteração estrutural e química imposta pela cal ao solo, da estrutura gerada em conformidade com a umidade de compactação. A absorção pode ainda ser associada à distribuição de poros e a forma da curva característica. Ela depende finalmente das condições ambientais como temperatura e umidade relativa, sendo esses fatos os responsáveis por eventuais reduções na umidade inicial ou oscilações durante o ensaio.

Tabela 11.1 - Resumo de Infiltrabilidade em Variação de Umidade.

| Solo | wc (%) | % cal | tempo (h) | wf (%) |
|------|--------|-------|-----------|--------|
| HB7  | 26     | 0     | 1200      | 27,18  |
| HB7  | 30     | 0     | 288       | 34,93  |
| HB7  | 30     | 2     | 240       | 30,21  |
|      |        |       | 288       | 30,19  |
| HB7  | 30     | 4     | 480       | 31,25  |
| HB7  | 30     | 6     | 480       | 31,03  |
| HB7  | 32     | 0     | 72        | 32,01  |
| HB7  | 32     | 2     | 456       | 32,43  |
|      |        |       | 168       | 32,65  |
|      |        |       | 600       | 32,48  |
| HB9b | 30     | 0     | 192       | 30,16  |
| HB9b | 30     | 2     | 192       | 30,08  |
| HB9b | 30     | 4     | 456       | 30,54  |
| HB9b | 30     | 6     | 456       | 30,54  |
| HB9b | 32     | 0     | 72        | 32,18  |
|      |        |       | 312       | 32,12  |
| HB9b | 32     | 2     | 264       | 32,07  |
| HB9b | 32     | 4     | 168       | 32,09  |
| HB10 | 13     | 0     | 1008      | 14,11  |
| HB10 | 13     | 6     | 120       | 14,6   |
|      |        |       | 144       | 14,49  |
|      |        |       | 528       | 16,32  |
| HB10 | 15,5   | 0     | 96        | 15,88  |
| HB10 | 15,5   | 4     | 96        | 18     |
| HB10 | 17,5   | 0     | 624       | 18,41  |
|      |        |       | 888       | 18,17  |
| HB10 | 17,5   | 6     | 648       | 18,14  |
| HB11 | 15     | 0     | 288       | 16,15  |
|      |        |       | 480       | 16,14  |
|      |        |       | 360       | 16,46  |
| HB11 | 15     | 6     | 456       | 16,38  |
|      |        |       | 480       | 17,12  |
| HB11 | 17     | 0     | 552       | 17,1   |
|      |        |       | 528       | 19,18  |
| HB11 | 17     | 4     | 336       | 17,59  |
|      |        |       | 384       | 17,56  |
| HB11 | 17     | 6     | 240       | 18,67  |
| HB12 | 26,5   | 0     | 240       | 27,09  |
| HB12 | 26,5   | 6     | 648       | 28,70  |
| HB12 | 29     | 0     | 336       | 29,25  |
| HB12 | 29     | 4     | 432       | 29,40  |
|      |        |       | 888       | 29,33  |
| HB12 | 29     | 6     | 144       | 29,14  |
| HB12 | 32     | 0     | 696       | 32,96  |
| HB12 | 32     | 6     | 264       | 37,26  |
| HBR1 | 26     | 0     | 432       | 26,41  |
| HBR1 | 26,4   | 6     | 912       | 28,40  |
| HBR1 | 30     | 0     | 288       | 32,57  |
| HBR1 | 30,1   | 3     | 408       | 30,22  |
| HBR1 | 30,4   | 6     | 384       | 30,54  |
| HBR1 | 32     | 0     | 240       | 29,49  |
|      |        |       | 456       | 30,08  |
| HBR1 | 32,1   | 3     | 72        | 32,57  |
|      |        |       | 264       | 32,47  |
| HBR1 | 32,4   | 6     | 120       | 32,52  |
| HBR2 | 24     | 0     | 168       | 24,59  |
|      |        |       | 840       | 23,60  |
| HBR2 | 24     | 2     | 312       | 23,53  |
| HBR2 | 26     | 0     | 120       | 26,21  |
|      |        |       | 192       | 26,15  |
| ZM3  | 21     | 0     | 72        | 21,78  |
| ZM3  | 21     | 0     | 164       | 20,93  |
|      |        |       | 144       | 21,39  |
| ZM3  | 21     | 2     | 216       | 21,38  |
|      |        |       | 216       | 21,38  |
| ZM3  | 21     | 4     | 528       | 21,23  |
|      |        |       | 648       | 20,81  |
| ZM3  | 21     | 6     | 24        | 21,05  |
|      |        |       | 192       | 20,94  |
| ZM3  | 24     | 0     | 192       | 24,73  |
|      |        |       | 504       | 24,68  |
| ZM3  | 24     | 6     | 24        | 24,45  |
|      |        |       | 288       | 22,69  |
| ZM6  | 17     | 0     | 96        | 25,17  |
|      |        |       | 168       | 25,10  |
| ZM6  | 21     | 0     | 264       | 23,02  |
| ZM6  | 21     | 2     | 600       | 24,62  |
| ZM6  | 21     | 4     | 288       | 25,27  |
| ZM6  | 21     | 6     | 288       | 24,11  |
|      |        |       | 504       | 23,81  |
| ZM6  | 24     | 0     | 48        | 28,59  |
|      |        |       | 288       | 27,34  |
| ZM6  | 24     | 6     | 144       | 26,79  |
|      |        |       | 288       | 25,77  |
| SF2  | 17     | 0     | 24        | 26,32  |
|      |        |       | 600       | 25,28  |
| SF2  | 17     | 6     | 288       | 18,61  |
| SF2  | 19     | 0     | 168       | 29,46  |
| SF2  | 19     | 2     | 144       | 41,5   |
| SF2  | 19     | 4     | 816       | 19,95  |
| SF2  | 19     | 6     | 168       | 20,45  |
|      |        |       | 264       | 20,30  |
| SF2  | 21     | 0     | 168       | 22,88  |
|      |        |       | 192       | 22,70  |
| SF2  | 21     | 6     | 120       | 24,89  |
|      |        |       | 240       | 24,62  |
| SF4  | 18     | 0     | 360       | 24,70  |
| SF4  | 18     | 6     | 24        | 23,56  |
|      |        |       | 600       | 23,06  |
| SF4  | 20     | 0     | 96        | 20,70  |
|      |        |       | 192       | 20,66  |
| SF4  | 20     | 2     | 168       | 20,51  |
|      |        |       | 192       | 20,48  |
| SF4  | 20     | 4     | 504       | 21,79  |
| SF4  | 20     | 6     | 72        | 34,81  |
|      |        |       | 312       | 34,61  |
| SF4  | 24     | 0     | 504       | 25,86  |
| SF8  | 9      | 0     | 24        | 9,88   |
|      |        |       | 480       | 7,35   |
| SF8  | 9      | 6     | 120       | 10,00  |
|      |        |       | 216       | 9,88   |
| SF8  | 11     | 0     | 240       | 12,38  |
| SF8  | 11     | 2     | 96        | 13,03  |
|      |        |       | 264       | 12,92  |
| SF8  | 11     | 4     | 264       | 12,35  |
| SF8  | 11     | 6     | 168       | 11,80  |
|      |        |       | 240       | 11,76  |
| SF8  | 13     | 0     | 408       | 14,29  |
|      |        |       | 600       | 13,89  |
| SF8  | 13     | 6     | 24        | 13,35  |
|      |        |       | 624       | 10,92  |
| SF13 | 16     | 0     | 240       | 18,34  |
| SF13 | 18     | 0     | 48        | 20,02  |
|      |        |       | 264       | 19,85  |
| SF13 | 18     | 2     | 240       | 22,70  |
| SF13 | 18     | 6     | 288       | 21,94  |
| SF13 | 20     | 0     | 168       | 26,64  |
|      |        |       | 456       | 26,08  |

\* período de estabilização

## 12 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 12.1 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e nas análises realizadas, conclui-se que:

1. O índice de vazios ( $e$ ) e a porosidade ( $\eta$ ) são, em média, maiores nos latossolos (HB) que nos horizontes mosqueados (ZM) e saprolíticos (SF). Este comportamento é explicado por Cardoso (1995) e Araki (1997), em função do elevado teor de  $Al^{+3}$ , que ocorre com o aumento do grau de intemperismo.
2. O índice de atividade de Skempton indicou os latossolos (HB) como solos inativos, enquanto que os outros horizontes, mosqueados (ZM) e saprolíticos (SF), na sua maioria são solos ativos. A baixa atividade dos solos sendo explicada pela predominância da caulinita e ausência de argilominerais do tipo montmorilonita e, outros de maior atividade.
3. Avaliando-se os limites de Atterberg em relação aos parâmetros físicos (densidade dos grãos ( $G$ ), índice de vazios ( $e$ ) e umidade natural ( $w_n$ )) verificou-se que o limite de plasticidade ( $w_p$ ) apresenta uma melhor relação com os mesmos.

A relação da densidade dos grãos com o limite de plasticidade gerou comportamentos diferenciados de acordo com o grau de intemperismo do material. Nos solos saprolíticos (SF), o limite de plasticidade ( $w_p$ ) cresce com o aumento do  $G$  e, nos solos HB ocorre o inverso. Esta redução do  $w_p$  com o  $G$  para os solos HB, deixa claro que os dois fatores, poros internos e presença do ferro, interferem na plasticidade, cabendo lembrar ainda que a presença dos óxi-hidróxidos de alumínio é traço comum aos solos profundamente intemperizados e que também contribuem para a agregação dos solos. Observou-se ainda que, quanto maior o índice de vazios, maior o limite de plasticidade.

Ao refazer os limites de liquidez ( $w_l$ ) e plasticidade ( $w_p$ ) considerando o material estabilizado com 2% e 6% de cal, observaram-se comportamentos diferenciados para um mesmo grupo de solo, entre os três grupos de solos estudados e ainda, ao se variar o teor de cal. Conclui-se então que, além do comportamento agregador/desagregador ocasionado pela cal, os aspectos físico-químicos e mineralógicos têm grande influência nos limites atterberg.

Sendo assim, o comportamento de queda do índice de plasticidade (IP) com a cal incorporada, muito difundido na literatura, não é uma verdade absoluta para qualquer tipo de solo tropical.

**4.** Os resultados obtidos quando da incorporação da cal deixaram claro que considerar a cal como agente agregador do solo ou redutor de plasticidade não é apropriado para os solos tropicais característicos do DF. É importante observar que, ao comparar os resultados da plasticidade ( $w_L$  e IP) aos mineralógicos, verificou-se que nos latossolos (solos ricos em óxi-hidróxidos de ferro e alumínio) ocorrem aumentos e reduções com o crescimento do teor de cal, apontando para a influência da agregação gerada por esses compostos químicos nos solos naturais. Nos solos pertencentes à zona mosqueada (ZM) e os saprolíticos (SF), a influência é marcada de modo predominante pela mineralogia, não ocorrendo interferência da agregação. Neles,  $w_L$  e  $w_P$  aumentam com a ampliação da incorporação de cal.

**5.** Realizadas análises granulométricas com (CD) e sem defloculante (SD) observou-se que nos latossolos (HB) grande parte da argila está sob a forma de agregados. Nos solos mais argilosos, os agregados são distribuídos nas frações areia e silte, enquanto que nos solos arenosos, se apresentam sob o tamanho silte. Nos outros solos, ou seja, horizonte mosqueado (ZM) e saprolítico (SF), a presença de agregados foi importante apenas para os solos ZM5, ZM6, SF1, SF4, enquanto nos demais, as partículas de argila mostram-se dispersas. Cardoso (2002) mostrou, ao estudar os mesmos solos, que a formação de agregados é função do elevado teor de  $Al^{3+}$  e dos óxi-hidróxidos de Fe cristalinos dispersos na matriz e de baixa cristalinidade (amorfos e paracristalinos). Ou seja, segundo o autor, quanto maior a concentração de um destes componentes, maior é a formação de agregados nos solos. Este fenômeno seria o principal responsável pelo elevado índice de vazios ( $e$ ) nos solos finos, que cresce de acordo com o teor da fração argila.

**6.** Os solos estudados são todos ácidos, o que de acordo com Cardoso (2002) facilita a agregação. No entanto, o comportamento mecânico dos materiais mostrou que a consideração apenas do pH como indicador de tendência à agregação não resulta em resultados positivos para os solos compactados. O conjunto de resultados referentes ao comportamento mecânico dos solos compactados mostrou que é necessária a consideração do potencial hidrogeniônico (pH) conjuntamente a capacidade de troca catiônica (CTC), para que se entenda o comportamento dos solos. No entanto, observou-se ainda que, estes dois parâmetros dificilmente influem igualmente na determinação do comportamento mecânico dos solos

o que gera a problemática de se definir qual dos parâmetros tem a maior influência na determinação dos comportamentos.

**7.** A determinação do teor de cal ótimo para estabilizar os solos, de acordo com o método de Eades e Grim, não é tão eficaz na previsão do comportamento dos solos tropicais estabilizados e compactados.

**8.** É essencial o estudo microscópico dos solos compactados, conjuntamente a análise granulométrica (com e sem o uso do defloculante) para que se entenda o comportamento mecânico dos materiais. Tais análises ganham destaque ao se trabalhar com solo estabilizado com cal, observando-se que neste caso, há de se considerar diferentes tempos de cura para a execução da análise granulométrica.

**9.** Com relação à determinação das curvas de mini-compactação observou-se que:

(a) os parâmetros ótimos obtidos para os latossolos (HB) apresentaram valores superiores de teor de umidade ótima ( $w_{ót}$ ) que os verificados para os solos pertencentes à zona mosqueada (ZM) e os saprolíticos (SF). Tal comportamento está ligado ao teor de argila presente nos materiais, fato este comprovado por valores de  $w_{ót}$  próximas para os maiores teores de argila, o que se verifica em todos os horizontes de solos estudados.

(b) o conjunto de curvas obtidas mostrou que, não é apenas a textura que condiciona o comportamento dos solos, havendo outros fatores, tais como a mineralogia e a forma da organização estrutural.

(c) com o aumento da energia (N), as diferentes reações causadas pela incorporação da cal em composições mineralógicas e granulométricas diferenciadas, tendem a ser amenizadas, resultando assim na tendência geral de queda de peso específico seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) e acréscimo de umidade ótima ( $w_{ót}$ ). Tal comportamento está mais evidente nos latossolos (HB), o que conduz a afirmação que para energias mais baixas as diferenças de reações com a cal se fazem notar mais claramente.

**10.** Com relação às curvas características obtidas para as amostras indeformadas, observou-se que:

(a) foram obtidas curvas características distintas. Nos solos HB9b, HB10, HB11, ZM3 foi visualizada distribuição de poros bimodais e, tendência à homogeneidade para os solos HB12 e ZM6. Já a curva do solo HB7 apresentou distribuição de poros trimodal.

(b) as curvas obtidas para os solos saprolíticos (SF), indicam uma boa distribuição de poros. No entanto, ocorreram diferenças significativas entre as curvas dos solos SF2 e SF13. Estas, provavelmente decorrentes da textura dos solos determinada com defloculante; uma vez que, química e mineralogicamente os solos são similares.

(c) analisando comparativamente a totalidade das curvas, evidenciou-se o risco da definição da curva característica com base apenas na textura, esta devendo ser restrita apenas ao campo da estimativa.

**11.** Com relação às curvas características obtidas para as amostras compactadas na energia Proctor Normal (PN), observou-se que:

(a) para as curvas dos latossolos compactados na umidade ótima (w<sub>ót</sub>), a distribuição de poros bimodal persiste para os solos HB10, HB11 e HBR1, desaparecendo no solo HB7. Nos demais latossolos, as curvas assumem uma distribuição de poros mais homogênea. De modo geral, para esses solos observa-se redução da macroporosidade com o processo de compactação, no entanto, quando a origem da macroporosidade é textural, esse aspecto bimodal subsiste para baixas umidades de compactação (ramo seco).

(b) para os solos ZM e SF não há similaridade entre as curvas características compactadas na umidade ótima (w<sub>ót</sub>) do PN. Para os solos ZM6 e ZM3 as curvas apresentam forma bimodal, esclarecendo-se que, para o solo ZM3, os processos de secagem, destorroamento, reumidificação e compactação, geraram a macroporosidade. Destaca-se ainda que, o grande teor de quartzo presente nesse solo pode ser responsável pelo comportamento. Já para os solos SF, para grau de saturação menor que 10%, as curvas dos solos SF2, SF4 e SF8 apresentam comportamento único.

(c) para curvas características compactadas no ramo seco e no úmido do PN verificou-se que, dependendo do tipo de solo e da umidade de compactação usada, pode ser preservada a macroporosidade. E ainda que, as distinções entre as curvas se encontram diretamente relacionadas à junção dos aspectos texturais, mineralógicos, químicos e estruturais.

(d) ao incorporar cal (para a w<sub>ót</sub>) aos latossolos estudados, as curvas (exceto o solo HB7), apresentam semelhança entre os solos naturais e estabilizados, ao se considerar o domínio dos microporos. No domínio dos macroporos, as curvas se distinguem, principalmente quando ocorrem variações significativas de peso específico entre o material natural e o estabilizado. Portanto, nestes solos, aparentemente a influência da estabilização química com cal sobre a forma da curva característica se deve a alteração da macroporosidade, por efeito da ação

química da cal. A forma como se dá à alteração da curva característica depende de como ocorre à intervenção da cal na interação entre partículas, agregando-as ou desagregando-as.

De forma geral é notável que, à medida que a cal é incorporada aos latossolos, à forma das curvas características tende a retornar a bimodalidade, sendo este comportamento em alguns solos bem mais nítido. Tais observações conduzem à idéia de que a distribuição de poros e a própria porosidade seria o principal agente definidor da posição das curvas características desses solos quando da estabilização com cal.

(e) ao incorporar cal (para a wót) aos solos pertencentes à zona mosqueada (ZM), as curvas obtidas mostram comportamento distinto dos latossolos (solos HB). Para o solo ZM3 ocorre melhor comportamento no estado indeformado do que no compactado e, ainda que ao se processar a compactação ocorre, para saturação inferior a 40%, acréscimo da sucção ao se passar de 2% para 6% de cal. Tal comportamento indica que a floculação não foi suficiente para que a estruturação destes materiais se aproximasse da obtida para a organização do solo em estado natural. Para o solo ZM6 a curva obtida para a amostra compactada com 0% de cal apresenta valores de sucção superiores aos demais. Ao se incorporar 2% de cal há comportamento agregador, passando a desagregação para 6% de cal.

(f) ao incorporar cal (para a umidade ótima) aos solos saprolíticos (SF), as curvas obtidas para os solos SF2 e SF8 apresentam tendência comportamental semelhante para os diferentes teores de cal. Já para os solos SF13 e SF4, os comportamentos das curvas se assemelham as do solo HB7, onde se verifica o papel floculador da cal. De forma geral, pode-se afirmar que as formas das curvas características dos saprólitos estudados mostram-se pouco sensíveis à estabilização com a cal.

**12.** Com relação às curvas características obtidas para a energia PI, de modo geral, ocorre coincidência entre as curvas obtidas para saturações ( $S_r$ ) inferiores a 50%, o que dá a idéia que, após a desestruturação do solo com a compactação é a natureza química e mineralógica do solo que prevalece em detrimento da porosidade, ou seja, o índice de vazios ( $e$ ) passa a assumir menor importância. No solo mais intemperizado, o aumento da energia de compactação ( $N$ ) diminui a macroporosidade, enquanto nos solos menos intemperizados, interfere na estrutura e, por consequência, nos mecanismos de expansão/retração do solo.

**13.** Com relação às curvas características obtidas variando-se o tempo de estabilização e a trajetória de execução, observou-se que:

(a) as curvas obtidas mostram que tanto para a trajetória de umedecimento (TU) como para a mista (TM), o tempo de cura afeta a forma da curva característica.

(b) para os diferentes tempos de cura (15 e 30 dias), os valores de sucção variaram com o tipo de solo e com a trajetória em que foi determinada a curva característica, portanto, a consideração da trajetória de umedecimento necessariamente não conduz a minimização dos valores de sucção.

(c) ao estudar o efeito da trajetória de execução na forma da curva característica observou-se que, a histerese parece depender do nível de intemperização pelo qual passou o solo.

**14.** Com relação à variação da sucção com o índice de vazios para diferentes energias e umidades de compactação, observou-se:

(a) para os latossolos: (i) a variação da sucção com a energia de compactação, para cada uma das diferentes umidades de compactação trabalhadas, depende das características físico-químicas e mineralógicas do solo; (ii) a variação da sucção com o índice de vazios ( $e$ ) é maior nos solos arenosos, intermediária nos solos siltosos e menor nos solos argilosos; (iii) a influência da umidade de compactação na sucção é aparentemente maior nos solos mais arenosos, o que aponta para a maior influência do índice de vazios ( $e$ ); enquanto que nos solos argilosos predomina a influência da umidade.

Ao considerar a incorporação da cal, para a mesma energia ( $N$ ), ocorreu aumento de vazios para a maioria dos latossolos (HB) estudados; no entanto tal variação de vazios foi mais ou menos discreta de acordo com as propriedades do solo.

(b) o comportamento das curvas sucção ( $pF$ ) pelo índice de vazios ( $e$ ) para os solos da zona mosqueada (ZM) e os saprolíticos (SF) mostram que, a influência da umidade na variação da sucção com o índice de vazios  $e$ , portanto, com a energia de compactação, depende das características dos solos. Ao se considerar o conjunto das umidades de compactação verificou-se que estas variações são menores para os solos SF e ZM que para os latossolos.

Em relação aos solos ZM, os resultados demonstram a pouca variação da sucção com o índice de vazios ( $e$ ), para os diferentes teores de cal misturados. Já, para a maioria dos solos saprolíticos (SF), ocorrem comportamentos distintos quando do tratamento com cal, mesmo para solos de composições químico-mineralógicas semelhantes.

(c) aparentemente, a partir de um determinado teor de quartzo a sucção varia pouco com o índice de vazios e mantêm-se pequena, isto decorre provavelmente dos macroporos passarem a predominar no solo.

(d) a sucção não sofre grandes variações com o aumento da energia de compactação (N) aplicada, para a maioria dos solos. Tal fato ocorre para uma dada umidade de compactação.

(e) a avaliação das curvas índice de vazios (e) pelo número de golpes (N) é importante, pois dá idéia da energia efetiva para cada solo. Assim, as maiores variações de “e” são para os latossolos (HB), seguidas das observadas para os solos saprolíticos (SF) e, dos solos pertencentes à zona mosqueada (ZM). Verificou-se ainda que, mesmo para as maiores variações de vazios a estabilização deste parâmetro se dá entre 12 a 20 golpes, qualquer que seja a umidade de compactação.

(f) foi observado para o conjunto de resultados que, os comportamentos dos materiais são variáveis com a umidade de compactação e com o teor de cal usado para a estabilização.

Nos latossolos, sobressaiu-se como padrão geral, o aumento do índice de vazios (e) com a incorporação da cal, para uma mesma energia (N). Em alguns casos particulares, ocorre redução de índice de vazios (e) com a presença da cal. Este comportamento (queda de e) foi verificado também para os solos pertencentes à zona mosqueada (ZM), muito embora não seja uma constante para todas as umidades e teores de cal considerados. Já para os solos saprolíticos (SF), apenas o solo SF4 fugiu a tendência geral de aumento de índice de vazios com a incorporação da cal.

(g) observou-se comportamento desagregador para os solos HB7, HB9b, ZM3, ZM6, SF4 e SF8, com a incorporação da cal, no entanto, cabe destacar que, este comportamento é variável com o teor de cal, umidade e energia de compactação usada.

**15.** Com relação à variação do índice de vazios e sucção atuando sobre o mini-CBR, tem-se:

(a) a umidade e o índice de vazios não definem de modo isolado o comportamento do solo, no entanto, os solos pertencentes aos três grupos estudados, apresentam relação razoável com a sucção.

(b) a imersão gera diferenças consideráveis em termos de resistência para os solos sem estabilização química e, estas são variáveis com o tipo de material, a umidade e a energia de compactação empregada. Foram obtidos valores de mini-CBR imerso bastante reduzidos, de forma a inviabilizar a aplicabilidade da maioria dos latossolos como material de sub-base de pavimento. Aparentemente as menores variações de suporte são verificadas para o solo HB9b, que possui grande percentual de argila; mas mesmo para tal solo a resistência não comporta seu uso como material de construção rodoviária.

(c) os efeitos da desagregação na eficiência da compactação, ou seja, na redução de índice de vazios (e) para a mesma energia (N), depende de um conjunto de variáveis, embora a

desagregação por si só geralmente contribua para a redução do (e) quando da compactação, o que não significa necessariamente melhoria de comportamento mecânico.

(d) ao considerar a imersão para amostras compactadas em umidades no ramo seco e úmido da curva de compactação, observou-se que esta variação de umidade de compactação não conduz necessariamente a redução da perda capacidade de suporte.

(e) Ao considerar a situação de imersão para as amostras compactadas e estabilizadas com cal, em diferentes umidades e energias de compactação, observou-se que, de forma geral, a incorporação da cal contribui para que a perda de resistência não seja tão considerável quanto à verificada para os solos naturais e ainda que, aparentemente, o acréscimo de energia de compactação contribui um pouco mais para a preservação desta capacidade de suporte. No entanto, destaca-se que para determinadas condições de compactação e tipo de solo a afirmação anterior não procede, podendo-se provavelmente atribuir tal comportamento à modificação do ponto isoelétrico dos solos estabilizados com a cal.

(f) o conjunto de resultados apresentados comprovou a validade do modelo de transformação proposto por Camapum de Carvalho & Pereira (2001), para o caso do mini-CBR. Observa-se, de forma geral, que há tendência bem definida de aumento do CBR com a sucção e com a sucção normalizada ( $pF/e$ ). Considerando-se que para uma obra trabalha-se com uma faixa estreita de umidades e peso específico de compactação, o modelo ganha em precisão na avaliação de casos reais. É necessário salientar que mesmo considerando a normalização da sucção, não ocorre tendência a um comportamento único, pois a distribuição de poros varia com a umidade e energia de compactação.

**16.** Enfatizou-se o importante papel da sucção na resistência dos solos, destacando que ao se considerar a melhoria do suporte gerado pela condição de não saturação, é possível o dimensionamento de pavimentos mais econômicos através do uso do solo regional.

**17.** Com relação aos resultados de resistência a compressão simples (RCS):

(a) avaliando os resultados em relação ao critério de reatividade de Thompson, nota-se que a exceção do latossolo HB10 estabilizado com 6% de cal, os demais não apresentam ganho de resistência não imersa superior a  $345 \text{ KN/m}^2$ . Dependendo do teor de umidade estudado e do tipo de solo, a estabilização com cal mostra valores de RCS mais ou menos próximos do acréscimo de RCS de  $345 \text{ KN/m}^2$ .

(b) o parâmetro de reatividade (RC) apresentou variação mínima de 9,2% para o solo HB12 e, máxima de 290% para o solo SF8. Ganhos substanciais indicam que o solo é passível de

utilização como camadas de pavimentos rodoviários. No entanto, deve ser considerado o mini-CBR, cujos valores indicam que a maioria dos solos só pode ser usada como material de construção para sub-bases rodoviárias ou mesmo como reforço de subleito.

(c) para compactações efetuadas no ramo seco e no ramo úmido da curva de compactação, o critério de Thompson não é obedecido para nenhum dos materiais compactados e estabilizados com 6% de cal.

(d) os resultados de RCS em função do tempo de estabilização mostraram que as variações das curvas são função direta de um conjunto de parâmetros, quais sejam: umidade, “e”, teor de cal, tipo de solo e arranjo estrutural. Para o conjunto de resultados de RCS avaliados, foi possível verificar a tendência agregadora/desagregadora da cal ao ser incorporada ao solo e ainda reafirmar que o comportamento do solo natural e estabilizado compactado representa uma função complexa, em que age conjuntamente o estado físico, químico e mineralógico, conjuntamente ao arranjo estrutural das partículas, sendo tarefa difícil e arriscada a elaboração de associações diretas.

**18.** Com relação aos resultados de PMI obtidas para os solos estudados, são notáveis comportamentos diferenciados, estes provavelmente decorrentes das composições de cada material e de suas reatividades a incorporação da cal. Verificou-se a tendência ao decréscimo de PMI com o aumento da energia de compactação aplicada, comportamento este mais notável para os latossolos. Comparando-se os diferentes tipos de solo observou-se ainda que, os latossolos são os que apresentam menor PMI, sendo os resultados obtidos para os solos ZM e SF relativamente semelhantes. É necessário destacar que, como o procedimento de compactação afeta consideravelmente as resistências dos solos, o comportamento verificado relativo a PMI, não pode ser generalizado sem verificação para outra metodologia de compactação.

**19.** Na determinação da capacidade de absorção de água, de modo geral, observou-se que a quantidade de água infiltrada diminui em função do tempo, até se aproximar ou atingir à linearidade. O ponto a partir do qual ocorre tendência à linearidade da curva é variável com a condição de compactação, tipo de solo, permeabilidade, porosidade e distribuição dos poros e, portanto, com a forma da curva característica de retenção de água.

Para os latossolos verificou-se que a absorção foi pequena. Ao adicionar cal, praticamente não houve modificação na absorção. Os solos ZM e SF apresentaram maior

absorção que os latossolos, sendo que para os solos ZM a maior parte dela ocorreu em 24 horas.

**20.** A junção dos resultados obtidos quanto aos valores de resistência, mini-CBR não saturado, mini-CBR imerso, RCS e PMI apontam para a determinação de um teor de cal ótimo variável de acordo com o parâmetro que se deseje melhor. Ou seja, pode-se ter um solo estabilizado que apresente excelentes valores de RCS, mini-CBR não saturado e imerso, mas que apresente elevada PMI, sendo, portanto, problemático sob o aspecto da resistência a erodibilidade.

## **12.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

O presente trabalho representa um passo importante no sentido de avaliar a aplicabilidade dos diferentes solos finos estudados na região do Distrito Federal para a pavimentação rodoviária. A pesquisa contemplou ainda a variação do comportamento mecânico dos materiais com a sucção, energia e estabilização química. Sendo assim, de forma a continuar as avaliações apresentadas neste trabalho, recomenda-se para pesquisas futuras:

- 1.** De forma a avaliar o efeito da cal ao longo do tempo de cura, realizar análises granulométricas dos solos estabilizados para os teores de 2%, 4% e 6% de cal, considerando diferentes períodos de tempo de mistura.
- 2.** Determinação da capacidade de troca catiônica (CTC), para todos os solos estabilizados nos teores de 2%, 4% e 6% de cal.
- 3.** Determinação do ponto isoelétrico dos solos.
- 4.** Classificação expedita MCT de todos os solos e ainda das misturas estudadas.
- 5.** Conhecendo-se o papel determinante da estrutura dos solos compactados no seu comportamento mecânico, devem ser realizadas microscopias para os solos nas seguintes condições: (a) solos compactados em umidades diferentes da ótima; (b) solos compactados e estabilizados com 2%, 4% e 6% de cal, considerando diferentes períodos de cura e umidades

de compactação; (c) solos compactados nas energias PN e PM, englobando as variações citadas nos itens (a) e (b).

**6.** Obtenção das curvas de mini-compactação de todos os solos e misturas na energia proctor modificado (PM). A partir dos parâmetros ótimos obtidos, realizar estudo semelhante ao desenvolvido nesta tese para a energia proctor modificado.

**7.** Sabendo-se que a curva característica dos solos pode ser usada para prever o comportamento mecânico dos mesmos, devem ser executadas:

(a) complementação das curvas obtidas na energia intermediária;

(b) complementação das curvas obtidas na energia proctor normal (PN) para o solo estabilizado com 6% de cal, para cura de 30 dias e ainda, considerando a trajetória mista de execução.

(c) curvas dos itens a e b considerando umidades de compactação diferentes da umidade ótima, diferentes teores de cal, tempos de estabilização (15 e 30 dias) e trajetórias de execução (umedecimento e mista).

**8.** Em relação à resistência a penetração (mini-CBR):

(a) realizar ensaios para 4% de cal em umidades de compactação ( $w_c$ ) superiores e inferiores a umidade ótima ( $w_{ót}$ ),

(b) refeita toda a bateria de ensaios para o período de cura igual a 30 dias.

**9.** Refazer a bateria de ensaios de mini-CBR considerando o molde maior, ou seja, o CBR tradicional. Desta forma será possível verificar quantitativamente o efeito escala existente.

**10.** Avaliar a importância de estabilizantes químicos nas curvas características e no comportamento mecânico dos perfis dos solos para o segundo metro de profundidade, de forma a tentar maximizar o uso dos materiais nas estruturas dos pavimentos;

**11.** Avaliar o comportamento resiliente de cada tipo de solo e ainda das misturas solo-cal estudadas;

**12.** Complementar as avaliar das perdas de massa por imersão (PMI), de forma a englobar todos os solos, misturas e energias de compactação usadas.

**13.** Com relação aos ensaios de resistência a compressão simples (RCS):

(a) complementar os estudos realizados, para que cada umidade de compactação usada seja considerada com 0%, 2%, 4% e 6% de cal;

(b) ensaiar pelo menos mais 3 pontos para cada condição de compactação usada, de forma a se ter condições de realizar uma análise estatística dos dados,

(c) realizar ensaios de RCS para os corpos de prova compactados nas energias PN e PM, considerando todas as condições e solos usados no presente estudo e ainda, observando os itens (a) e (b) acima.

**14.** Com relação aos ensaios de absorção, devem ser considerados:

(a) complementar os estudos realizados, no sentido que para cada teor de umidade de compactação usado para os ensaios de mini-CBR, sejam consideradas também misturas com 2%, 4% e 6% de cal;

(b) determinar as quantidades de água absorvidas para os corpos de prova compactados nas energias PN e PM, considerando todas as condições e solos usados no presente estudo e ainda considerando o item (a) acima.

**15.** Avaliar a existência de correlações entre o mini-CBR, CBR tradicional, perda de massa por imersão (PMI), resistência à compressão simples (RCS) e quantidade de água absorvida, através de análises numéricas.

**16.** Viabilizar, em conjunto com os órgãos rodoviários e empresas, a execução de trechos experimentais com os solos aqui estudados, visando verificar o desempenho dos mesmos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1986). Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, NBR-6457, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT (1984). Grãos de Solos que passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica, NBR-6508, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT (1984a). Solo – Determinação do Limite de Liquidez, NBR-6459, Rio de Janeiro, RJ, 6p.

ABNT (1981). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade, NBR-7180, Rio de Janeiro, RJ, 3p.

ABNT (1984b). Solo – Análise Granulométrica, NBR-7181, Rio de Janeiro, RJ, 13p.

ABNT (1986a). Solo – Ensaio de Compactação, NBR-7182, Rio de Janeiro, RJ, 10p.

ABNT (1986a). Solo – Índice de Suporte Califórnia, NBR-9895, Rio de Janeiro, RJ, 14p.

ABNT (1988). Solo - Determinação da Massa Específica Aparente de Amostras Indeformadas, com Emprego da Balança Hidrostática, NBR-10838 - MB-2887, Rio de Janeiro, RJ, 4p.

Akoto, B.K.A. & Singh, G. (1986). Behaviour of lime stabilized lateritic under repeated loading. Australian Road Research, Victoria 16(4): 259-267.

Alonso, E. E.; Gens, A. & Hight, D. W. (1987). Special problems soils. *In*: European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin. General Report.

Angelim, R.R. (2005). Influência do Procedimento de Mistura da Cal Hidratada ao Solo no Comportamento do Solo Estabilizado para Fins de Pavimentação Rodoviária. II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste – UFG, vol. único, p. 261-266.

Ahmed, S., Asce A.M., Lovell JR, C.W., Asce, F. & Diamond, S. (1974). Pore sizes and strength of compacted clay. Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol.100, p.407-425.

Araki, M.S. (1997). Aspectos relativos às Propriedades dos Solos Porosos Colapsíveis do Distrito Federal. Dissertação de mestrado G.DM-040A/97. Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília. 121p.

Balbo, J.T. (1996). Alguns Conceitos Diferenciadores dos Materiais Estabilizados com Cimento. 7ª Reunião Anual de Pavimentação Urbana, São José dos Campos, SP, pp. 275-294.

Barbour, S.L. (1999). The soil – water characteristics curve: a historical perspective. 19th Canadian Geotechnical Colloquium, Canadian Geotechnical Journal, n. 35.

- Barden, L. (1965). Consolidation of compacted and unsaturated clays. *Géotechnique*. v.15, n.3, p.267-286.
- Barroso, S.H.A. & Fabbri, G.T.P. (1996). Algumas Considerações sobre a Classificação MCT e seus Índices. 30<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Salvador – BA, 2: 495-505.
- Brandl, H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *In: Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm 1: 587-94.
- Brasileiro, F.E. & Vasconcelos Costa, C.R. (1987). Degradação dos Solos e seus Efeitos no Índice de Suporte Califórnia pela Ação de Diferentes Níveis de Energia no Laboratório. 22<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Maceió – AL, 1: 115-130.
- Bueno, B.S., Lima, D.C. & Rohm (1982). Influência de algumas Propriedades Naturais dos Solos na Reatividade Solo-Cal para Fins Rodoviários. 17<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF, Vol.1, pp. 87-94.
- Burmister, D.M. (1970). Suggested methods of test for identification of soils. *In: Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes*. Philadelphia, ASTM-STP 479, p. 311-332.
- Camapum de Carvalho, J. (1985). Étude du comportement mécanique d'une marne compactée. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées - I.N.S.A., France-Toulouse, 181p.
- Camapum de Carvalho, J., Mortari, D., Silva, P.R. & Paixão, M.M.O.M. (1993). Avaliação da Colapsibilidade de um Solo Poroso em consequência da Construção de um Aterro, 27<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Belém, p. 255-263.
- Camapum de Carvalho, J.; Guimarães, R.C; Cardoso, F.B.F & Pereira, J.H.F. (1996). Proposta de uma Nova Terminologia para Ensaios de Sedimentação. 30<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA, 2:521-531.
- Camapum de Carvalho, J. & Leroueil, S. (2000). Modelo de Normalização da Curva Característica. 32<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, 1: 96-106.
- Camapum de Carvalho, J., Pereira, J. H. F., Guimarães, R. C. & Abreu, P.S.B. (2001). Análise da Influência da Sucção nos resultados de SPT e SPT-T em Solos Porosos Colapsíveis. 4<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre-RS, vol. único: 509-520.
- Camapum de Carvalho, J. & Pereira, J.H.F. (2001). Estudo do Comportamento Mecânico dos Solos Não-Saturados com Base na Sucção Normalizada. 4<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre-RS, vol. único: 134-148.
- Camapum de Carvalho, J. (2003). Comunicação Pessoal. Departamento de Engenharia Civil, Unb, Brasília, DF.

Camapum de Carvalho, J., Guimarães, R.C. & Pereira, J.H.F. (2002). Courbes Caracteristiques d'un profil d'alteration. Third International Conference on Unsaturated Soils, ABMS/ISSMGE, Recife-PE.

Campos, T. M. P.; Delgado, C.C.; Tibana, S.; Aguiar, S.A.S & Fonseca, E.C. (1992). Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório. *In*: Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. 1<sup>a</sup>. COBRAE, Anais... vol. 3, p. 851-853.

Cardoso, F.B.F (1995). Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso. Dissertação de mestrado G.DM-026A/95. Mestrado em Geotecnia, UnB, 140p.

Cardoso, A. B. & Trichês, G. (2000). Avaliação da Capacidade de Suporte de Aterros e Subleito de Rodovias utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone. 32<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Brasília-DF, 2: 649-656.

Cardoso, F.B.F., Martins, E.S. & Camapum de Carvalho, J. (1998). A Evolução Pedogeoquímica e sua Influência nas Propriedades Físicas dos Solos Profundamente Intemperizados do Distrito Federal. XI COBRAMSEG, Brasília, Vol 1, p. 51-58.

Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado G.TD- 009A/02. Doutorado em Geotecnia, UnB, 351p.

Carvalho, M.N. (1995). Seminário da Disciplina Geotecnia dos Solos Tropicais. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília-DF, 6p.

Catani, R.A., Romano Gallo, J. & Gargantini, H. (1955). Amostragem de Solo, Métodos de Análise, Interpretação e Indicações Gerais para Fins de Fertilidade. Boletim n<sup>o</sup> 69, Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, SP, 28p.

Casanova, F.J. (1987). A Físico-Química de Solos Tropicais – Fundamentos Teóricos. 22<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Maceió – AL, p. 538-553.

Cavaleri, L.V.P. (1998). Estabilização de Minerais Argilosos com Cal. Petrobrás: Petróleo Brasileiro S. A., Rio de Janeiro, RJ, 100 p.

Ceratti, J.A., Gehling, W.Y.Y., Bica, A.V.D. & Rodrigues, M.R. (1996). Influência da Sucção no Módulo de Resiliência de um Solo Típico do Rio Grande do Sul. 30<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 2: 541-555.

Chauvel, A. & Nóbrega, M.T.(1980). Comportamento de Solos Argilosos desenvolvidos sobre Basaltos do Brasil Meridional após Tratamento com Cal. IV Reunião Aberta da Indústria da Cal, São Paulo, SP, pp.124-172.

Costa, C. R. V. (1987). Influência do Desvio de Umidade na Resistência de Solos Lateríticos Compactados. 22<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Maceió – AL, 1: 145-154.

Cruz, P.T. (1996). 100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, Materiais de Construção, Projetos. São Paulo. Ed. Oficina de Textos.

Cruz, P.T. (2001). Compacted Soils – a particular case of non saturated materials. 4<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, vol. único: 113-133.

Delgado, A.K.C. (2002). Influência da Sucção no Comportamento de um Perfil de Solo Tropical Compactado. Dissertação de mestrado G.DM-095A/02. Mestrado em Geotecnia, UnB, 176p.

Delgado, A.K.C., Carvalho, J.C & Farias, M.M. (2006). Análise da Variação do Tempo de Cura e da Trajetória de Execução no Comportamento de Curvas Características de Solos Naturais e Estabilizados. 37<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação e 11<sup>o</sup> Encontro de Conservação Rodoviária, 37<sup>a</sup> RAPv / 11<sup>o</sup> ENACOR, Goiânia, trab.n<sup>o</sup> .094.

DER (1971) - Especificações Gerais para Obras Rodoviárias. São Paulo.

DNER-ME 228/94 (1994) – Solos - Compactação em Equipamento Miniatura, São Paulo, 16p.

DNER-ME 254/94 (1994). Solos Compactados em Equipamento Miniatura - Mini-CBR e Expansão, São Paulo, 12p.

DNER-ME-256. (1994). Solos Compactados em Equipamento Miniatura - Determinação da Perda de Massa por Imersão, São Paulo, SP, 6 p.

DNER-ME-258. (1994) – Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini-MCV, Rio de Janeiro, 14p.

DNER-ME-180. (1994) – Solos Estabilizados com Cinza Volante e Cal Hidratada – Determinação da Resistência a Compressão Simples, Rio de Janeiro, 11p.

DNER-n<sup>o</sup> 697/100 (1996). Manual de Pavimentação. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR/DNER, São Paulo, 320p.

DNER-ES-303. (1997). Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente. Rio de Janeiro, RJ, 7 p.

Escario, V. (1988). Formulationes para la definición de la resistencia a esfuerzo cortante de los suelos parcialmente saturados. Ingenieria Civil n<sup>o</sup> 68, CEDEX.

Escario, V. & Juca, J. (1989). Strength and Deformation of partly saturated soils. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, vol.3, p. 453-456.

Edil, T.B. & Motan S.E. (1979). Soil-water potencial and Resilient Behaviour of subgrade soils. Transportation Research Record, vol. 705: 54-63.

Elliot, R. P., Thornton, S. L., Foo, K. Y., Siew, K. W. & Woodbridge, R. (1988). Resilient properties of Arkansas subgrades. Report N<sup>o</sup> FHWA/AR-89/004, Arkansas Highway and Transportation Research Center, University of Arkansas, Fayetteville.

EMBRAPA (1999) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. EMBRAPA - Solos (Rio de Janeiro), Brasília, DF, 412 p.

Farias, W.M. (2003). Condutividade Hidráulica de Solos Tropicais Compactados a Hidrocarbonetos da Gasolina. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM-108A/03, Universidade de Brasília, UnB, 152p.

Fredlund, D. G.; Bergan, A. T.; Sauer, E. K. (1975). Deformation characteristics of subgrade soils for highways and runways in northern environments. *Canadian Geotechnical Journal*, v.12, n.2, p.213-223.

Fredlund, D. G.; Bergan, A.T.; Wong, P. K. & Brentnall, M. M. et al. (1977). Relation between resilient modulus and stress conditions for cohesive subgrade soils. *Transportation Research Record*, vol. 642, p. 73-81.

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. & Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v.15, p. 313-321.

Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, New York, p.517.

Fredlund, D.G. & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, vol.31, p. 521-532.

Fredlund, D.G (1996). Recent research on the soil-water characteristic curve and its application in engineering. University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask, Canadá.

Fredlund, D.G (1997). From theory to the practice of unsaturated soil mechanics. *In: 3<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, 1997, Anais, v.2, p.311-332.*

Galvão, T. C. B., Aguiar Sans, L. M., Schulze, D. G. & Drnevich, V. P. (1997). Geotechnical properties of an unsaturated collapsible lateritic soil from Minas Gerais, Brazil. *3<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro-RJ, vol.1, p. 171-178.*

Gehling, W.Y.Y. , Ceratti, J.A. , Nunez, W.P. & Rodriguez, M.R. (1998). Relação entre a Sucção e o Módulo de Resiliência: Estudo de Campo e Laboratório. *XI COBRAMSEG, Brasília – DF, vol 1: 629-634.*

Gehling, W.Y.Y., Ceratti, J.A. & Rodriguez, M. R. (1998). Influência da Sucção no Módulo de Resiliência dos Solos de Subleitos de Pavimentos. *XI COBRAMSEG, Brasília- DF, vol.1, p. 643-648.*

Gehling, W. Y. Y. & Dias, R.D. (1986). Influência da Sucção na Resistência ao Cisalhamento de Solos Tropicais do Rio Grande do Sul. *VIII COBRAMSEG, Porto Alegre, 2:193-202.*

Gens, A., Alonso, E.E., Suriol, J. & Lloret (1995). Effect of structure on the volumetric behavior of a compacted soil. *Unsaturated Soils. Paris. Vol. 1, pp. 83-88.*

Gidigas, M.D. (1974). *Laterite Soil Engineering*. Elsevier, Holland.

Greacen, E.L., Walker, G.R. & Cook, P.G. (1987). Evaluation of the filter paper method for measuring over a wide moisture range, *Soil Science*, vol.43, january-june-p. 277-283.

- Guimarães, J.E.P. (1971). Estabilização de Solos – Nova e Importante Aplicação da Cal – seus Conceitos e suas Vantagens. ABPC, Boletim n.5, São Paulo, SP, 67p.
- Guimarães, R.C., Camapum de Carvalho, J. & Farias, M. M. (1997). Contribuição ao Estudo da Utilização de Solos Finos em Pavimentação. 1º Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, ABPv, Rio de Janeiro, RJ, 2: 469-477.
- Guimarães, R.C. (2002a). 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 – 091A/02. Mestrado em Geotecnia, UnB, 200p.
- Guimarães, J.E.P.(2002b). A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. PINI, São Paulo, SP, 341p.
- Godoy, H., Bernucci, L. B. & Nogami, J. S. (1996). Diretrizes para a Identificação Expedita de Solos Lateríticos para Uso em Obras Viárias. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador-BA, 2: 556-568.
- Godoy, H. & Bernucci, L. B. (2000). Caracterização de Propriedades Geotécnicas de Solos realizada no próprio Campo e de maneira Expedita. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília – D.F., 1: 108-115.
- Harty, J.R. & Thompson, M.R. (1973). Lime reactivity of tropical and subtropical soils. Highway Research Record, Washington, D.C. 442: 102-12.
- Heyn, A. (1986). Aplicações do Penetrômetro Dinâmico de Ponta de Cone na Avaliação de Estruturas de Pavimentos, 21ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador-BA.
- Houston, S. L., Walsh, K. D. & Houston, W. N.(1997). Shear strength contribution of soil suction in cemented soil. 3º Simpósio de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro-RJ, vol.1 , p. 25-33.
- Jin, S. M.; Lee, K. W.; Kovacs, W. D. (1994). Seasonal variation of resilient modulus of soil subgrades. Journal of Transportation Engineering, New York: ASCE, v.120, n.4, p.603-616.
- Kiehl, E.J. (1979). Manual de Edafologia - Relações Solo-Planta. Ed. Agronômica Ceres, São Paulo, 264p.
- Lapierre, C.; Lerouiel, S. & Locat, J. (1990). Mercury intrusion and permeability of Louiseviele clay. Canadian Geotechnical Journay. N.27. p.761-773.
- Li, D. & Selig, E. T. (1994). Resilient Modulus for Fine Grained Subgrade Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.120, n.6, p. 939-957.
- Li, Z.M. (1995). Compressibility and collapsibility of compacted unsaturated loessial soils. Unsaturated Soils. Paris. Vol. 1, p. 139-144.
- Lima, D.C. (1981). Algumas Considerações relativas a Aspectos da Estabilização dos Solos, em particular Estabilização Solo-Cal. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, SP, 171p.

- Lima, D.C.; Santos, M.F. & Bueno, B.S. (1995). Estabilização dos Solos com Cal e Betume. 6ª Reunião Anual de Pavimentação, Santos, SP, pp.75-90.
- Lima Jr. N.R. & Carvalho, J.C. (2005). Influência da Umidade e Energia de Compactação na Resistência a Compressão Simples de um Solo Saprolítico e um Solo Laterítico Fino. II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste – UFG, vol. único, p. 41-48.
- Lucena, F. B. & Cabrera, J. G. (1990). Definição, Origem e Formação dos Solos Lateríticos. 24ª Reunião Anual de Pavimentação, 1: 384-401.
- Konrad, J. -M. & Lachance, D. (2001). Mechanic properties of unbound aggregates from DCP and plate load tests. Dept. de génie civil, Université Laval, Québec, Canada, G1K 7P4. NSERC Research Chair in Operation of Highways subjected to Frost Action.
- Machado, S.L. & Vilar, O.M. (1998). Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Ensaio de Laboratório e Determinação Expedida. Solos e Rocha, nº (21) 2: 65-78.
- Mahalinga-Iyer, U. & Williams, D. J. (1985). Unsaturated strength behavior of compacted lateritic soils. Géotechnique 45, n.2, 317-320.
- Marinho, F.A.M. (1994). Medição de Sucção com o Método do Papel Filtro. X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, vol.2: p. 515-522.
- Marinho, F.A.M. (1995). A Técnica do Papel Filtro para Medição de Sucção. Encontro sobre Solos Não Saturados, Rio Grande do Sul, 1: 1-14.
- Marinho, F. A. M. & Pinto, C. S. (1997). Evaluation of pore size characteristic of plastic soils. 3º Simpósio de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro-RJ, vol.1, p. 1-11.
- Martins, F.B., Bica, A.V.D., Bressani, L.A. & Coop, M.R (2002). Interação das Componentes Porosidade e Cimentação no Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso. XII COBRAMSEG, São Paulo, 2: 657-669.
- Martínez-Carvajal, H.E; Carvalho, J.C. & Fernández, G. (2005). Influência da Desagregação nos Limites de Atterberg. II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste – UFG, vol. único, p. 217-225.
- Martínez, G.S.S. (2003). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 266p.
- McQueen, I.S. & Miller, R.F. (1968). Calibration and Evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress. Soil Science, vol.106, n.3- p.225-231.
- Medina, J. & Motta, L.M.G. (1988). Design of asphalt pavements using lateritic soils in Brazil. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, 11 (único): 3-9.

- Medina, J. (1989). Tropical soils in pavement design. 12<sup>a</sup> Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro-RJ, vol.1, p.543-546.
- Medina, J. (1997). Mecânica dos Pavimentos. Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, 380 p.
- Melfi, A.J. e Pedro, G. (1977). Estudo Geoquímico dos Solos e Formações do Brasil, Parte 1 - Caracterização e Repartição dos Principais Tipos de Evolução Pedogeoquímica. Rev. Bras. Geoc., Vol. 7 (4), p. 271-286.
- Melfi, A.J. (1994). Lateritas e Processos de Laterização. Publicação 093/94, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 29p.
- Mendonça, A.F. (1993). Caracterização da Erosão Subterrânea nos Aquíferos Porosos do DF. Tese de Mestrado, IG/Unb, 152p.
- Menegotto, M.L., Cintra, J.C.A. & Aoki, N. (2002). Influência da Sucção Matricial no Módulo de Deformabilidade de Solo Não Saturado. XII COBRAMSEG, São Paulo, 1: 419-428.
- Mitchell, J. K. & Sitar, N. (1982). Engineering properties of tropical residual soils". ASCE Geotechnical Engineering Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical Tropical and Residual Soils, Hawaii, p. 30-57.
- Mohammad, L.N., Puppala, A.J. & Alavilli, P.(1995). Resilient properties of laboratory compacted subgrade soils. Transportation Research Record, vol.1504, p.87-102.
- Moore, J.C. & Jones, R.L. (1971). Effect of soil surface and extractable silica, alumina and iron on lime stabilization characteristics of Illinois soil. Highway Research Board, Washington, D.C. 351: 87-92.
- Motta, L. M. G., Aranovich, L.A.S. & Ceratti, J.A.P. (1985). Comportamento Resiliente de Solos utilizados em Pavimentos de Baixo Custo. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, 3 (vol. 8): 15-42.
- Neto, P. M. S. & Carvalho, J. C. de.(1995). Métodos para Medir a Sucção em Solos Não Saturados. In: Encontro sobre Solos Não Saturados, Porto Alegre, Anais, p. 143-158.
- Nóbrega, M.T. (1991). A Estabilização dos Solos Tropicais com Adição de Cal para fins Rodoviários. Associação Brasileira de Produtores de cal, boletim n.15, 116p.
- Nogami, J.S. (1972). Determinação do Índice de Suporte Califórnia em Equipamento de Dimensões Reduzidas (ensaio Mini-CBR), II Reunião das Organizações Rodoviárias, Brasília.
- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1981). Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, 1: 30-41.
- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1985). Algumas Comparações entre uma Nova Classificação de Solos e as Tradicionais, principalmente para Finalidades Rodoviárias. VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Olinda/Recife.

- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1990). Características e Desempenho de Segmentos com Base de Argila Laterítica. 24<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Belém- PA, 1: 291-304.
- Nogami, J. S., Villibor, D. F., Sória, M. H. A . & Fabbri, G. T. P. (1993). Pavimentação com Solos Lateríticos. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS), Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Nogami, J. S. & Villibor, D. F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. Ed. Vilibor, São Paulo, 213 p.
- Nogami, J.S., Villibor, D.F., Serra, P.R.M. & Zuppolini Neto, A. (1996). Procedimentos Não-Tradicionais na Pavimentação com Solos e Ambientes Tropicais. 30<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Salvador – BA, 4: 1603-1633.
- Nogami, J. S. & Villibor, D.F. (2000). Nova Conceituação do Coeficiente  $c'$  da Classificação Geotécnica MCT. 30<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Brasília – DF, 1: 33-41.
- Núñez, W.P.(1991). Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, visando seu Emprego na Pavimentação. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RGS, 150p.
- Núñez, W.P., Rodrigues, M.R., Ceratti; Oliveira, J.A.A. (1996). Análise Experimental de Pavimentos com Camadas Estruturais em Basalto Alterado – A Construção das Pistas Experimentais. 30<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação. Salvador, BA.
- Núñez, W.P., Rodrigues, M.R., Ceratti, J., Gehling, W.Y.Y. & Oliveira, J.A . (1996). A Influência da Sucção no Módulo Resiliente de um Solo de Comportamento Laterítico – Resultados de Laboratório e de Campo com emprego do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS. 30<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação. Salvador, 2: 701-720.
- Oliveira, L.E. & Vermatti, E. (1997). Análise de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Executado Com Solos Transicionais. I SINBATRA, Rio de Janeiro.
- Paixão, M.N.O.N. & Camapum de Carvalho, J. (1994). Influência da Microestrutura no Colapso de um Solo de Brasília. 2<sup>o</sup> Simpósio sobre Solos Não-Saturados, ABMS/UFPE, Recife, PE, 1: 105-110.
- Pandian, N. S., Nagaraj T. S. & Sivakumar Babu, G. L. (1992). Tropical Clays. I: Index properties and Microstructural aspects. Journal of Geotechnical Engineering, vol.119, n<sup>o</sup> 5, p. 826-839.
- Pandian, N.S., Nagaraj T.S. & Manoj, M. (1998). Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soils. Géotechnique, 47, n<sup>o</sup> 2, p. 363-366.
- Pandian, N.S., Nagaraj T.S. & Sivakumar Babu, G. L. (1992). Tropical Clays II: Engineering behavior. Journal of Geotechnical Engineering, vol.119, n<sup>o</sup> 5, p. 840-861.
- Pastore, E.L. (1995) Weathering profiles. 10<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Guadalajara, México, 1:353-364.

Prapaharan, S., White, D.M. and Altschaeffl (1991). Fabric of field and laboratory Compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol.117, n.12, Dec- p. 1934-1940.

Pessoa, F.H.C (2004). Análises dos Solos de Urucu para Fins de uso Rodoviário. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 151p.

Pereira, E.L.; Ribeiro, L.F.M.; Carvalho, J.C. & Delgado, A.K.C. (2005). Estabilização de um Latossolo do DF com a Utilização de um Rejeito de Minério de Ferro. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste – UFG, vol. único, p. 275-285.

Pinto, C.S. (1985). Estabilização de Pavimentos com Cal. V Reunião Aberta da Indústria de Cal, ABPC, São Paulo, SP, pp. 81-112.

Queiroz de Carvalho, J.B. & Cabrera, J.G. (1979) Um Método Simples para avaliar a Reatividade à Cal dos Solos Vermelhos Tropicais. *In: Proceedings of the 6th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Lima 2: 485-501.

Queiroz de Carvalho, J.B. (1983). Avaliação da Reatividade à Cal de Solos Lateríticos. 18ª Reunião Anual de Pavimentação, Porto Alegre, 1: 395-403.

Queiroz de Carvalho, J.B. (1987). Análise da Microestrutura de Solos Lateríticos do Brasil. 22ª Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, 1: 373-382.

Queiroz de Carvalho, J.B. (1988). Propriedades e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal. 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, SC, 1: 690-699.

Queiroz de Carvalho, J.B. & Simmons, J.V. (1997). Mineralogy and Microstructure. *In: Blight, G.E., Mechanical of residual soils*. Rotterdam, Brookfield: Ed. Balkema, cap. 3, p.31-40.

Rezende, L.R.(1999).Técnicas Alternativas para a Construção de Base de Pavimentos Rodoviários. UnB, 169p.

Rezende, L.R. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD 014A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 360p.

Ridley, A.M. & Wray, W. K.(1995). Suction measurement: a review of current theory and practices. *In: 1st International Conference on Unsaturated Soils*. Paris, Proceedings ...

Robnett, Q. & Thompson, M. (1976). Effects of lime treatment on the resilient behavior of fine-grained soils. *Transportation Research Record*, Washington, D.C. 560: 11-20.

Rohm, S.A. e Nogueira, J.B. (1990). Determinação de Mini-CBR Através do Ensaio de Penetração Dinâmica. 24ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro.

Röhm, S.A. (1992). Resistência ao Cisalhamento de um Solo Arenoso Laterizado Não Saturado da Região de São Carlos-SP. Tese de Doutorado, EESC-USP, São Carlos.

Sánchez-Leal, F.J. (2002). Interpretation of CBR-test results under the shear-strength Concept of unsaturated soil mechanics. Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, 1: 151-157.

Santana, H. & Gontijo, P.R.A. (1987). Os Materiais Lateríticos na Pavimentação de Baixo Custo no Brasil. ABPv – 22<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, 2: 850-899.

Santos, J. (2004). Estabilização de uma Argila Laterítica do Distrito Federal para uso em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, UnB, 93p.

Schellmann, W. (1982). Considerations on the definition and classification of laterites. International Seminar on Lateritisation Processes (Trivandrum, 1979), Oxford IBH Publish, 1-10.

Silveira, R.M.S. & Vilar, O.M. (1998). Influência do Aumento de Pressão de ar na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Compactado. XI COBRAMSEG, Brasília, 1:7-14.

Sória, M. H. A. & Fabbri, G. T. (1980). O Ensaio Mini-MCV – Um Ensaio de MCV, Moisture Condition Value, com Corpos de Prova de Dimensões Reduzidas. 15<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Belo Horizonte.

Sória, M.H.A. (1986). Os Limites de Atterberg, o Argilomineral e o Teor de Argila. VIII COBRAMSEG. Porto Alegre, 1: 161-171.

Svenson, M. (1981). Estudo de Mistura Solo-Cal sob Carregamento Dinâmico. *In: Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*, Rio de Janeiro, 1: 385-414.

Teixeira, R.S. & Vilar, O.M. (1997). Resistência ao Cisalhamento de um Solo Compactado Não Saturado. 3<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, 1:161-169.

Thompson, M.R. (1966). Lime reactivity of Illinois soils. *Journal the Soil Mechanics and Foundations Divisions ASCE*, New York, 92 (SM6): 67-92.

Thompson, M.R. (1975). Soil-lime mixtures for construction of low-volume roads. *Transportation Research Board Special Report*, Washington, D.C. 160: 149-65.

Tuncer, E.R. (1988). Pore size distribution of tropical soils in relation to engineering properties. Proceedings of the 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils – Singapore – p. 63-70.

Vargas, M. (1994). A engenharia de Solos e Fundações no Brasil. Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 147-180.

Vasconcelos Costa, C.R. & Lucena, F.B. (1987). Influência do Desvio de Umidade na Resistência de Solos Lateríticos Compactados. 22<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, 1:145-154.

Vaughan, P.R. (1985). Mechanical and Hydraulic properties of in situ residual soils. Proc. First Int. Conf. On Geomech. In Tropical Laterite and Saprolitic Soils, vol.3, p. 1-33.

- Vanapalli, S.K.; Fredlund, D.G. & Pufahl, D.E. (1999). The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till. *Géotechnique* 49, n.2, p.143-159.
- Vermatti, E. & Oliveira, L.E. (1998). Comportamento de Solos Tropicais de Natureza Transicional em Camadas Estruturais de Pavimentos. XI COBRAMSEG, Brasília-DF, vol.1, p. 657-664.
- Vieira, L. S. (1988). Manual da Ciência do Solo com ênfase aos Solos Tropicais. Editora Agronômica Ceres Ltda, 2ª edição, São Paulo, 464p.
- Villibor, D.F. (1981). Pavimentos Econômicos. Novas Considerações. Tese de Doutorado. Departamento de Vias de Transportes e Topografia. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, SP.
- Villibor, D.F., Nogami, J.S., Fortes, F.Q. & Tonato, J.E. (1995). Pavimentação Urbana de Baixo Custo com Base de Argila Laterítica. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá - MT, vol.3. p. 363-389.
- Villibor, D.F., Nogami, J.S., Zuppolini Neto, A. & Serra, P.R.M. (1995). Tecnologia do Uso de Solos Lateríticos em Pavimentos Urbanos. 4ª Reunião de Pavimentação Urbana, ABPv, São José dos Campos, SP,1: p. 257-277.
- Villibor, D.F., Nogami, J.S., Serra, P.R.M. & Zuppolini Neto, A. (1996). A Importância dos Solos Tropicais na Pavimentação. 7ª Reunião de Pavimentação Urbana. São José dos Campos. São Paulo, SP, 1: 165-186.
- Villibor, D.F., Nogami, J.S., Beligni, M. & Cincerre, J.R. (2000). Pavimentos com Solos Lateríticos e Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. ABPv - Associação Brasileira de Pavimentação, São Paulo, 138p.
- Wesley, L.D. (1988). Influence of structure and composition on residual soils. *Journal Geotechnical Engineering*, ASCE, vol.116(4), p. 589-603.
- Wesley, L. D. & Irfan, T. Y. (1997). Classification of residual soils. *In: BLIGHT, G. E. Mechanical of residual soils*. Rotterdam, Brookfield: Ed. Balkema.
- Wroth, D.M. & Houslsby, G.T. (1985). Soil Mechanics: Property characterization and analysis procedure. *In: 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco, Proceedings...v1, p.1-55.

# ANEXOS

## ANEXO I – CURVAS GRANULOMÉTRICAS

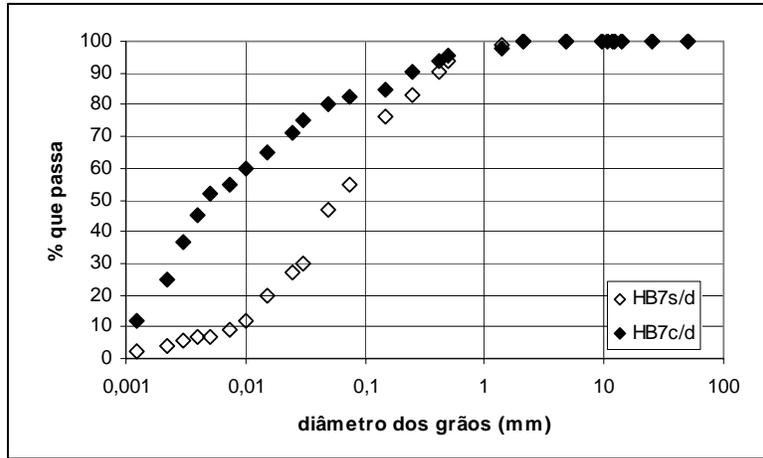


Figura I.1 – Curvas Granulométricas do solo HB7.

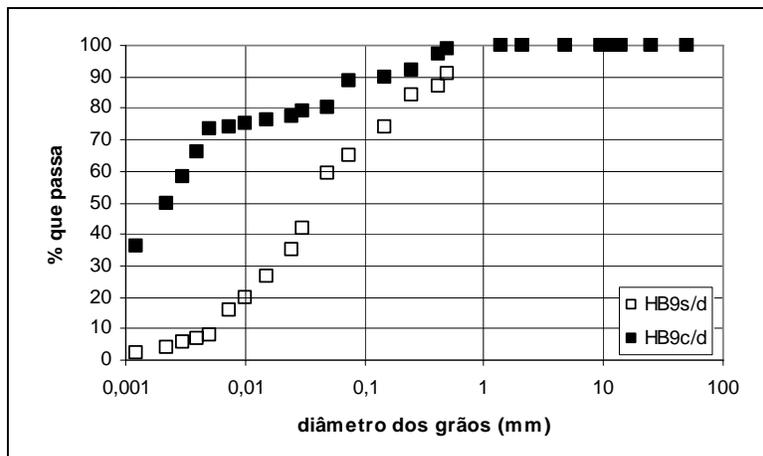


Figura I.2 – Curvas Granulométricas do solo HB9b.

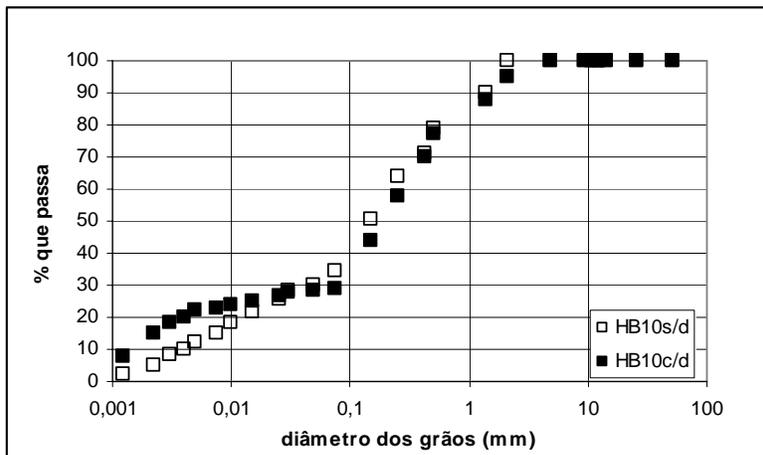


Figura I.3 – Curvas Granulométricas do solo HB10.

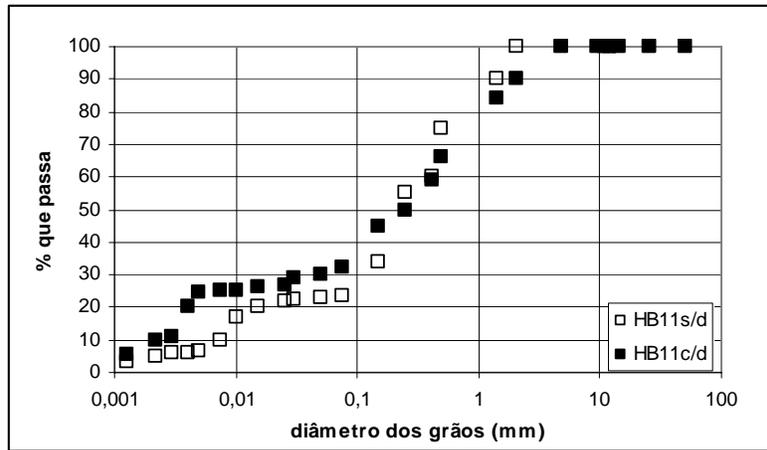


Figura I.4 – Curvas Granulométricas do solo HB11.

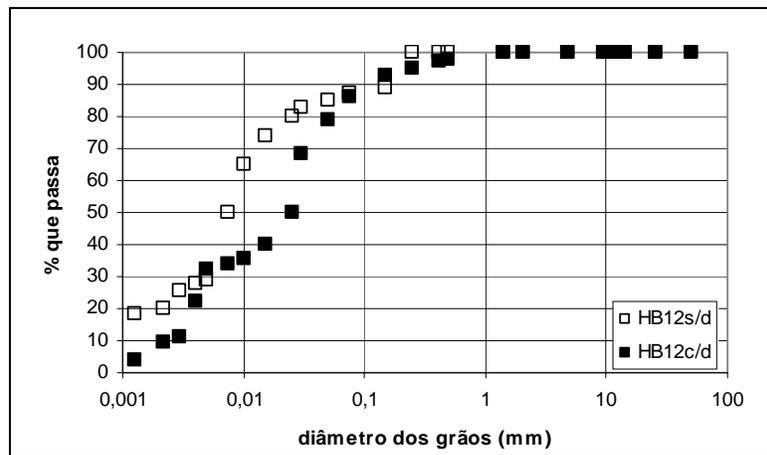


Figura I.5 – Curvas Granulométricas do solo HB12.

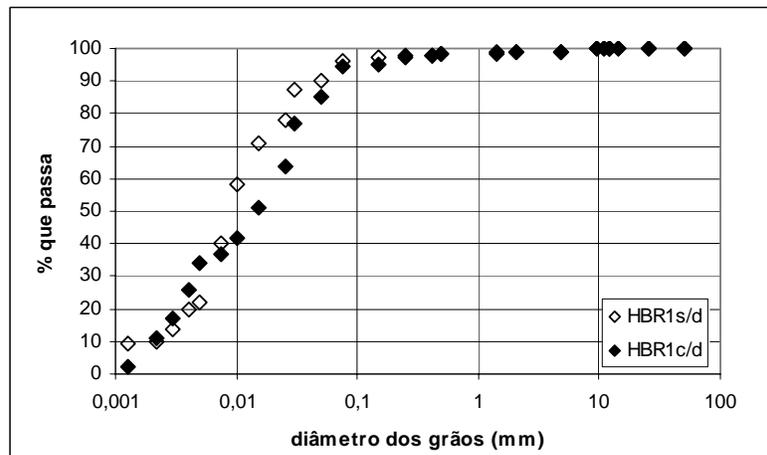


Figura I.6 – Curvas Granulométricas do solo HBR1.

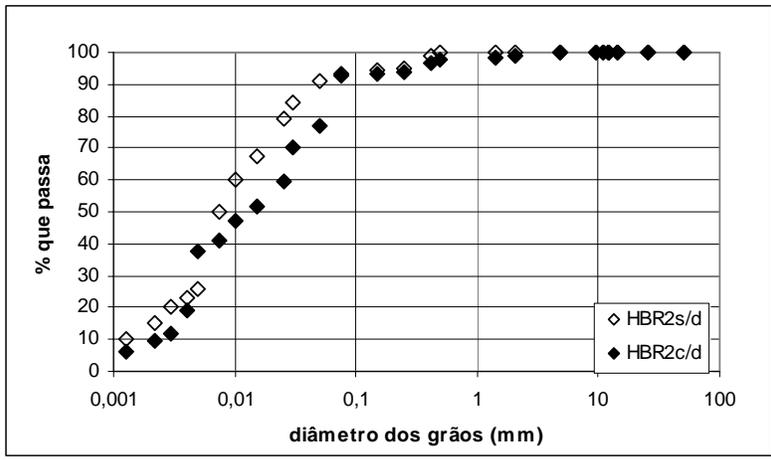


Figura I.7 – Curvas Granulométricas do solo HBR2.

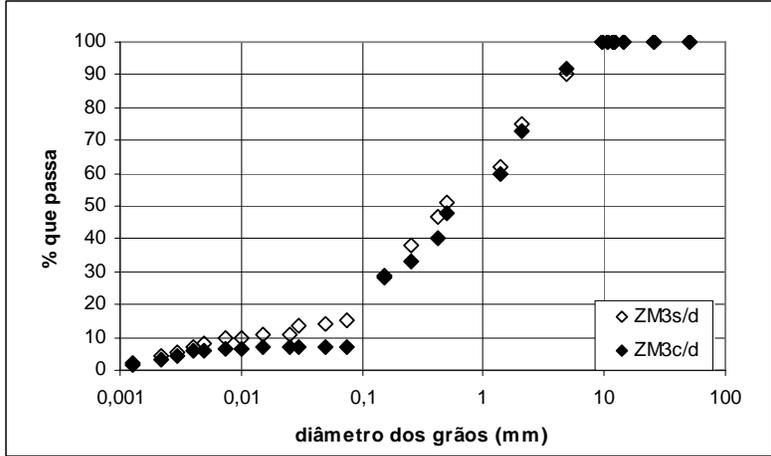


Figura I.8 – Curvas Granulométricas do solo ZM3.

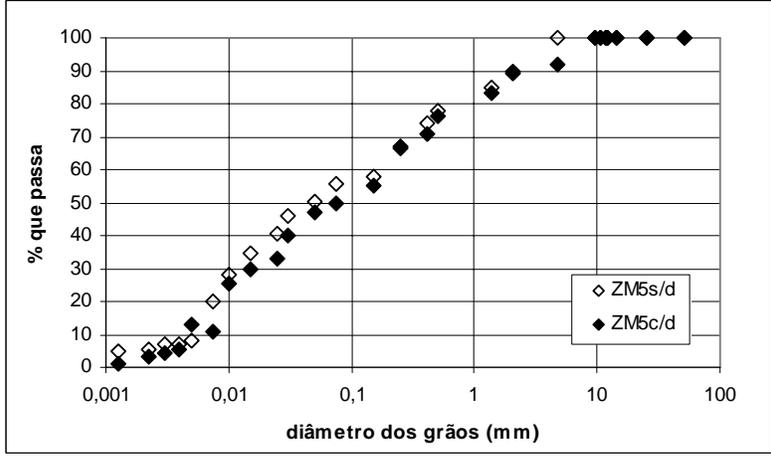


Figura I.9 – Curvas Granulométricas do solo ZM5.

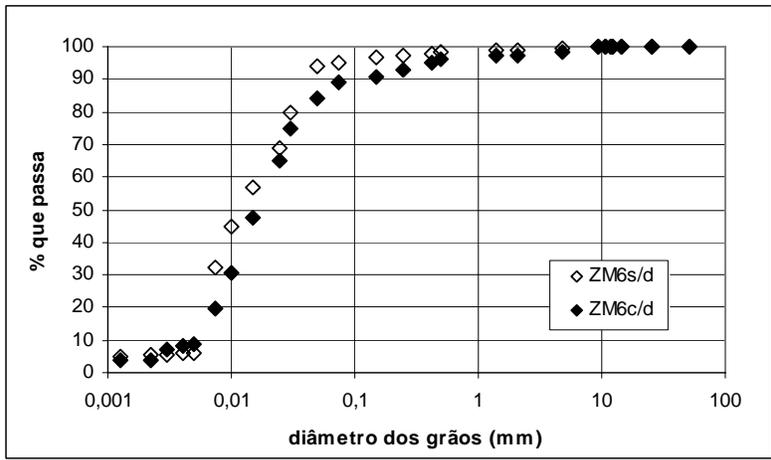


Figura I.10 – Curvas Granulométricas do solo ZM6.

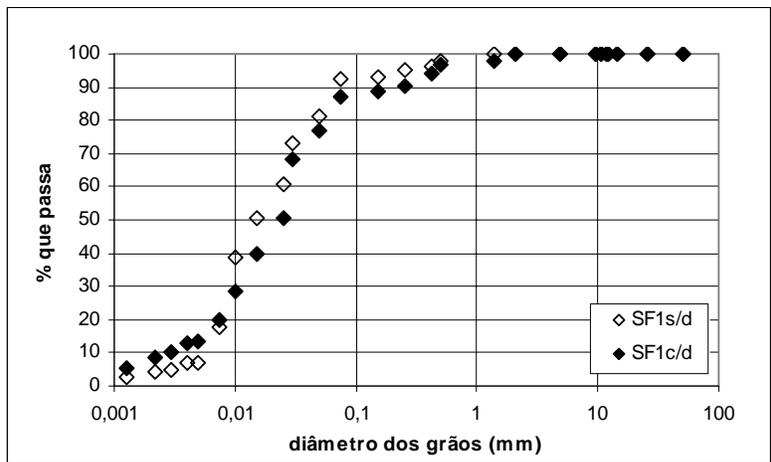


Figura I.11 – Curvas Granulométricas do solo SF1.

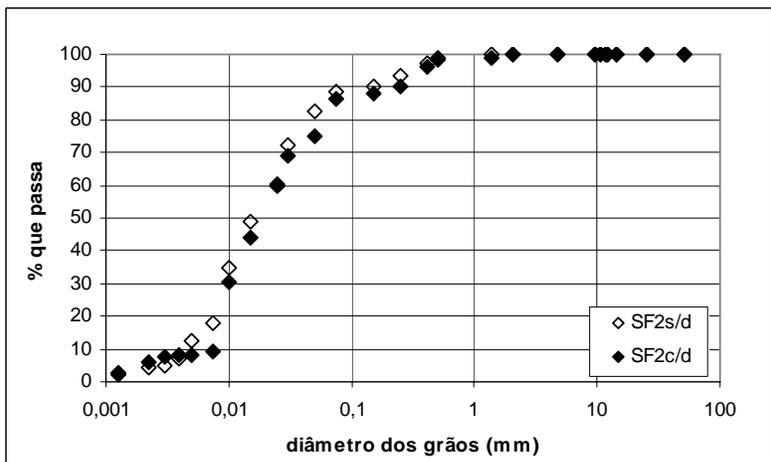


Figura I.12 – Curvas Granulométricas do solo SF2.

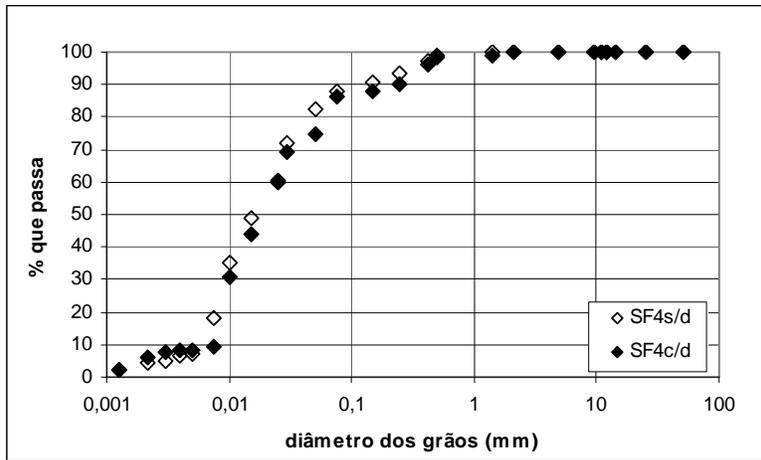


Figura I.13 – Curvas Granulométricas do solo SF4.

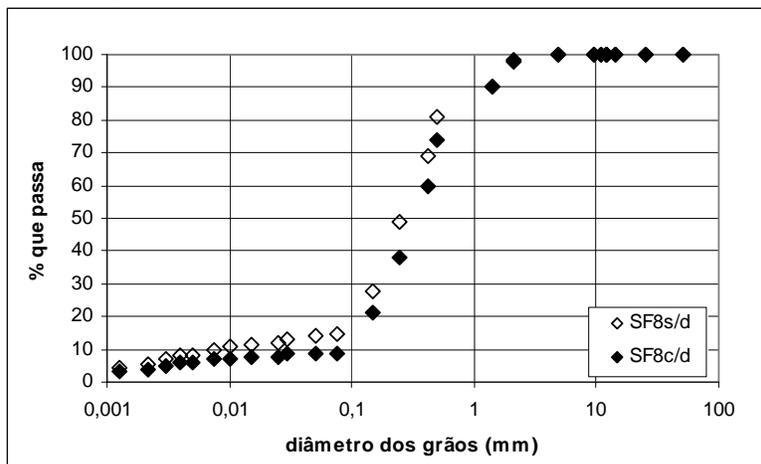


Figura I.14 – Curvas Granulométricas do solo SF8.

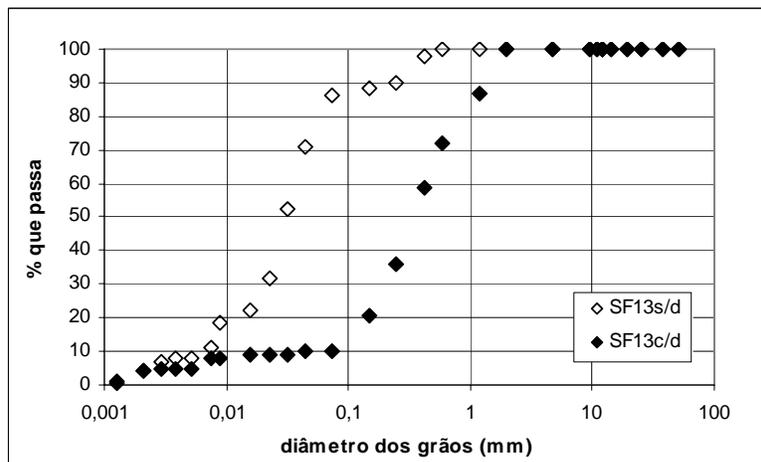


Figura I.15 – Curvas Granulométricas do solo SF13.

## ANEXO II – CURVAS DE COMPACTAÇÃO

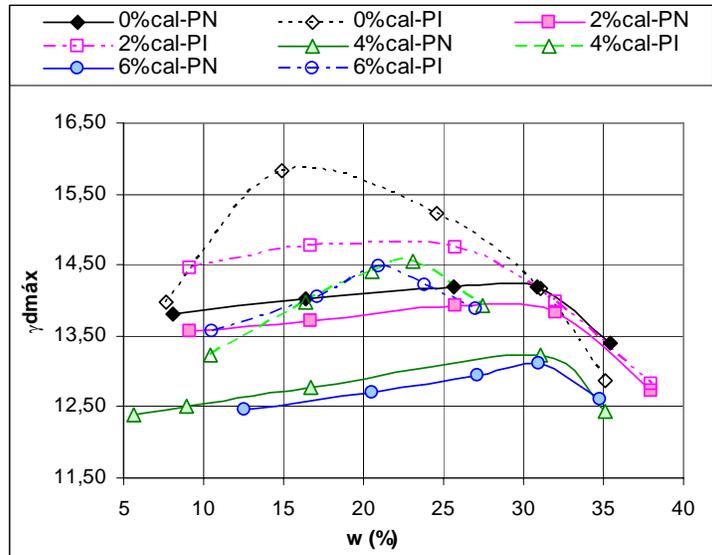


Figura II.1- Mini-compactação do solo HB7

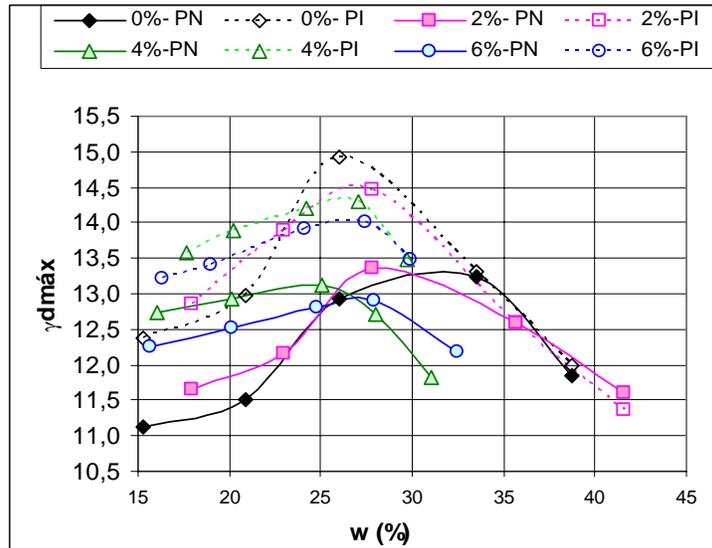


Figura II.2- Mini-compactação do solo HB9b

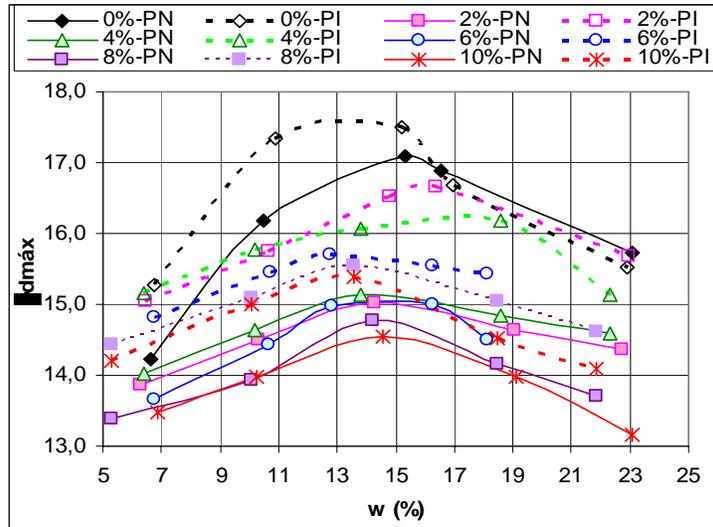


Figura II.3- Mini-compactação do solo HB10

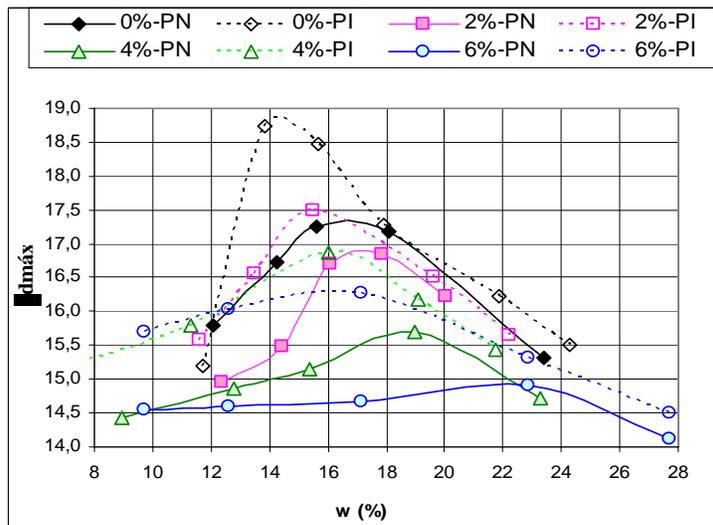


Figura II.4- Mini-compactação do solo HB11

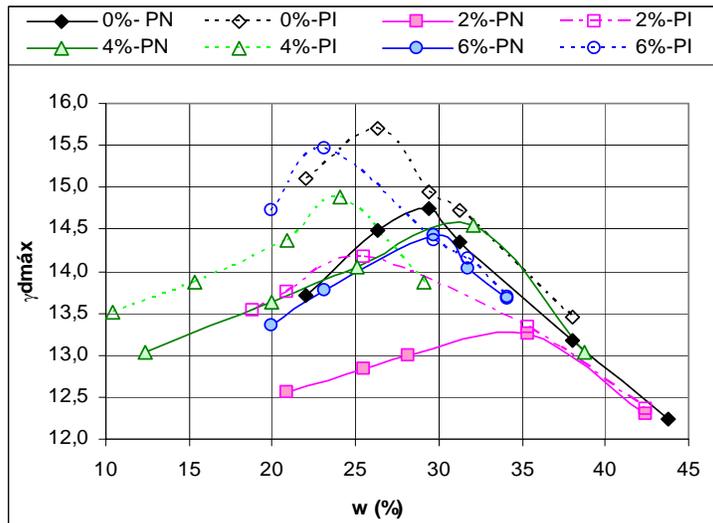


Figura II.5- Mini-compactação do solo HB12

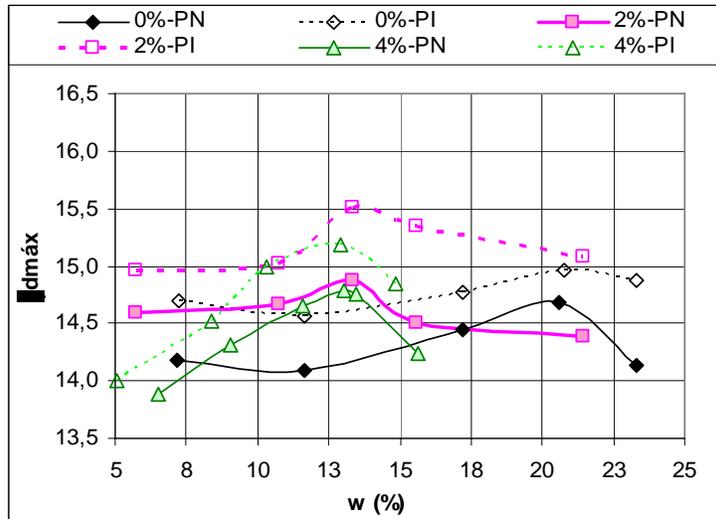


Figura II.6- Mini-compactação do solo ZM3

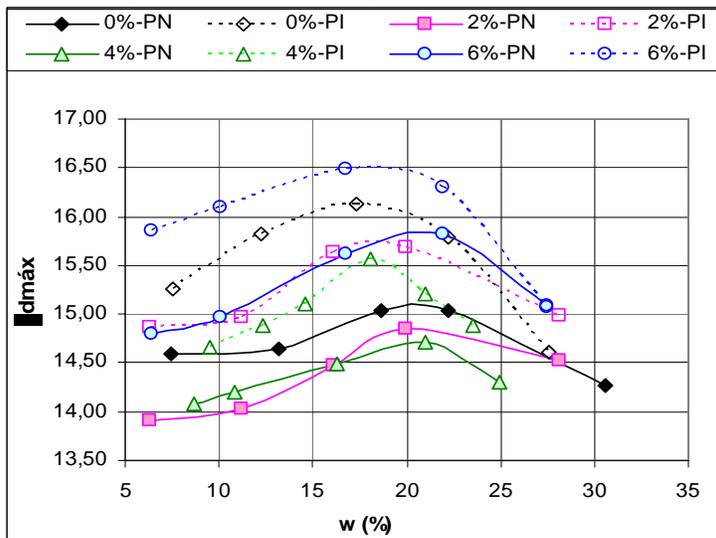


Figura II.7- Mini-compactação do solo ZM6

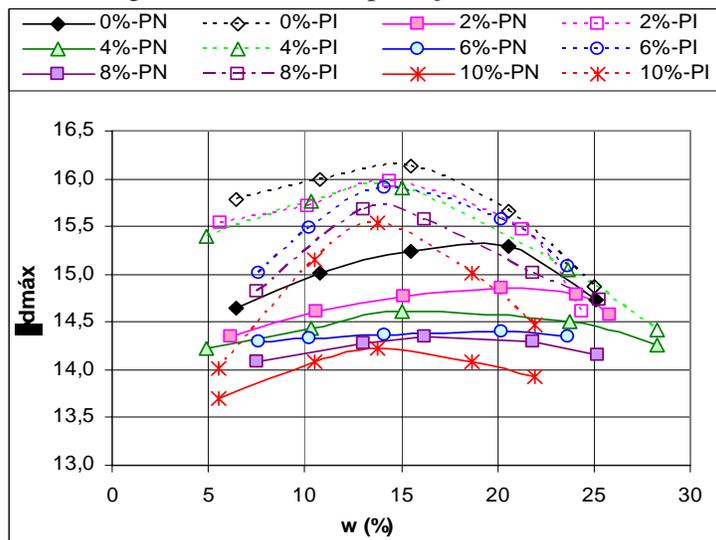


Figura II.8- Mini-compactação do solo SF2

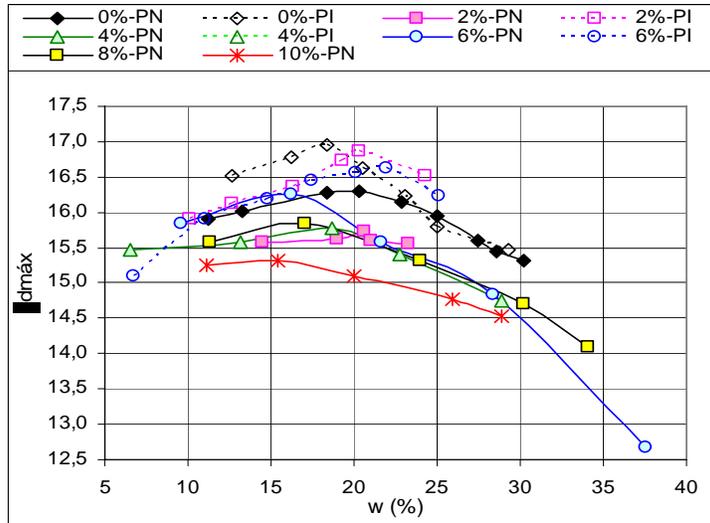


Figura II.9- Mini-compactação do solo SF4

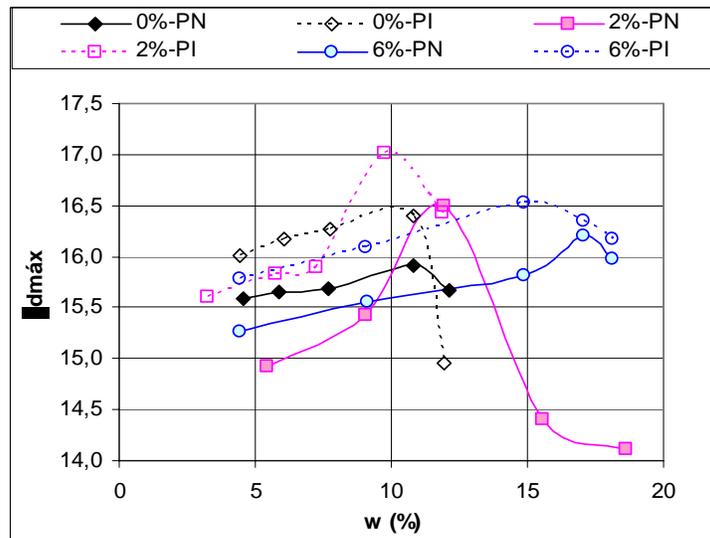


Figura II.10- Mini-compactação do solo SF8

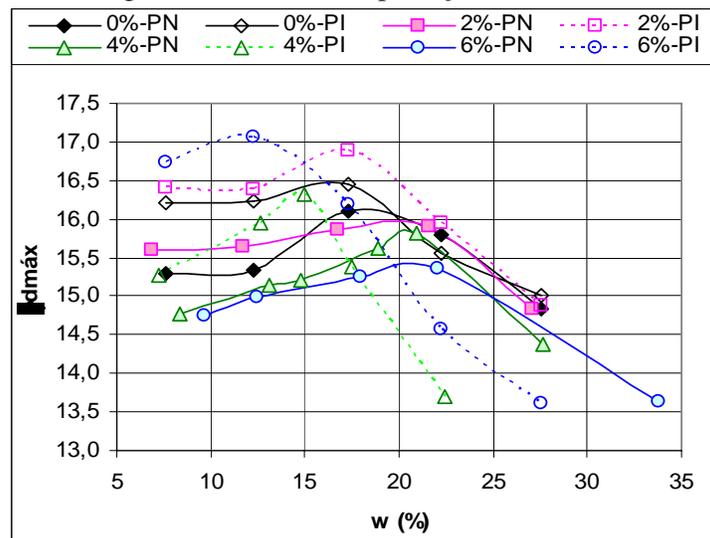


Figura II.11- Mini-compactação do solo SF13

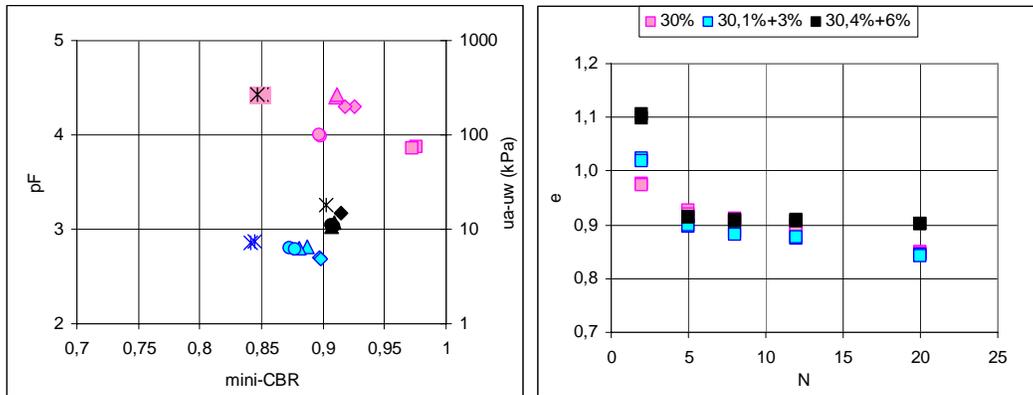


Figura III.4 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR2 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.

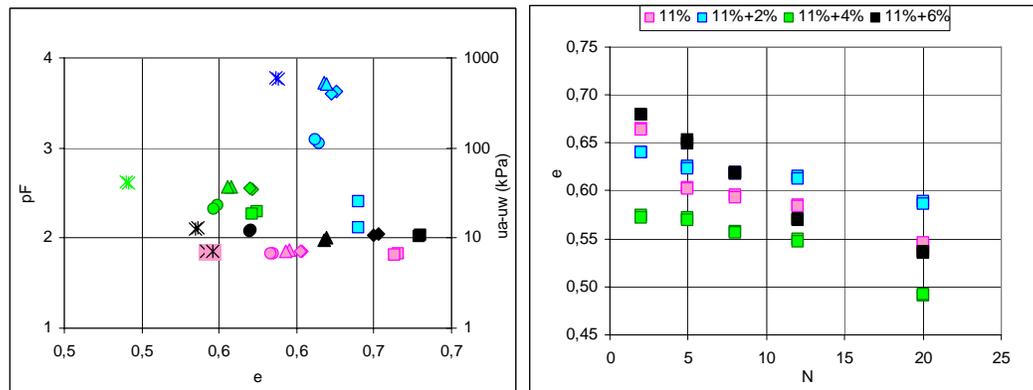


Figura III.5 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo SF8 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.

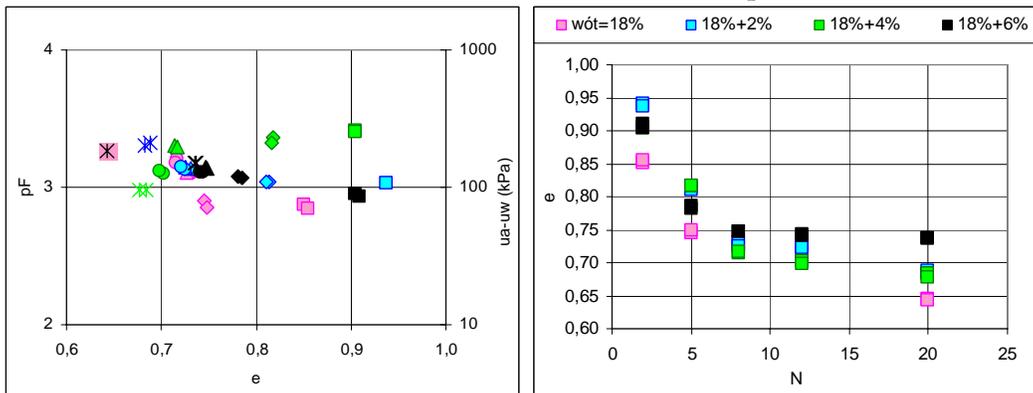


Figura III.6 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo SF13 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.

**ANEXO IV – EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA SUCCÃO E NO ÍNDICE DE VAZIOS PARA DIFERENTES UMIDADES DE COMPACTAÇÃO NOS SOLOS ESTABILIZADOS**

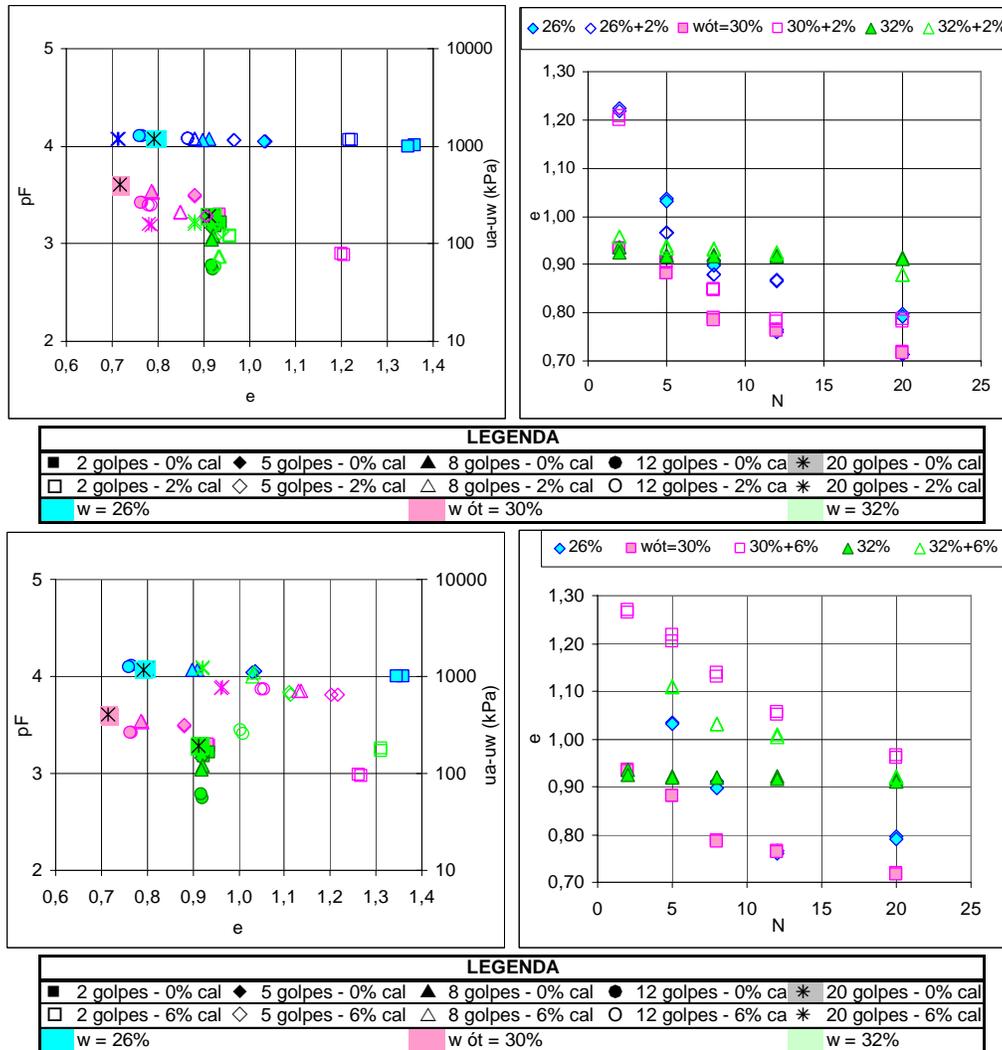


Figura IV.1 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB9b compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.

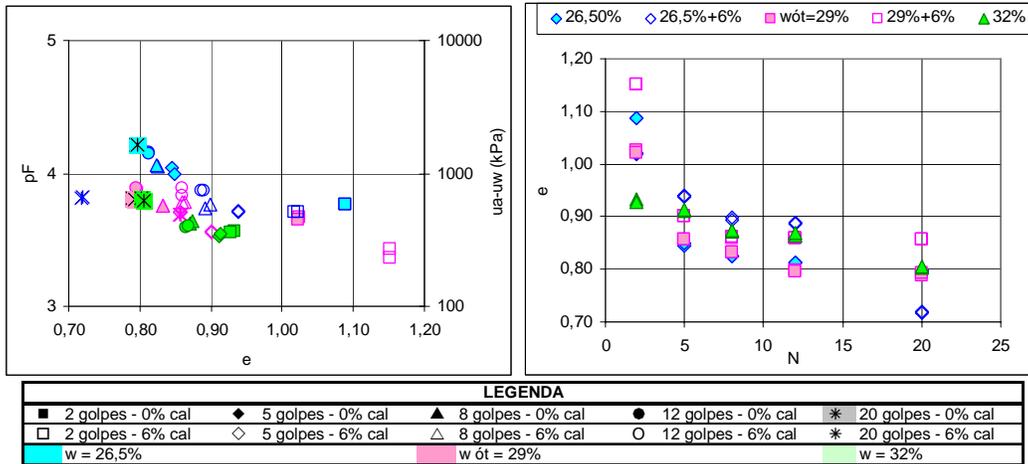


Figura IV.2 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB12 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.

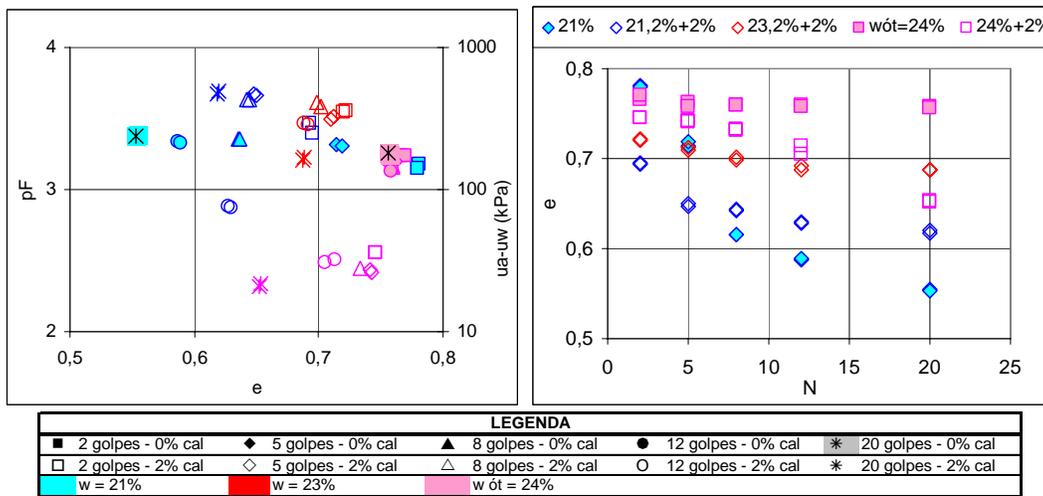


Figura IV.3 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR1 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.

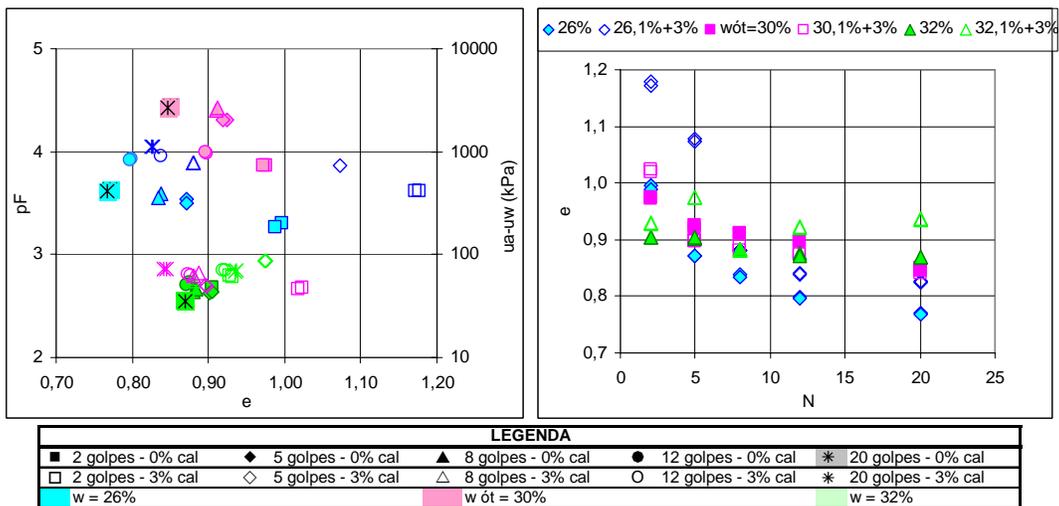


Figura IV.4 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR2 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.

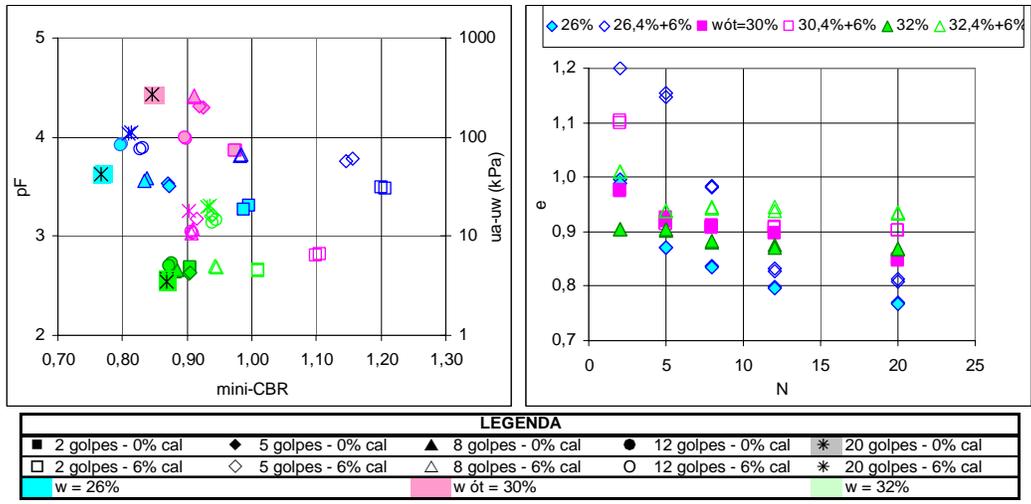


Figura IV.4 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR2 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal – Continuação.

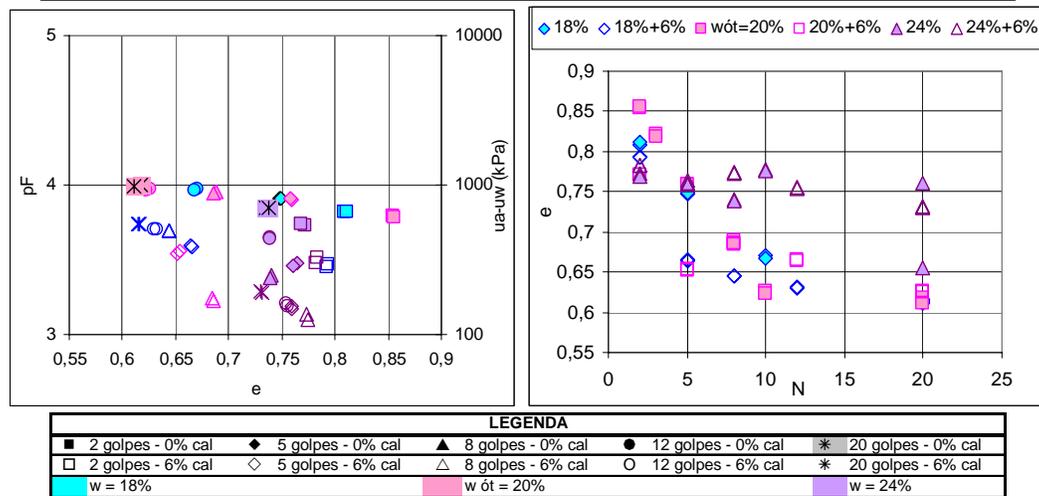
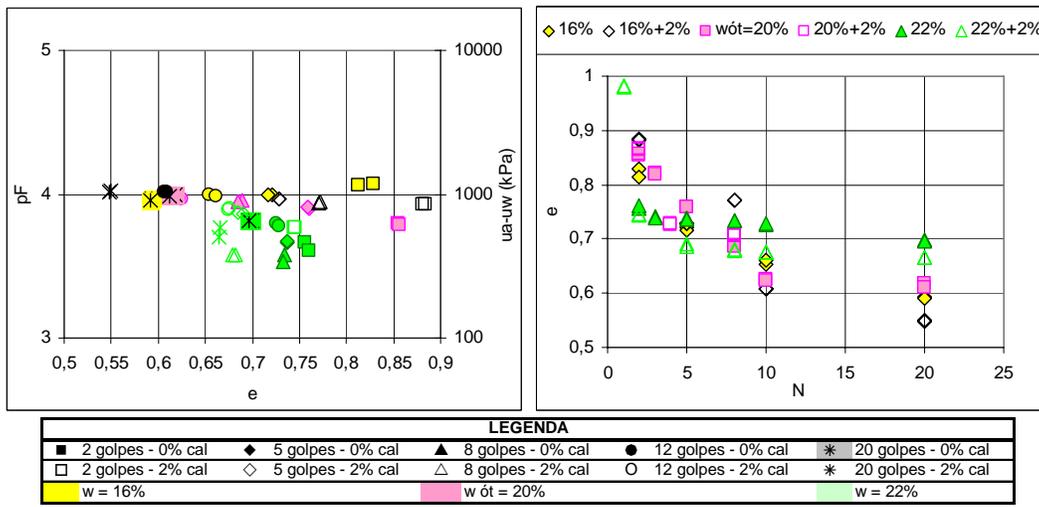


Figura IV.5 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo SF4 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.

**ANEXO III – EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA SUCCÃO E NO ÍNDICE DE VAZIOS PARA A UMIDADE DE COMPACTAÇÃO ÓTIMA DO PROCTOR NORMAL**

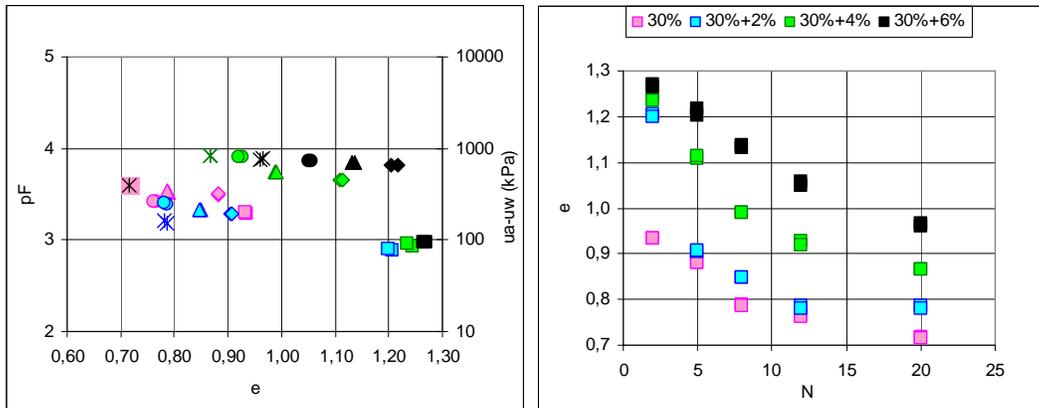


Figura III.1 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB9b compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.

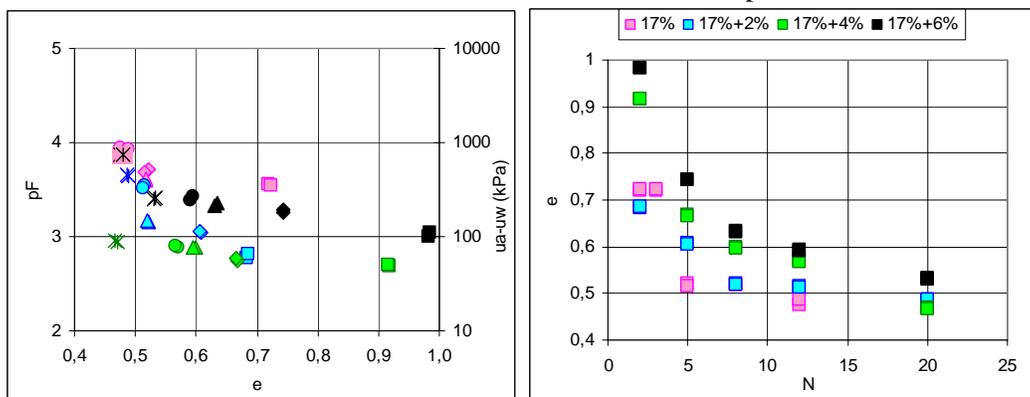


Figura III.2 - Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HB11 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.

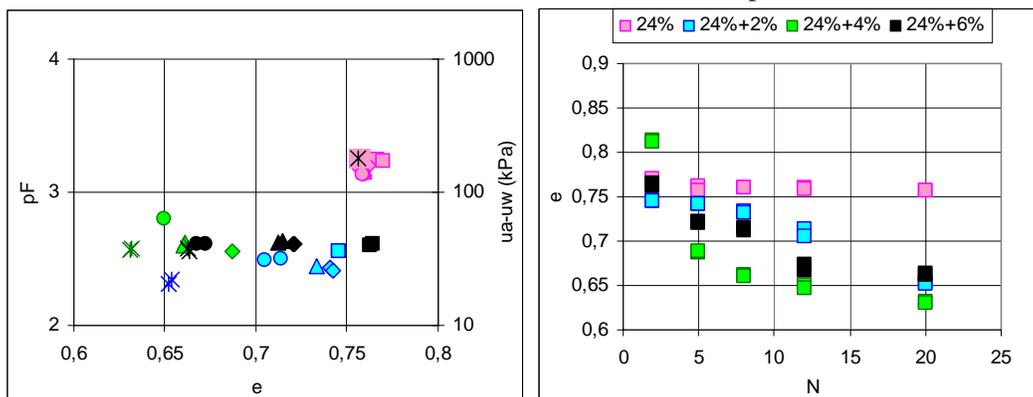


Figura III.3- Curvas “pF x e” e “e x N” para o solo HBR1 compactado no teor de umidade ótima do Proctor Normal e estabilizado com diferentes percentuais de cal.

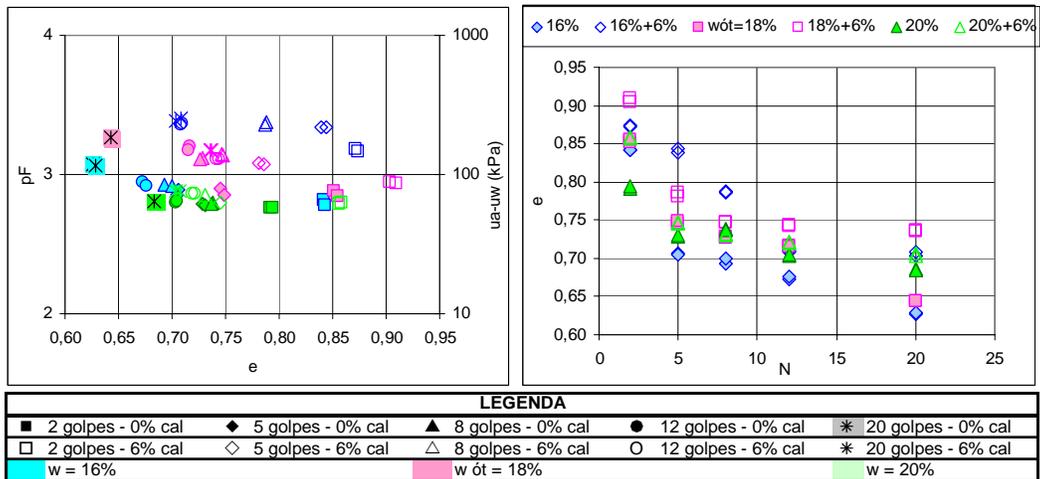
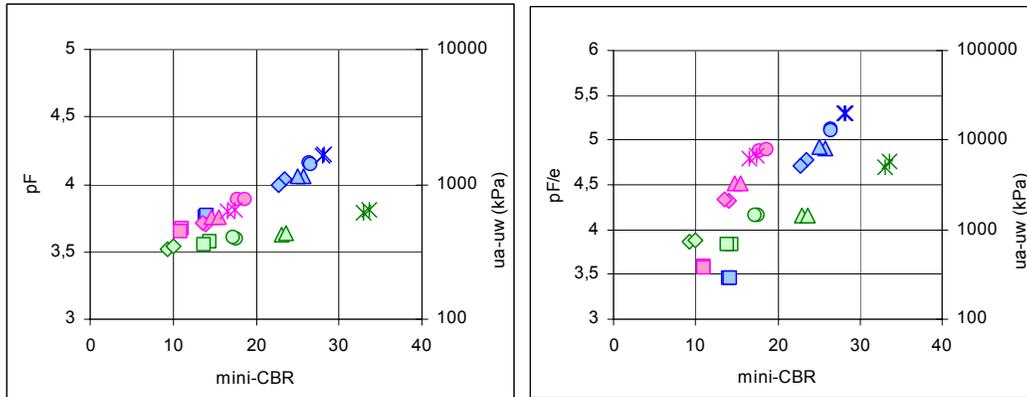


Figura IV.6 - Curvas “ $pF$  x  $e$ ” e “ $e$  x  $N$ ” para o solo SF13 compactado e estabilizado com diferentes teores de umidade e percentuais de cal.



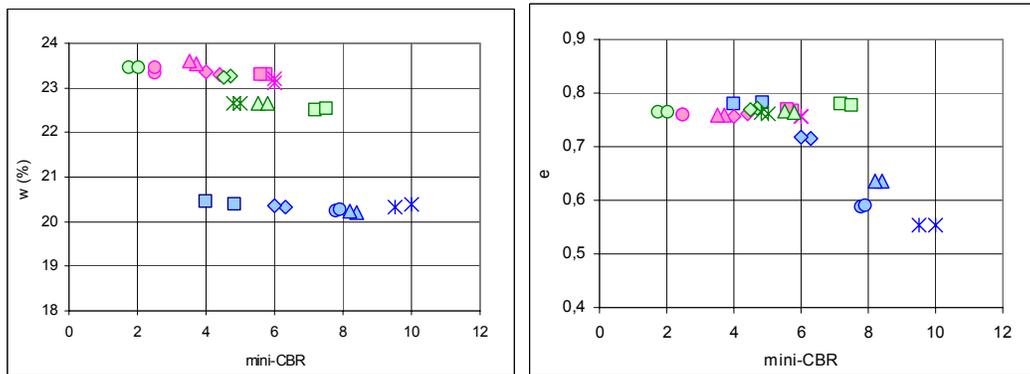


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

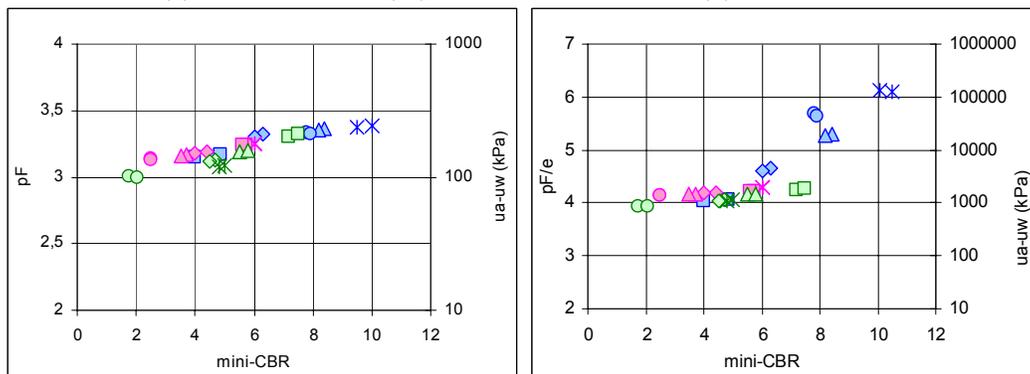
| LEGENDA    |            |            |             |             |  |
|------------|------------|------------|-------------|-------------|--|
| ■ 2 golpes | ◆ 5 golpes | ▲ 8 golpes | ● 12 golpes | * 20 golpes |  |
|            | ■ 26,5%    | ■ wót=29%  | ■ 32%       |             |  |

Figura V.2 - Variação do Mini-CBR para o solo HB12 - Continuação.



(a) mini-CBR x w (%)

(b) mini-CBR x e



(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA    |            |            |             |             |  |
|------------|------------|------------|-------------|-------------|--|
| ■ 2 golpes | ◆ 5 golpes | ▲ 8 golpes | ● 12 golpes | * 20 golpes |  |
|            | ■ 21%      | ■ wót=24%  | ■ 26%       |             |  |

Figura V.3 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR1.

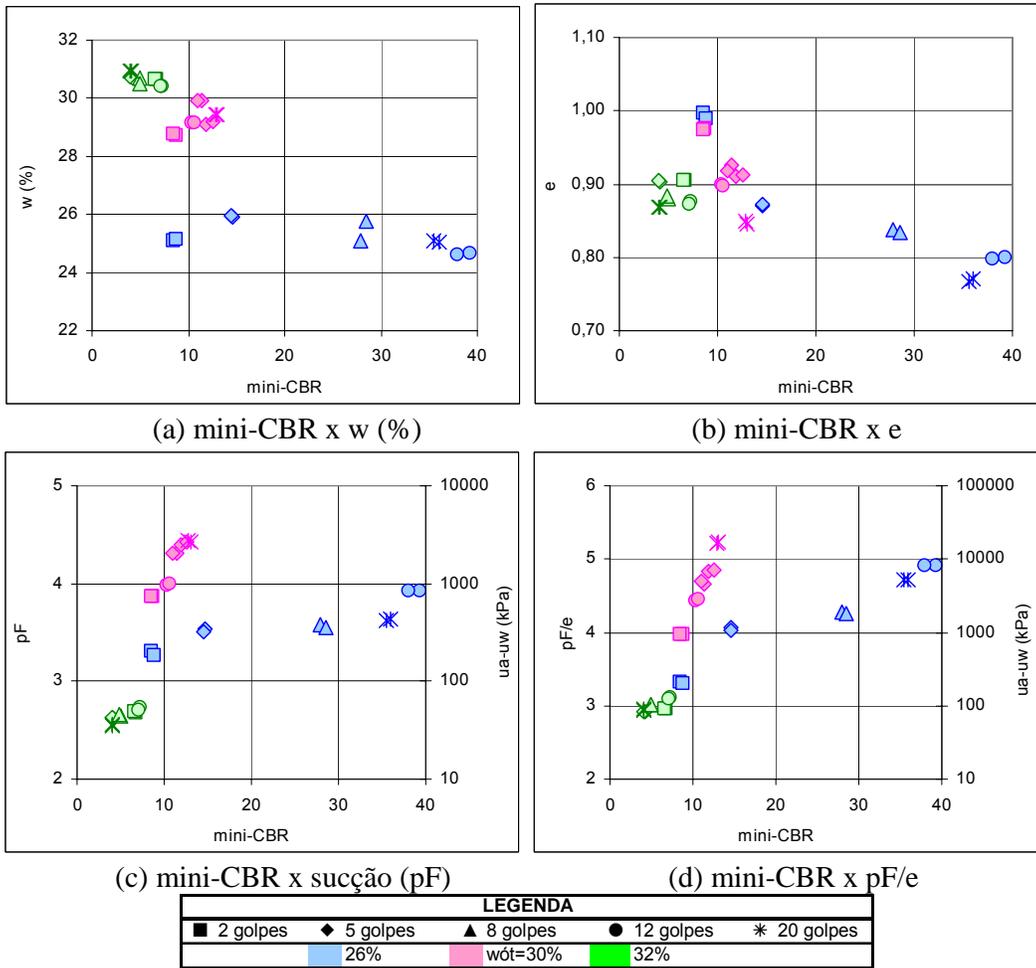


Figura V.4 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR2.

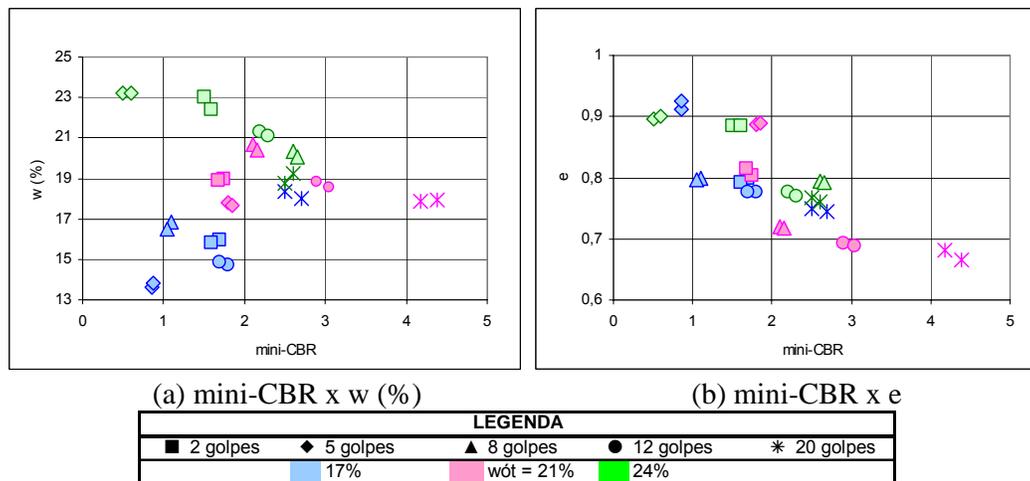
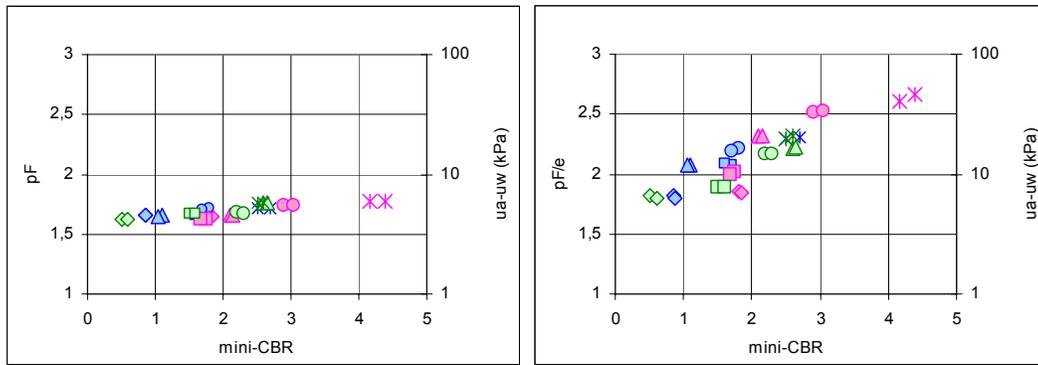


Figura V.5- Variação do Mini-CBR para o solo ZM3.

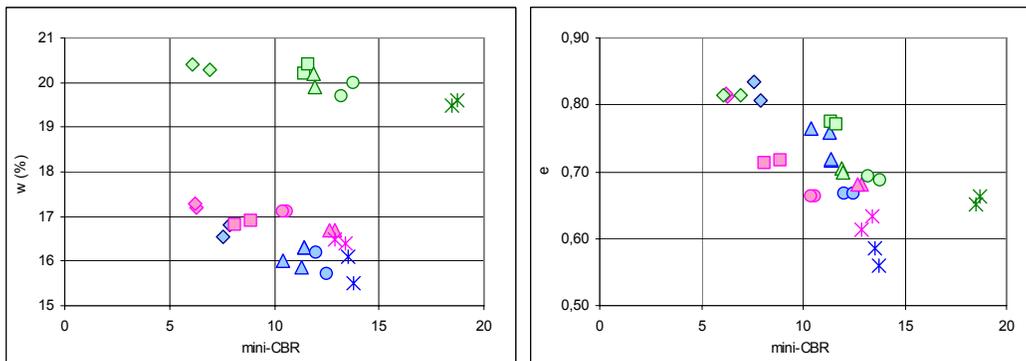


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

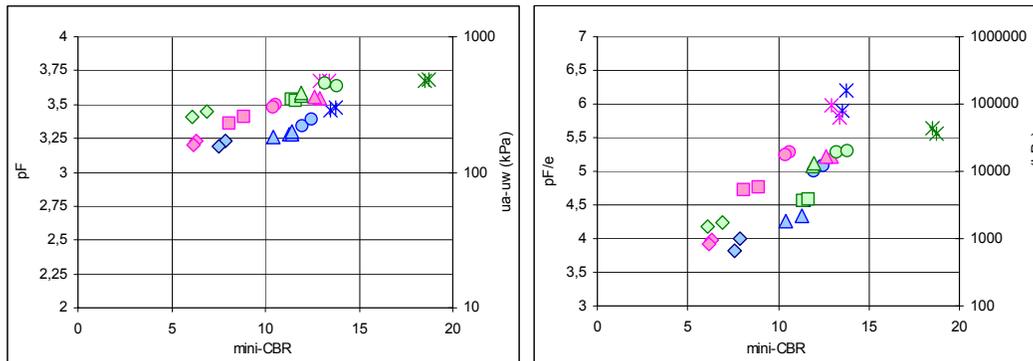
| LEGENDA    |            |             |             |             |
|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| ■ 2 golpes | ◆ 5 golpes | ▲ 8 golpes  | ● 12 golpes | * 20 golpes |
|            | ■ 17%      | ■ wót = 21% | ■ 24%       |             |

Figura V.5 - Variação do Mini-CBR para o solo ZM3 - Continuação.



(a) mini-CBR x w (%)

(b) mini-CBR x e



(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA    |            |             |             |             |
|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| ■ 2 golpes | ◆ 5 golpes | ▲ 8 golpes  | ● 12 golpes | * 20 golpes |
|            | ■ 17%      | ■ wót = 19% | ■ 21%       |             |

Figura V.6 - Variação do Mini-CBR para o solo SF2.

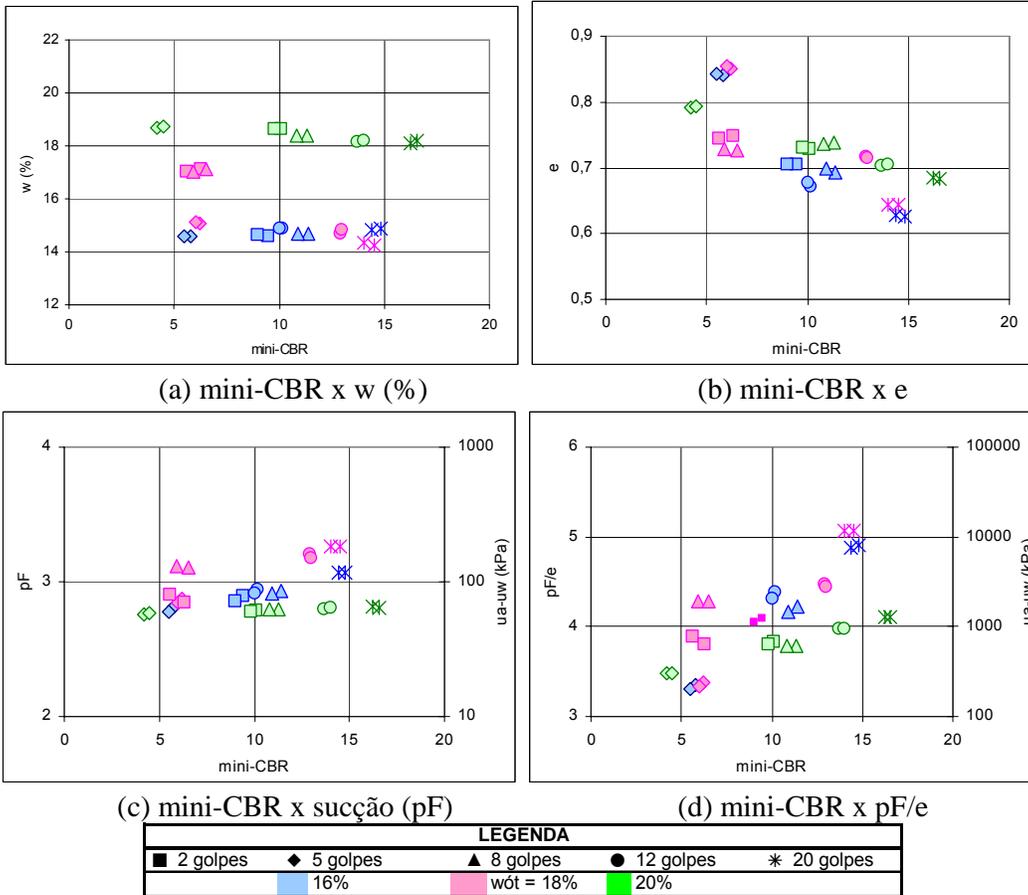


Figura V.7- Variação do Mini-CBR para o solo SF13.

**ANEXO VI – EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA SUCCÃO E NO ÍNDICE DE VAZIOS PARA SOLOS ESTABILIZADOS E COMPACTADOS NO TEOR ÓTIMO DE UMIDADE DA ENERGIA PROCTOR NORMAL**

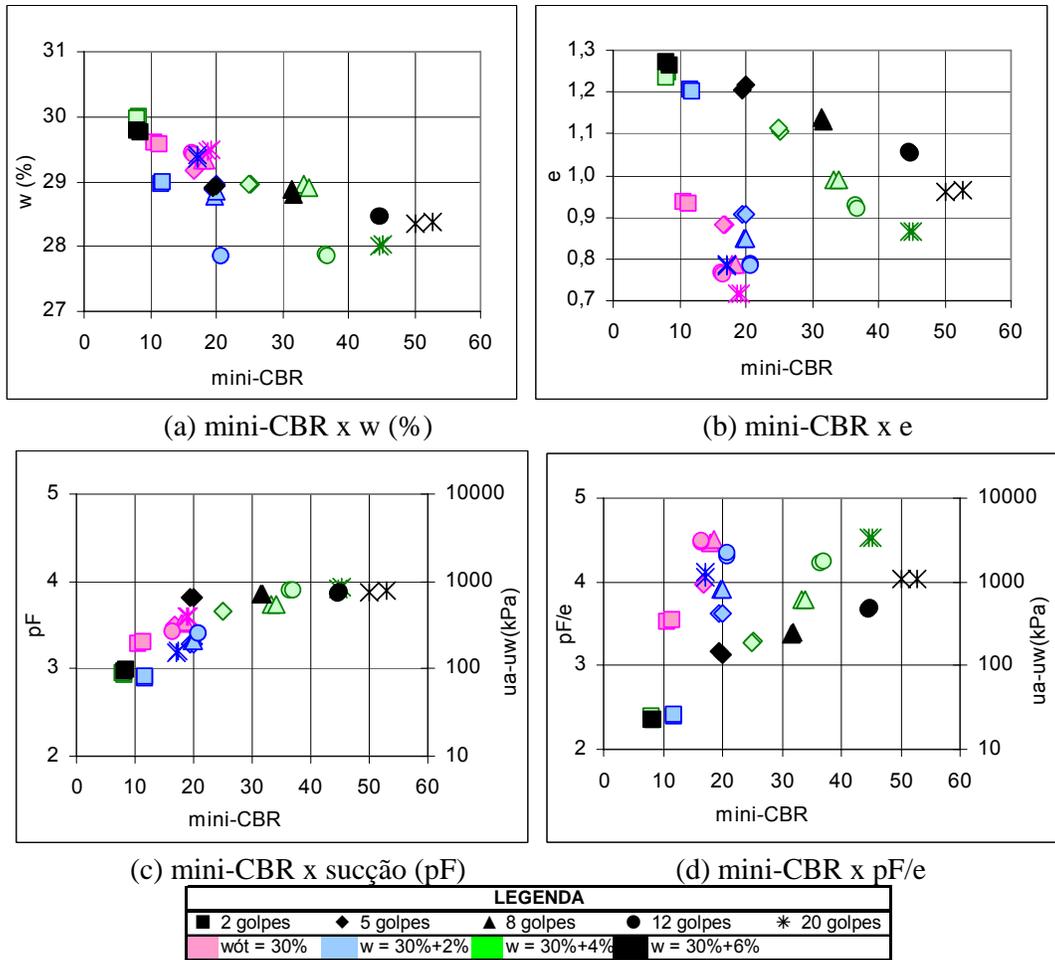


Figura VI.1 - Variação do mini-CBR para o solo HB9b.

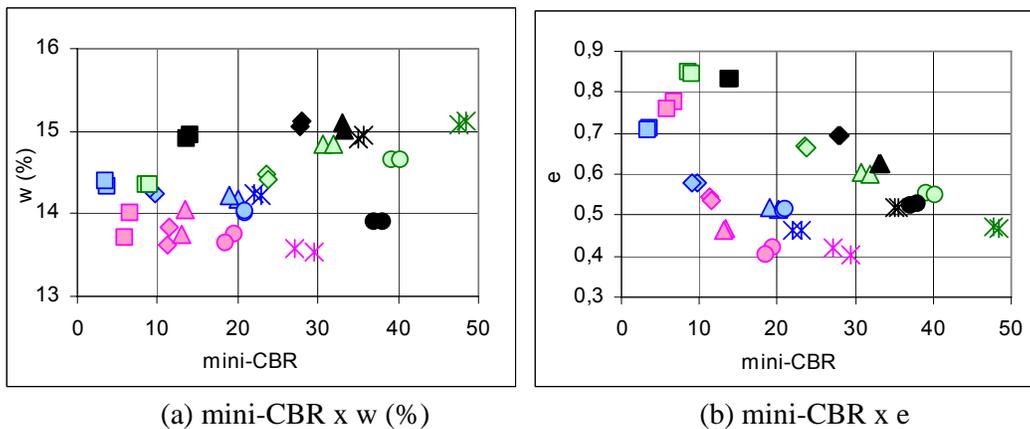
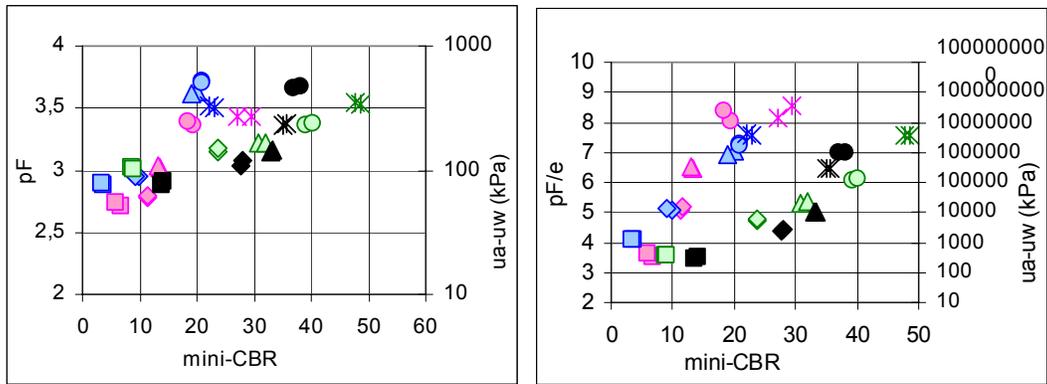


Figura VI.2 - Variação do mini-CBR para o solo HB10.

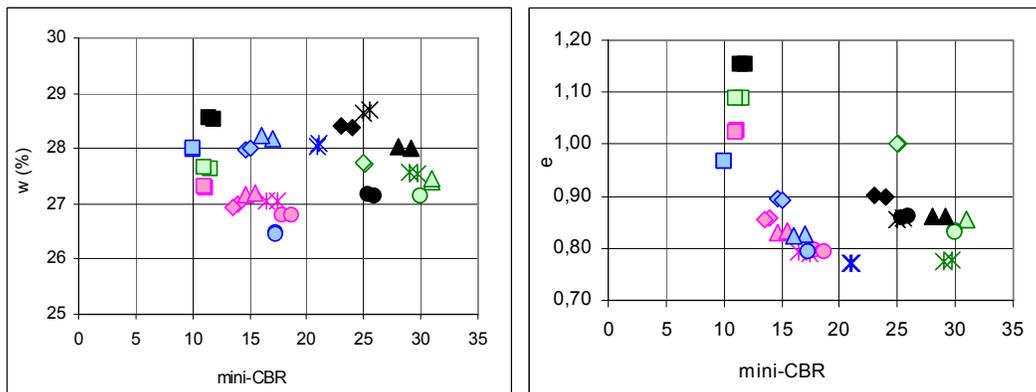


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

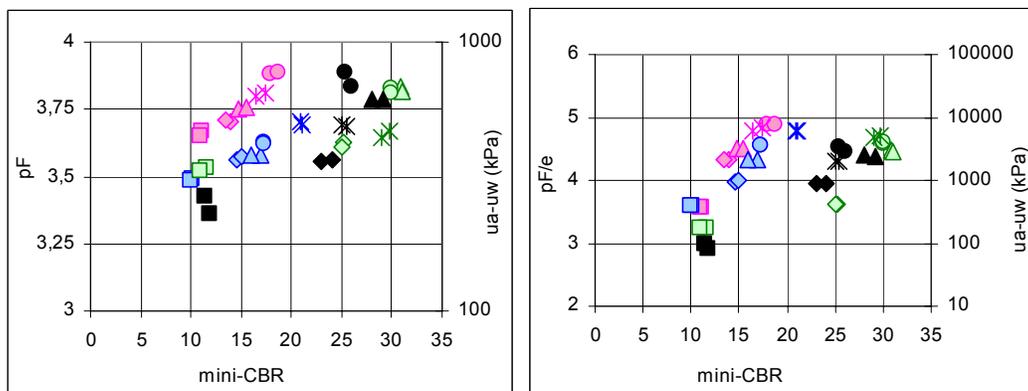
| LEGENDA       |                |                |                |             |
|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| ■ 2 golpes    | ◆ 5 golpes     | ▲ 8 golpes     | ● 12 golpes    | * 20 golpes |
| ■ wót = 15,5% | ■ w = 15,5%+2% | ■ w = 15,5%+4% | ■ w = 15,5%+6% |             |

Figura VI.2 - Variação do mini-CBR para o solo HB10 - Continuação.



(a) mini-CBR x w (%)

(b) mini-CBR x e



(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 29% | ■ w = 29%+2% | ■ w = 29%+4% | ■ w = 29%+6% |             |

Figura VI.3 - Variação do mini-CBR para o solo HB12.

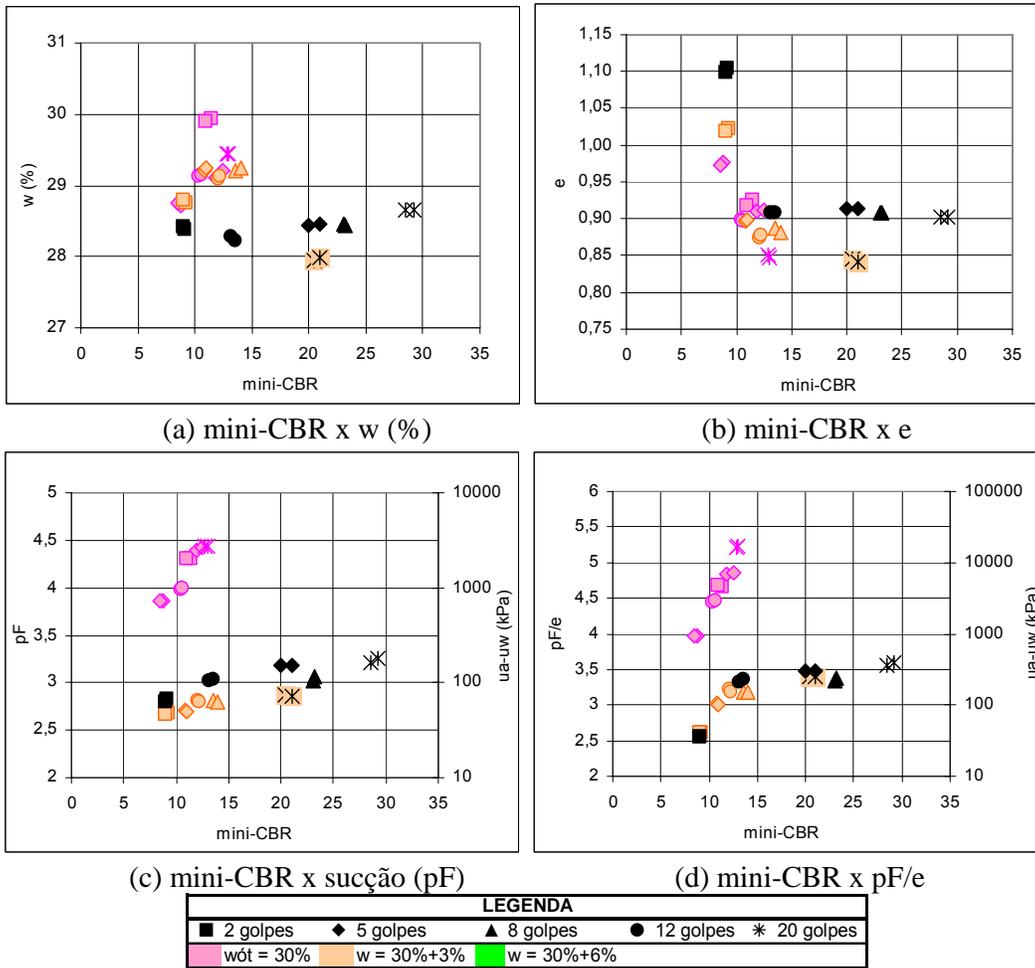


Figura VI.4 - Variação do mini-CBR para o solo HBR2.

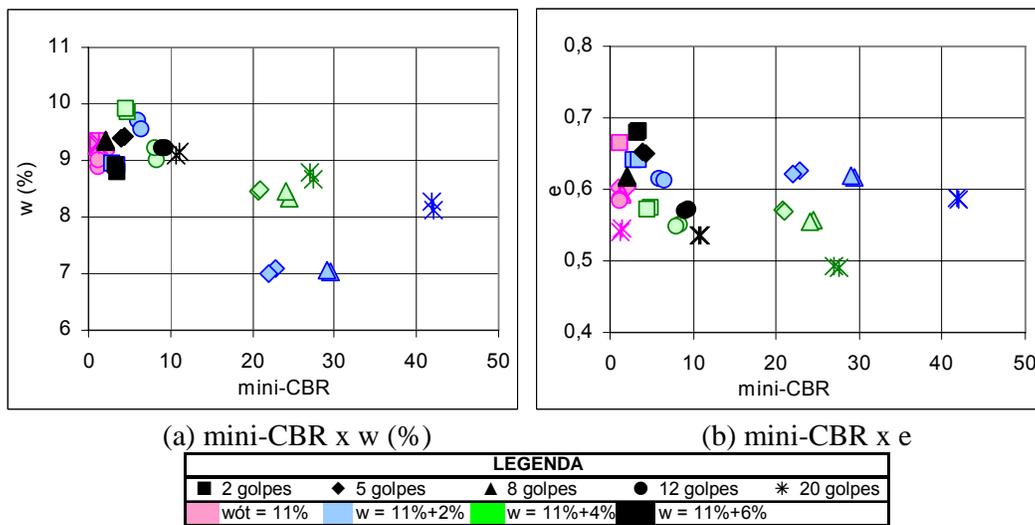
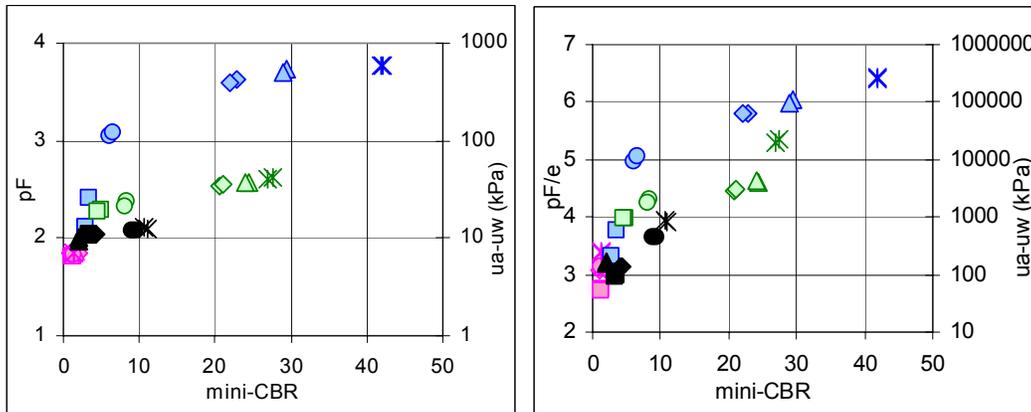


Figura VI.5 - Variação do mini-CBR para o solo SF8.

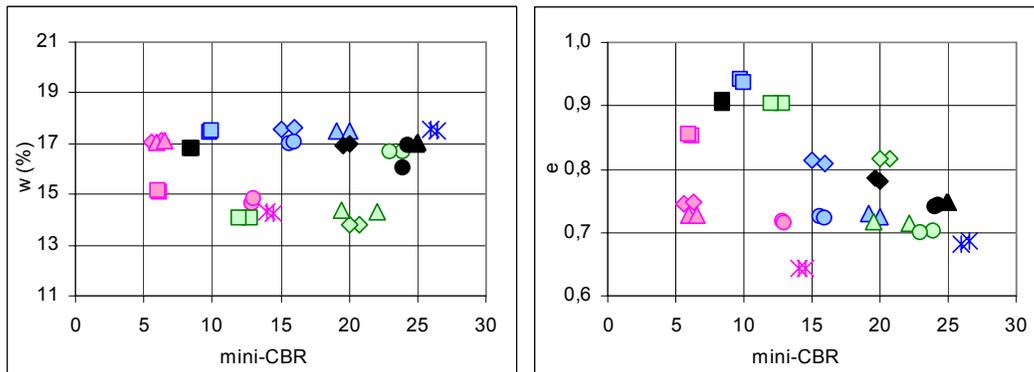


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

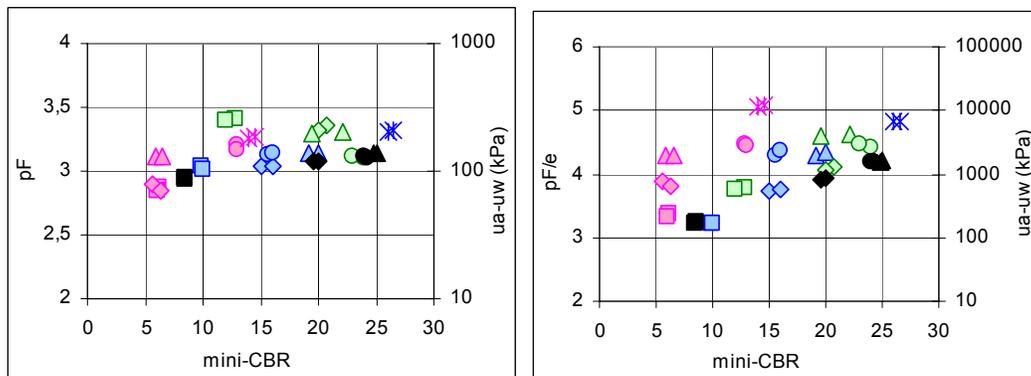
| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 11% | ■ w = 11%+2% | ■ w = 11%+4% | ■ w = 11%+6% |             |

Figura VI.5 - Variação do mini-CBR para o solo SF8 - Continuação.



(a) mini-CBR x w (%)

(b) mini-CBR x e



(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA     |              |              |              |             |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| ■ 2 golpes  | ◆ 5 golpes   | ▲ 8 golpes   | ● 12 golpes  | * 20 golpes |
| ■ wót = 18% | ■ w = 18%+2% | ■ w = 18%+4% | ■ w = 18%+6% |             |

Figura VI.6 - Variação do mini-CBR para o solo SF13.

**ANEXO VII – EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO NA RESISTENCIA A PENETRAÇÃO DOS SOLOS COMPACTADOS NO TEOR ÓTIMO DE UMIDADE E ENSAIADOS NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA**

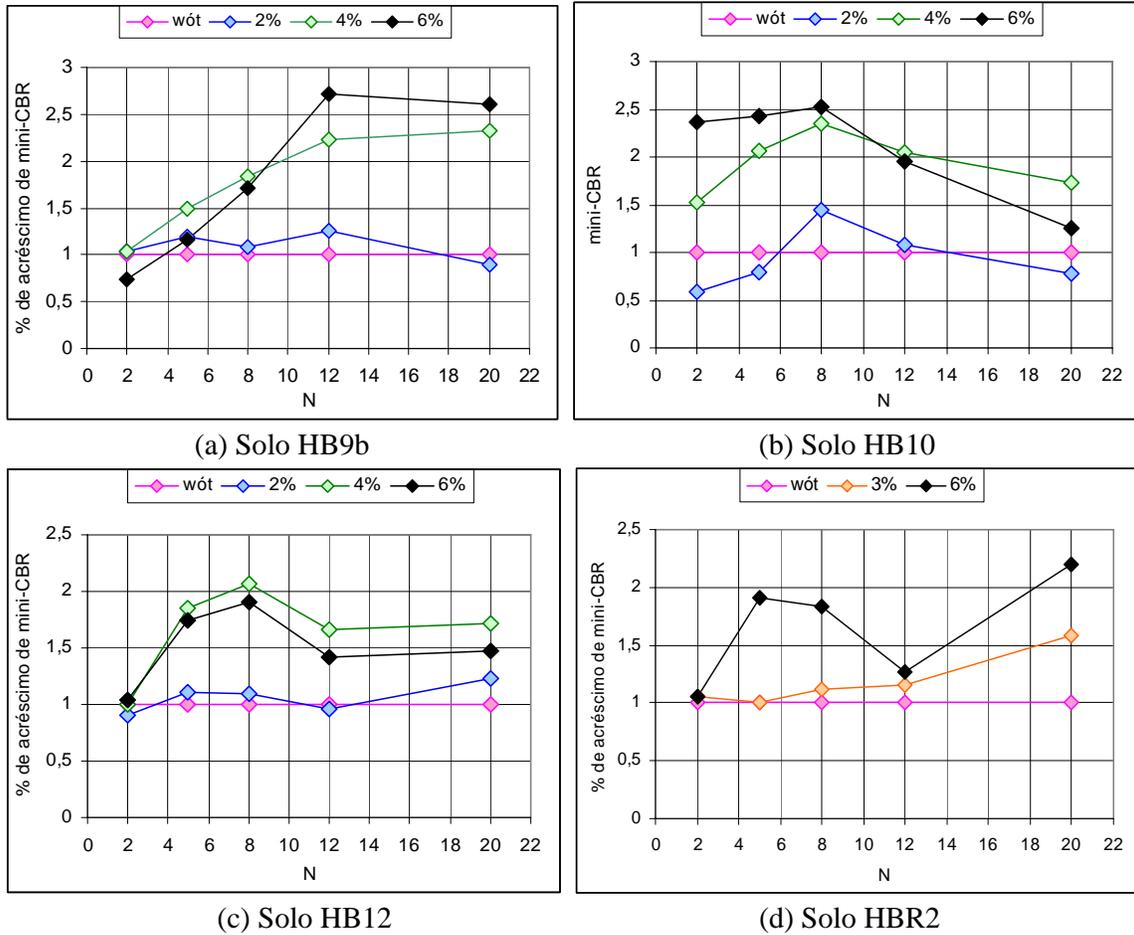


Figura VII.1- Acréscimo de Mini-CBR com a estabilização para os solos HB.

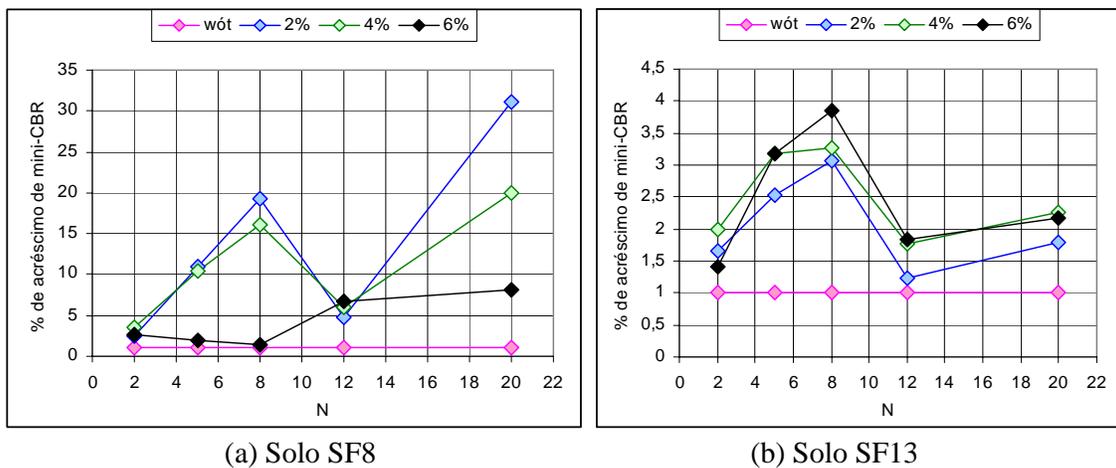
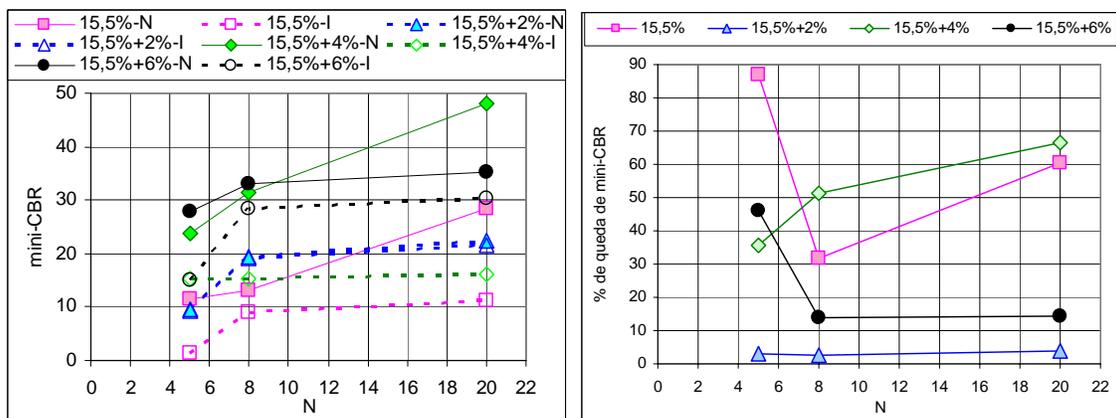
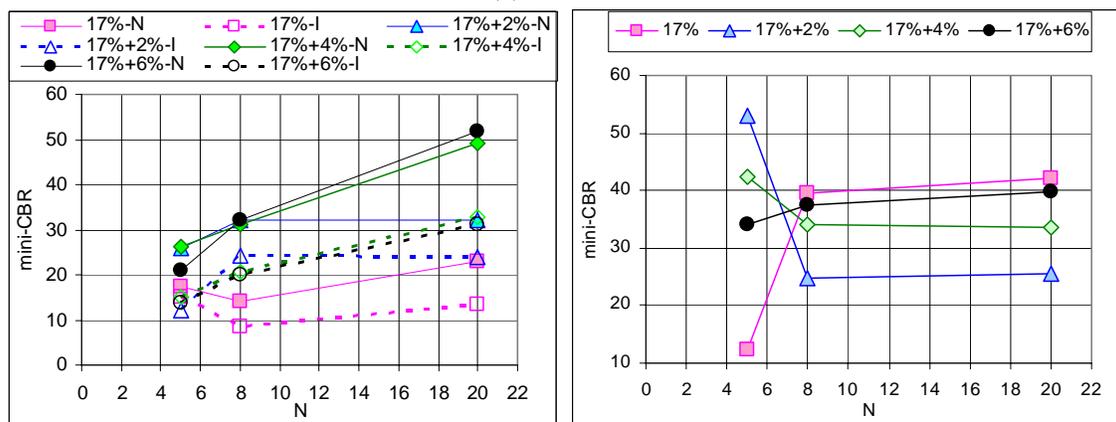


Figura VII.2- Acréscimo de Mini-CBR com a estabilização para os solos SF.

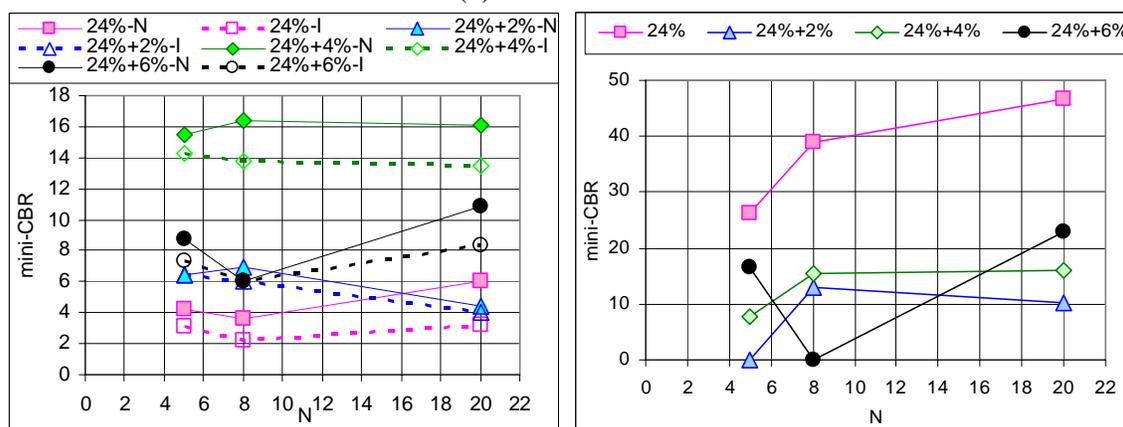
## ANEXO VIII – EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO NA RESISTENCIA A PENETRAÇÃO PARA OS SOLOS COMPACTADOS NO TEOR ÓTIMO DE UMIDADE E ENSAIADOS NA CONDIÇÃO SATURADA



(a) Solo HB10

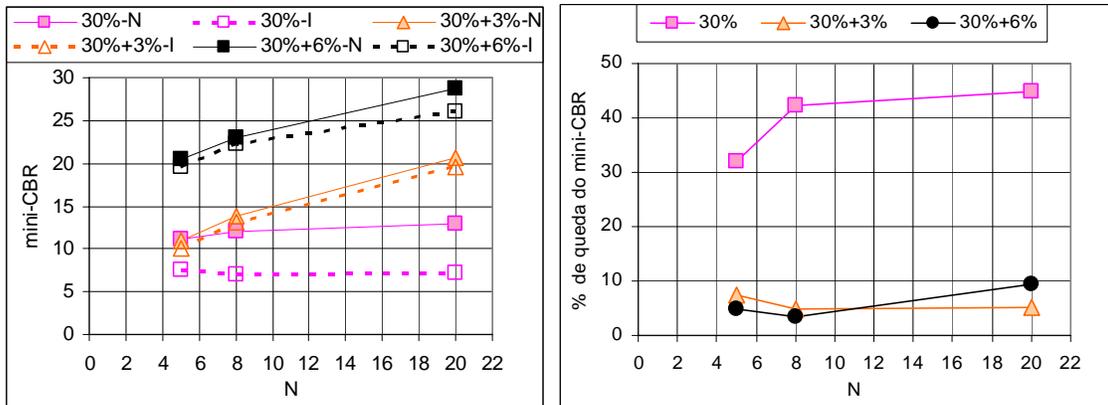


(b) Solo HB11



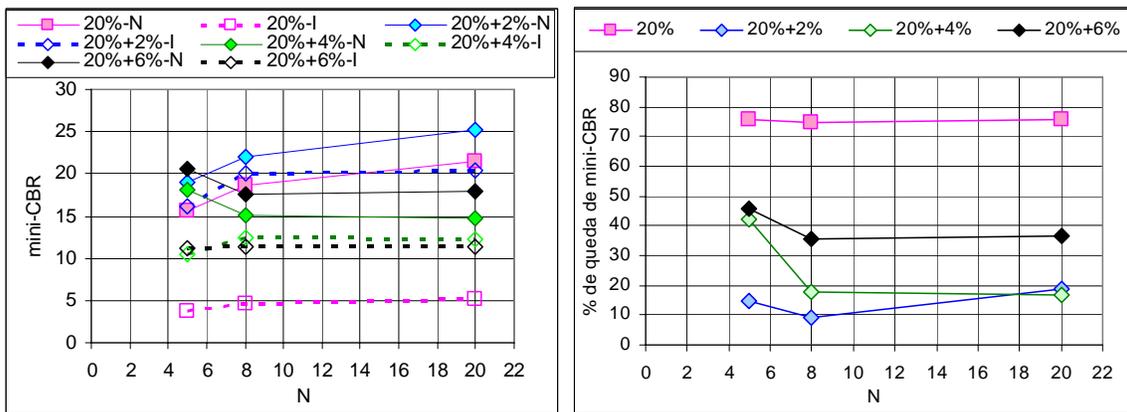
(c) Solo HBR1

Figura VIII.1- Decréscimo de mini-CBR com a estabilização para os solos HB.

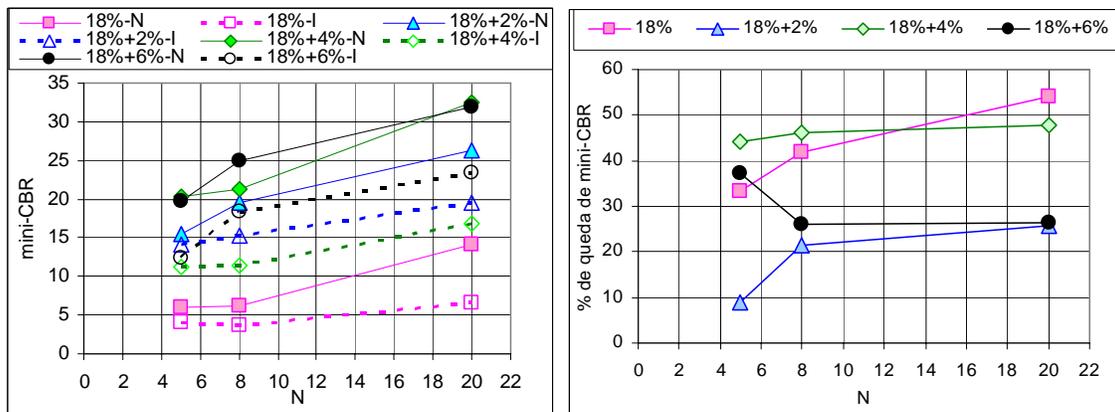


(d) Solo HBR2

Figura VIII.1- Decréscimo de mini-CBR com a estabilização para os solos HB - Continuação.



(a) Solo SF4



(b) Solo SF13

Figura VIII.2 - Decréscimo de mini-CBR com a estabilização para os solos SF.

**ANEXO IX – EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO  
PARA OS SOLOS COMPACTADOS EM DIFERENTES TEORES DE UMIDADE,  
ESTABILIZADOS E ENSAIADOS NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA.**

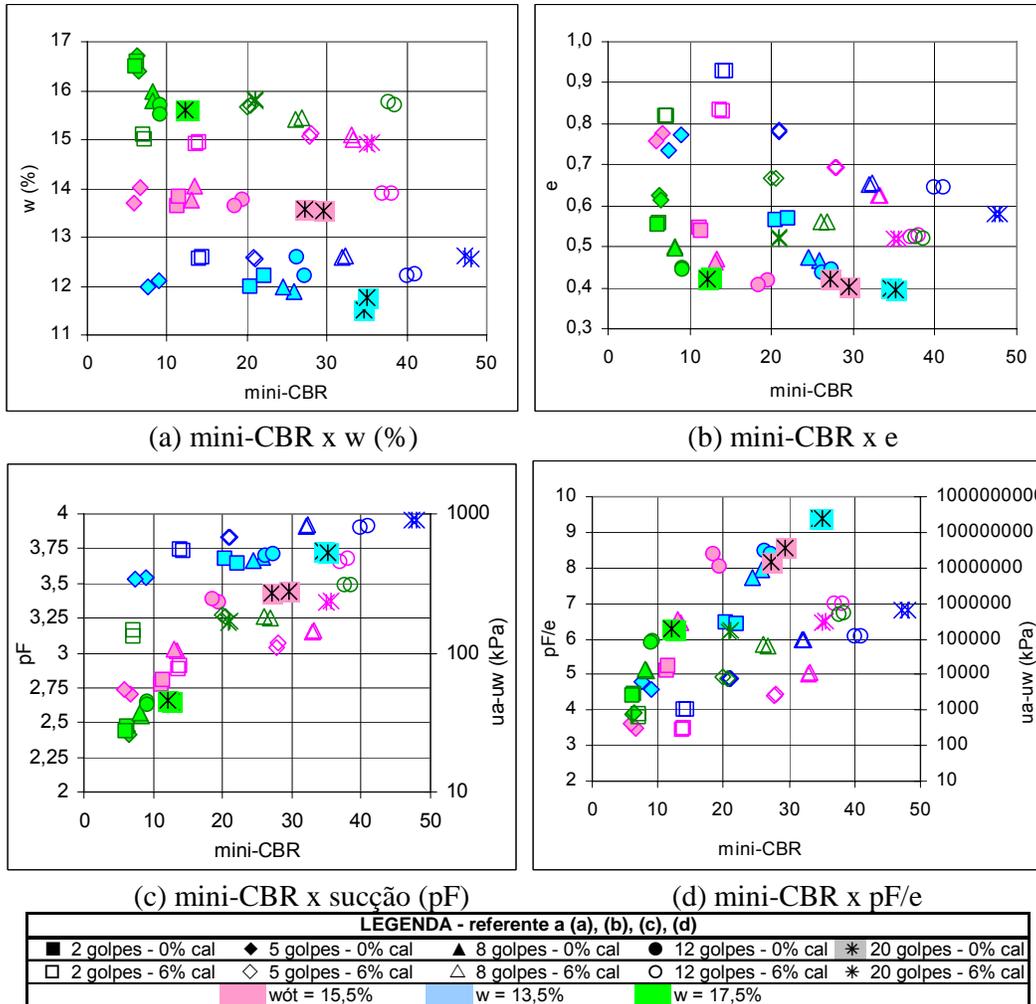
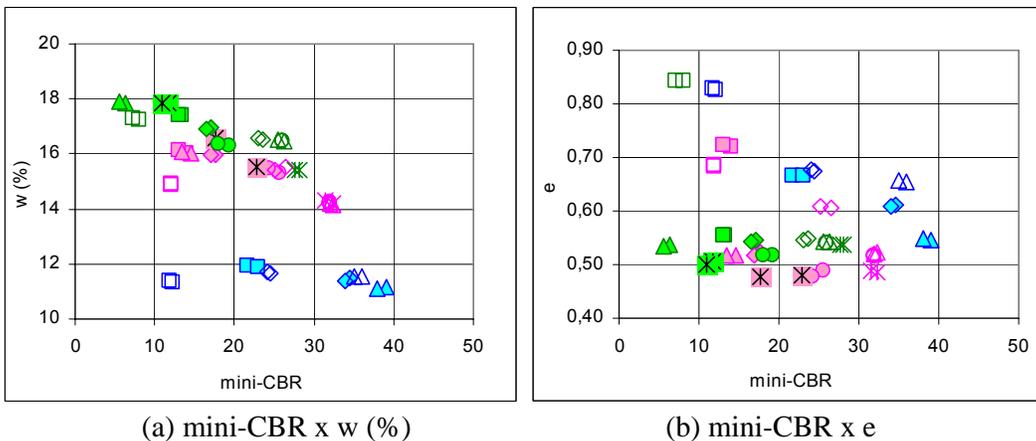
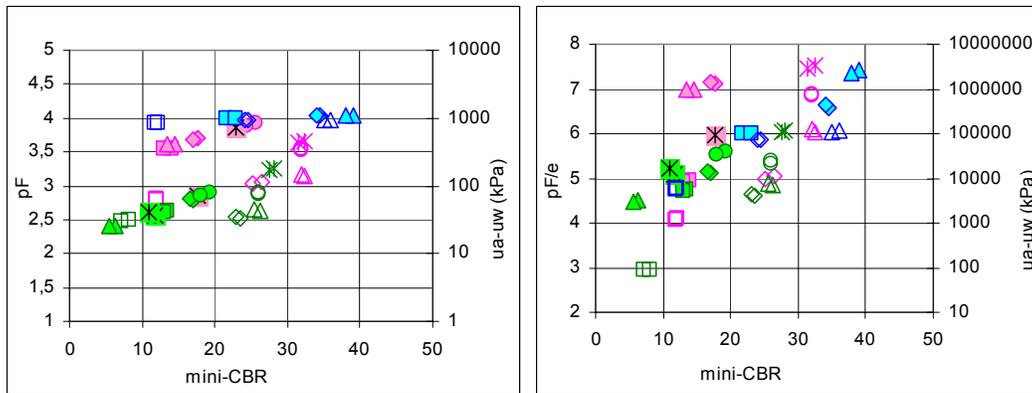


Figura IX.1 - Variação do mini-CBR para o solo HB10.

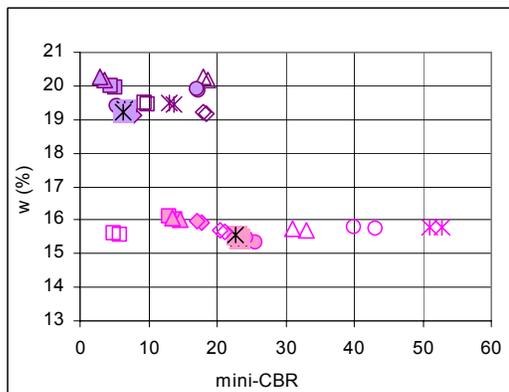




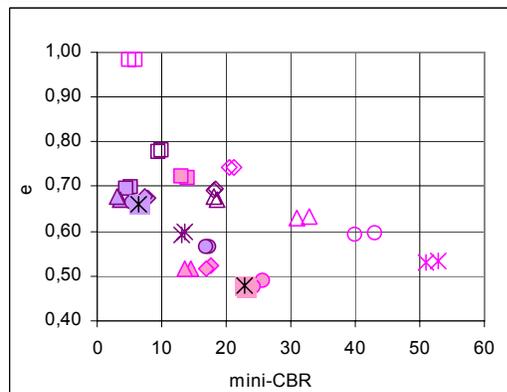
(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

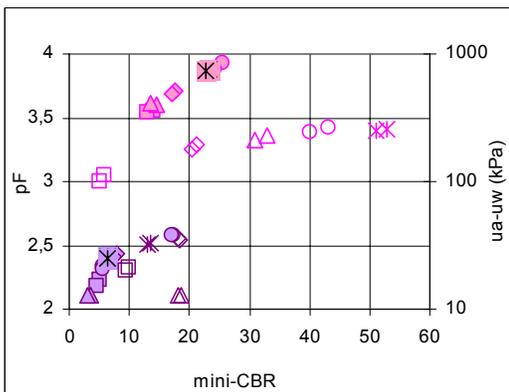
| LEGENDA - referente a (a), (b), (c), (d) |   |         |   |         |                    |
|--|---|---------|---|---------|--------------------|
| ■  | ◆ | ▲       | ● | *       | 20 golpes - 0% cal |
| □  | ◇ | △       | ○ | *       | 20 golpes - 2% cal |
| wót = 17%                                |   | w = 13% |   | w = 19% |                    |



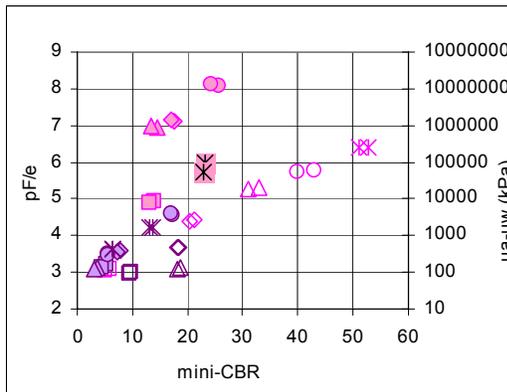
(e) mini-CBR x w (%)



(f) mini-CBR x e



(g) mini-CBR x sucção (pF)



(h) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA - referente a (e), (f), (g), (h) |   |         |   |   |                    |
|--|---|---------|---|---|--------------------|
| ■  | ◆ | ▲       | ● | * | 20 golpes - 0% cal |
| □  | ◇ | △       | ○ | * | 20 golpes - 6% cal |
| wót = 17%                                |   | w = 21% |   |   |                    |

Figura IX.2 - Variação do mini-CBR para o solo HB11.

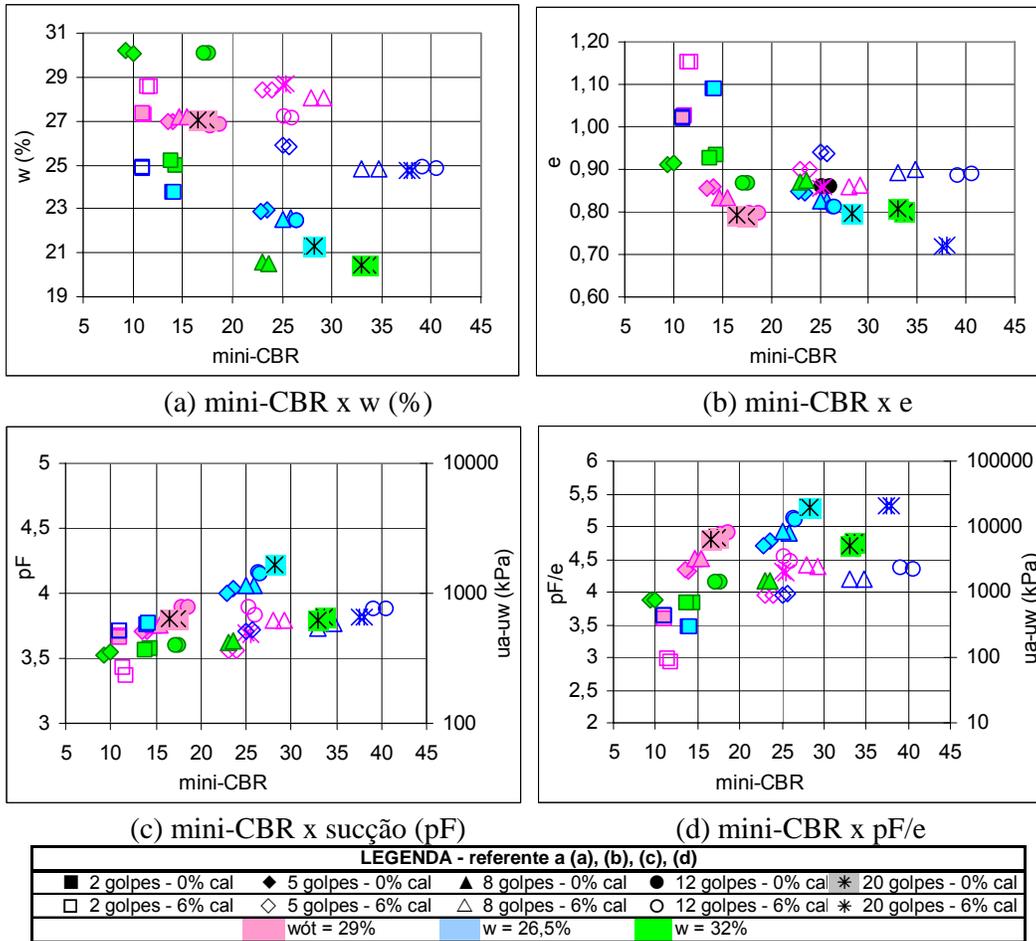


Figura IX.3 - Variação do mini-CBR para o solo HB12.

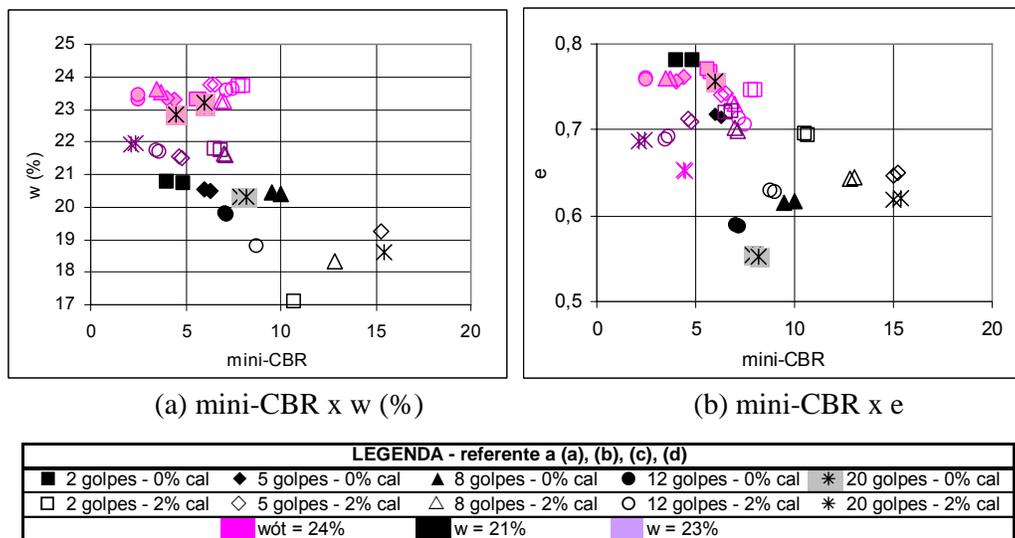
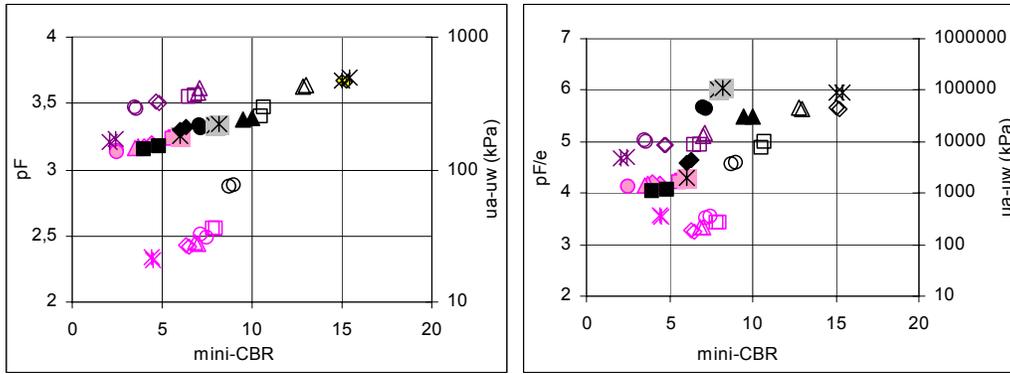


Figura IX.4 - Variação do mini-CBR para o solo HBR1.

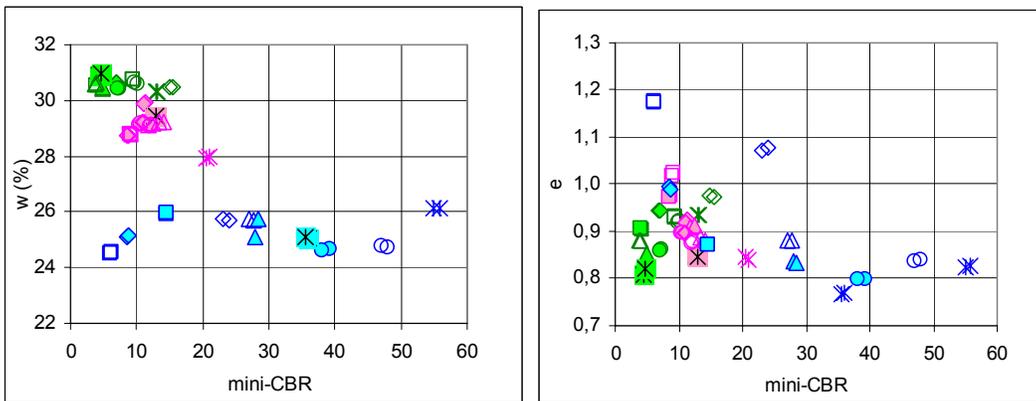


(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

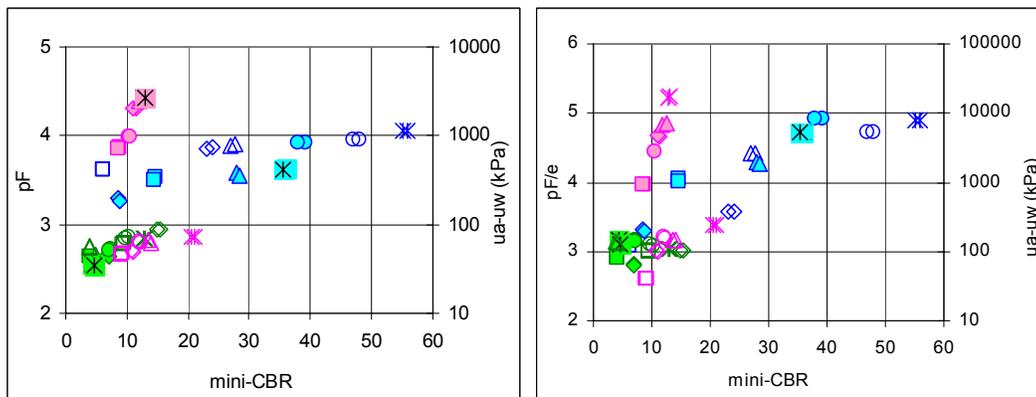
| LEGENDA - referente a (a), (b), (c), (d) |                   |         |                   |         |                   |   |                    |   |                    |
|--|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---|--------------------|---|--------------------|
| ■  | 2 golpes - 0% cal | ◆       | 5 golpes - 0% cal | ▲       | 8 golpes - 0% cal | ● | 12 golpes - 0% cal | ✱ | 20 golpes - 0% cal |
| □  | 2 golpes - 2% cal | ◇       | 5 golpes - 2% cal | △       | 8 golpes - 2% cal | ○ | 12 golpes - 2% cal | ✱ | 20 golpes - 2% cal |
| wót = 24%                                |                   | w = 21% |                   | w = 23% |                   |   |                    |   |                    |

Figura IX.4 - Variação do mini-CBR para o solo HBR1 - Continuação.



(a) mini-CBR x w (%)

(b) mini-CBR x e



(c) mini-CBR x sucção (pF)

(d) mini-CBR x pF/e

| LEGENDA - referente a (a), (b), (c), (d) |                   |         |                   |         |                   |   |                    |   |                    |
|--|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---|--------------------|---|--------------------|
| ■  | 2 golpes - 0% cal | ◆       | 5 golpes - 0% cal | ▲       | 8 golpes - 0% cal | ● | 12 golpes - 0% cal | ✱ | 20 golpes - 0% cal |
| □  | 2 golpes - 3% cal | ◇       | 5 golpes - 3% cal | △       | 8 golpes - 3% cal | ○ | 12 golpes - 3% cal | ✱ | 20 golpes - 3% cal |
| wót = 30%                                |                   | w = 26% |                   | w = 32% |                   |   |                    |   |                    |

Figura IX.5 - Variação do mini-CBR para o solo HBR2.

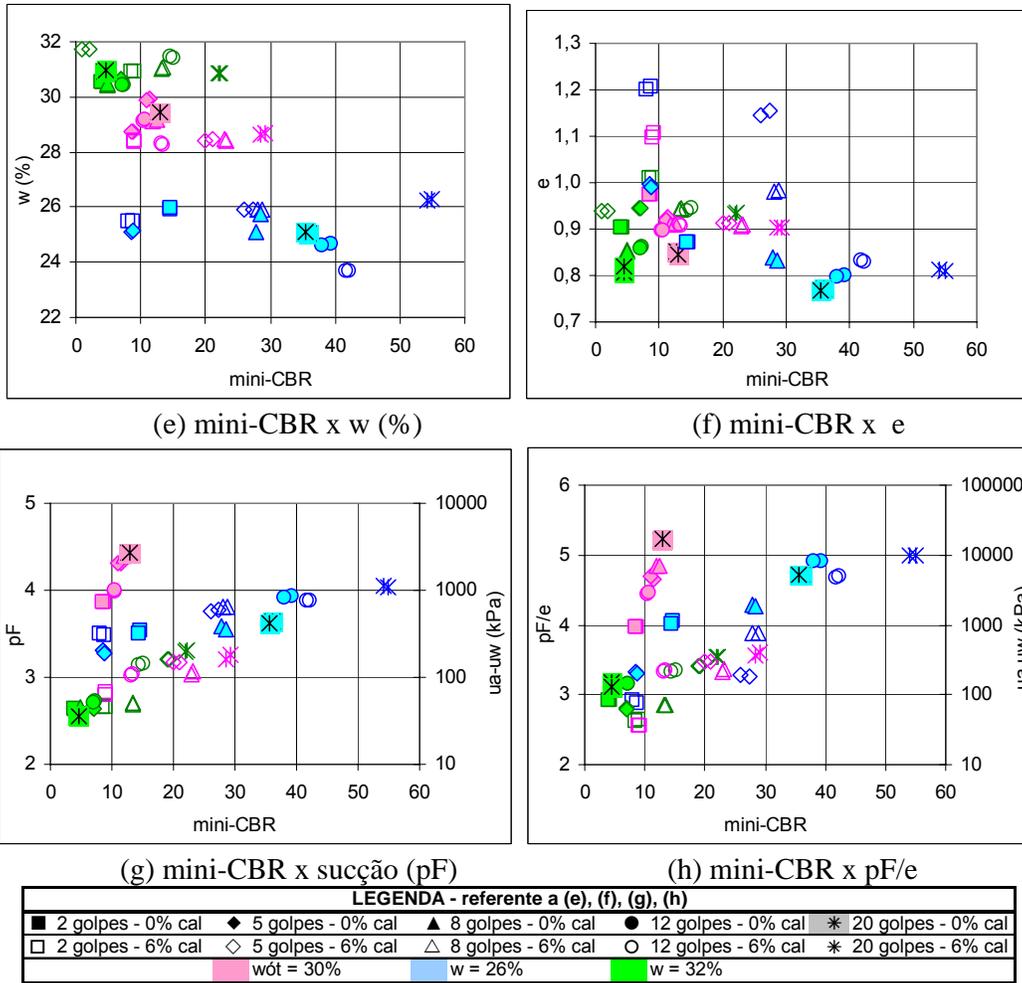


Figura IX.5 - Variação do mini-CBR para o solo HBR2 - Continuação.

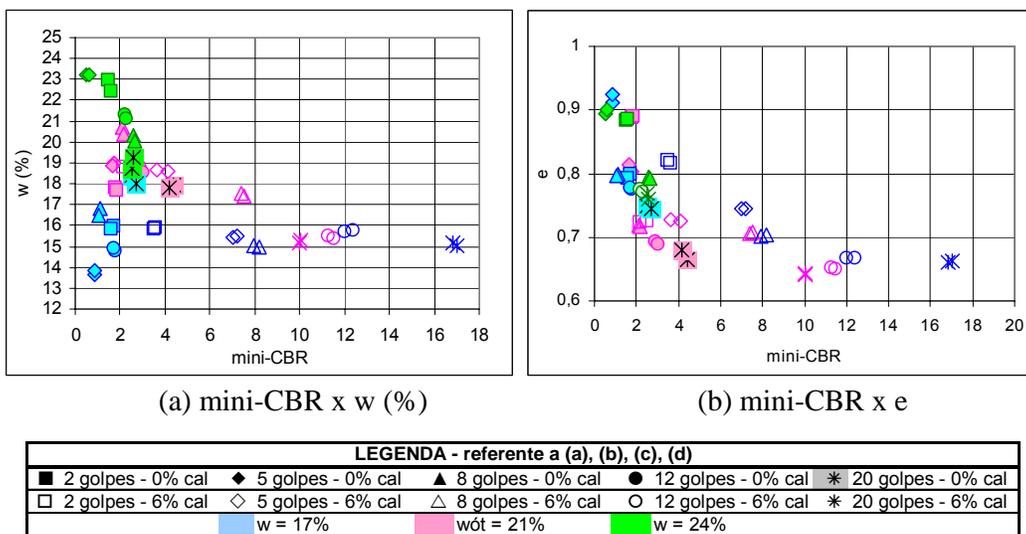


Figura IX.6 - Variação do mini-CBR para o solo ZM3.

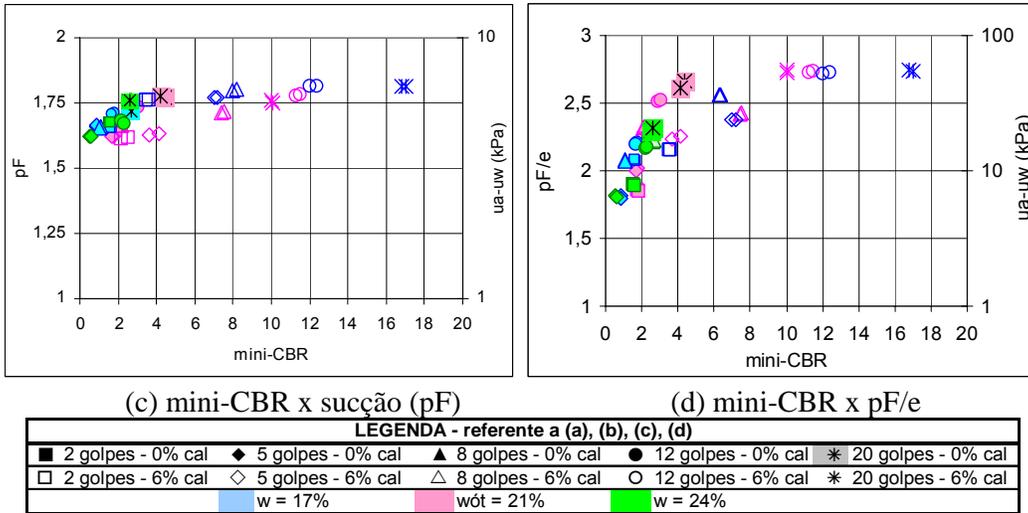


Figura IX.6 - Variação do mini-CBR para o solo ZM3 - Continuação.

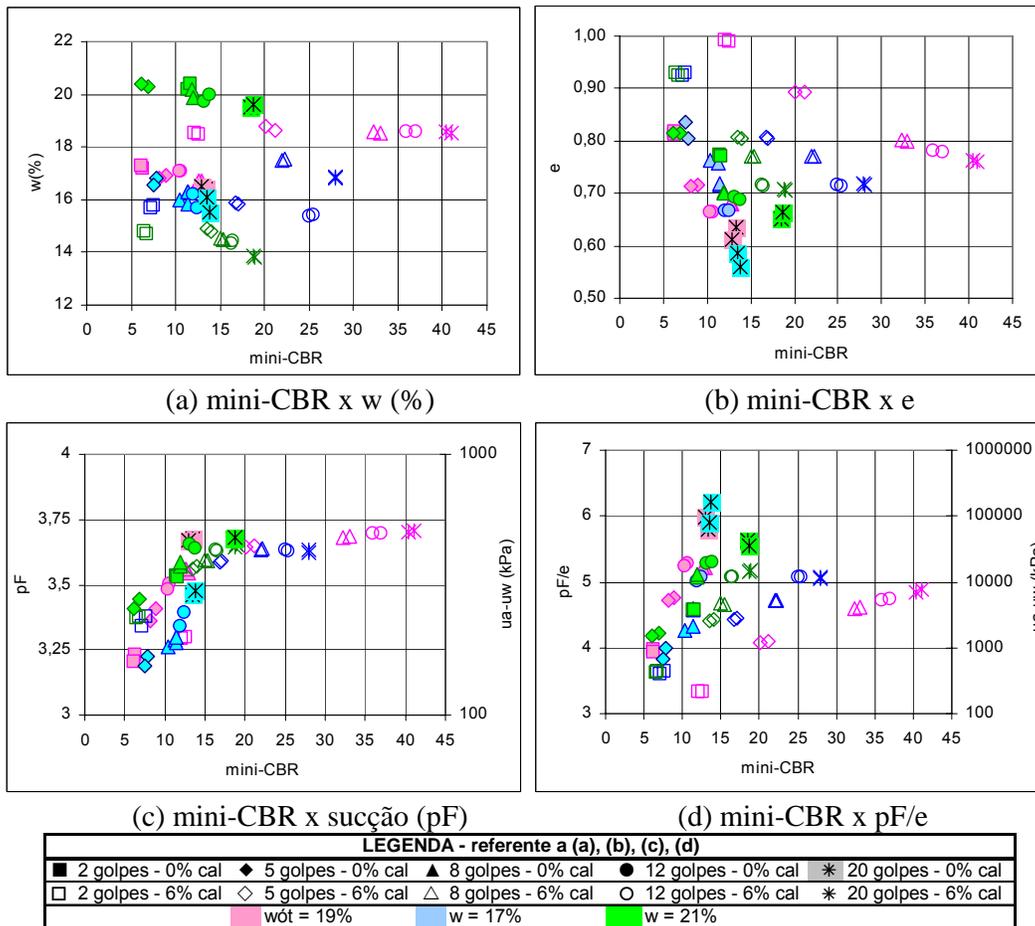


Figura IX.7 - Variação do mini-CBR para o solo SF2.

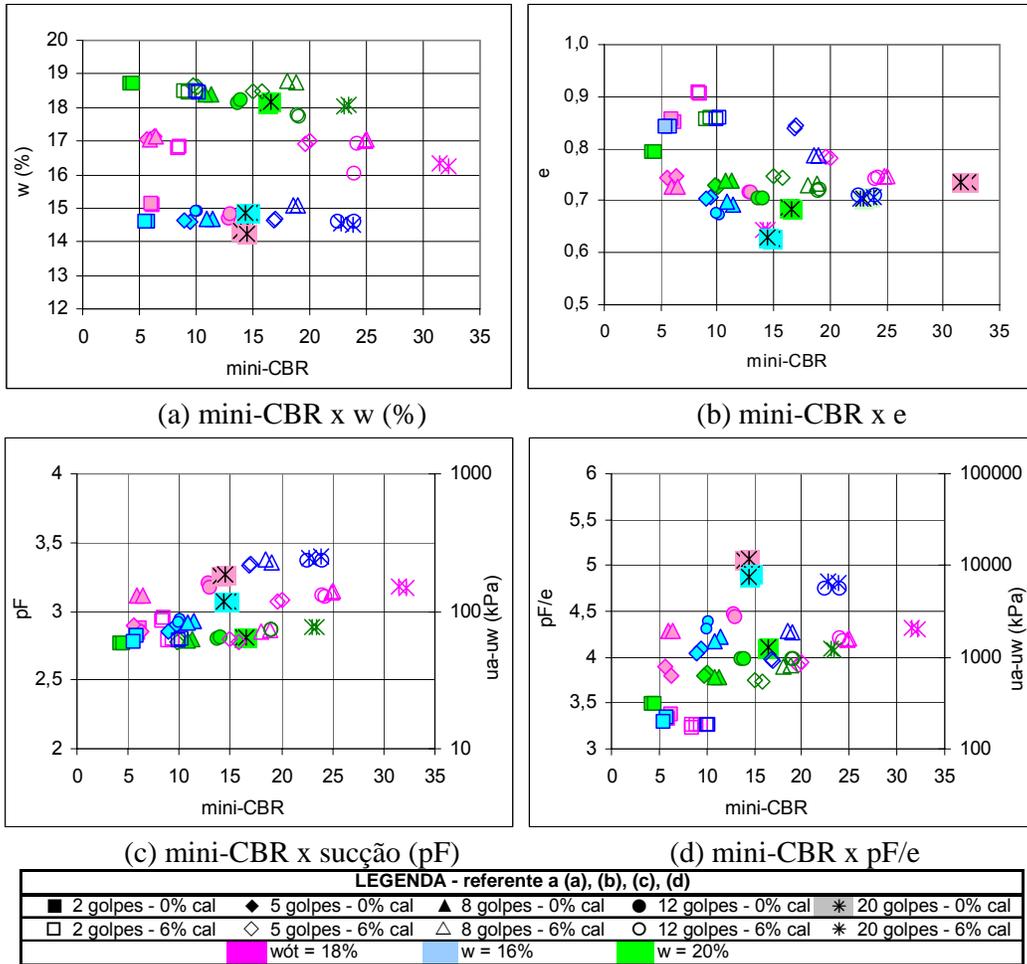


Figura IX.8 - Variação do mini-CBR para o solo SF13.

**ANEXO X – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE RESISTÊNCIA VERIFICADA PARA OS SOLOS COMPACTADOS E ESTABILIZADOS NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA, CONSIDERANDO DIFERENTES UMIDADES DE COMPACTAÇÃO.**

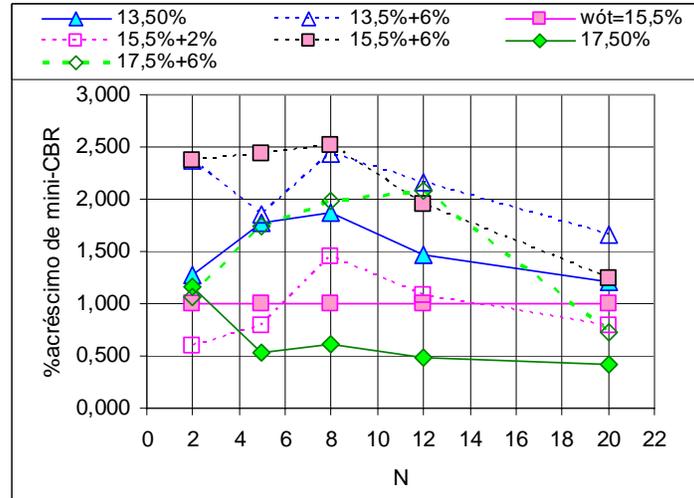


Figura X.1- Variação do Mini-CBR para o solo HB10.

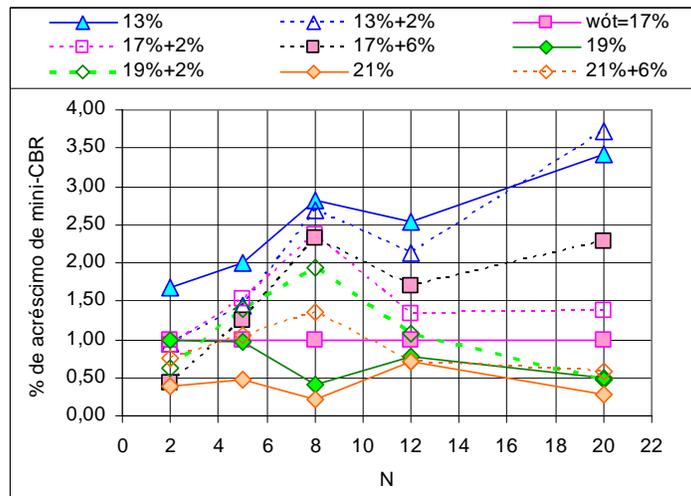


Figura X.2 - Variação do Mini-CBR para o solo HB11.

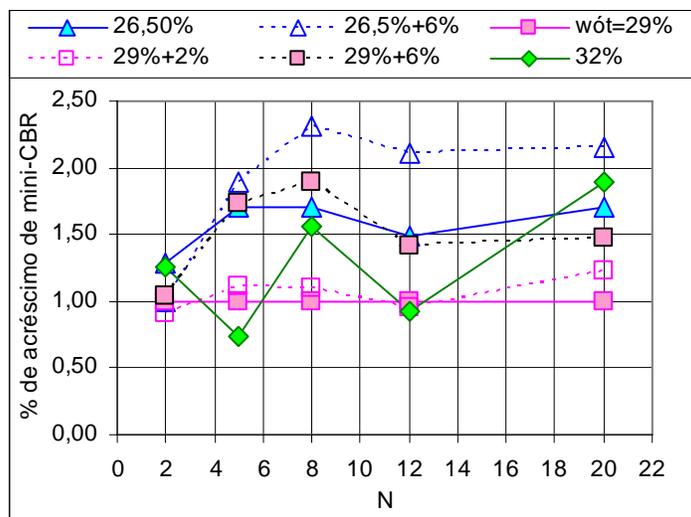


Figura X.3 - Variação do Mini-CBR para o solo HB12.

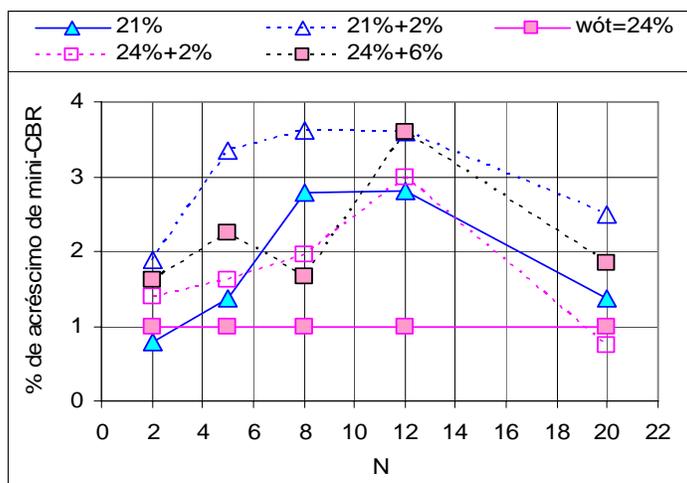


Figura X.4 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR1.

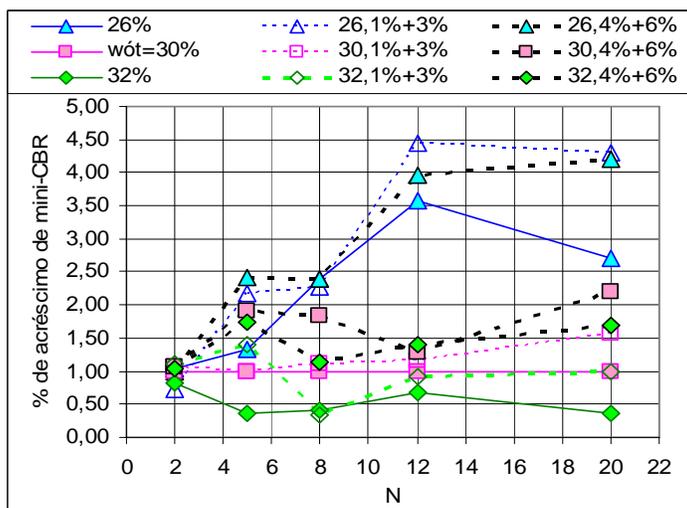


Figura X.5 - Variação do Mini-CBR para o solo HBR2.

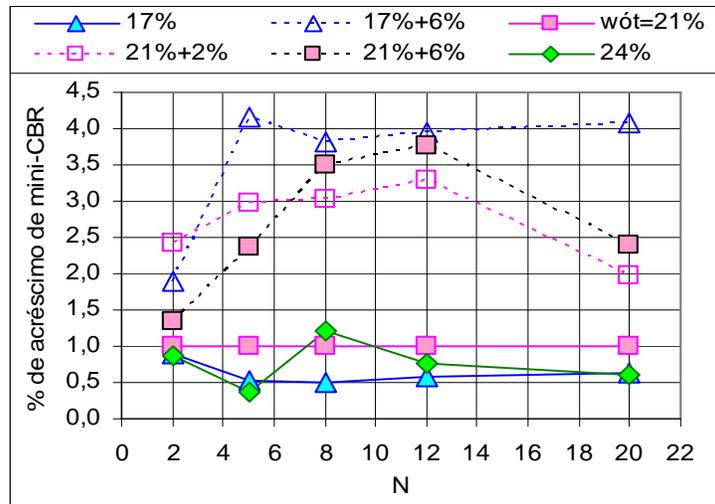


Figura X.6- Variação do Mini-CBR para o solo ZM3.

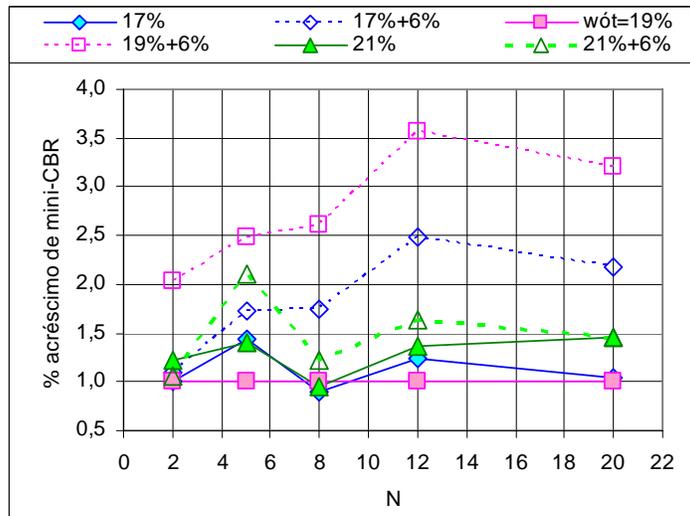


Figura X.7 - Variação do Mini-CBR para o solo SF2.

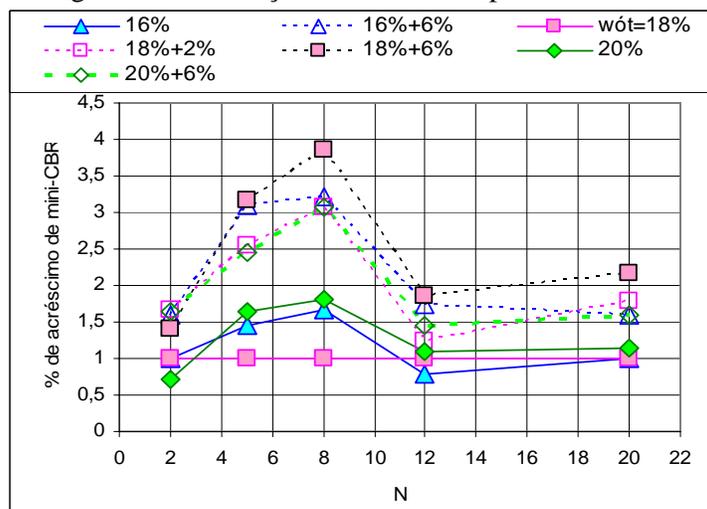
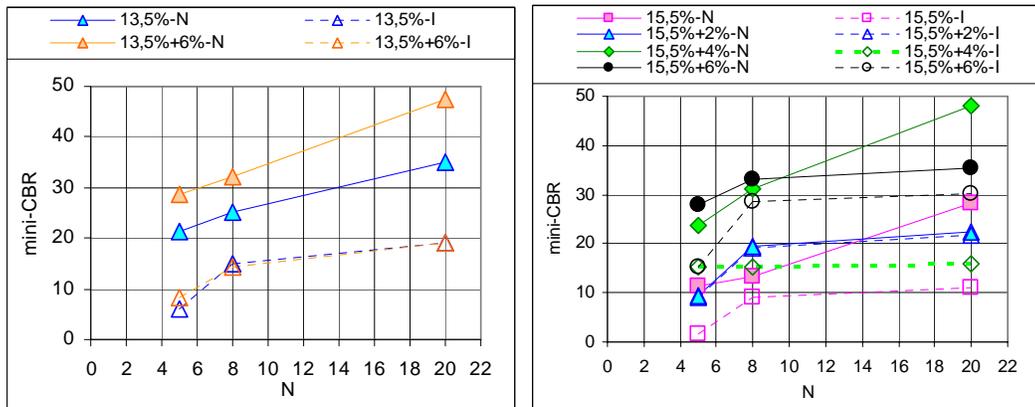


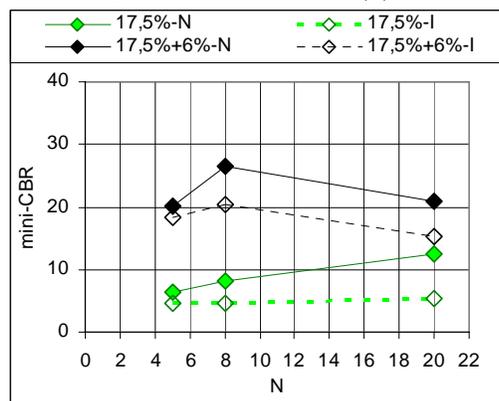
Figura X.8 - Variação do Mini-CBR para o solo SF13.

**ANEXO XI – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE RESISTÊNCIA VERIFICADA PARA OS SOLOS COMPACTADOS E ESTABILIZADOS NA CONDIÇÃO SATURADA, CONSIDERANDO DIFERENTES UMIDADES DE COMPACTAÇÃO.**

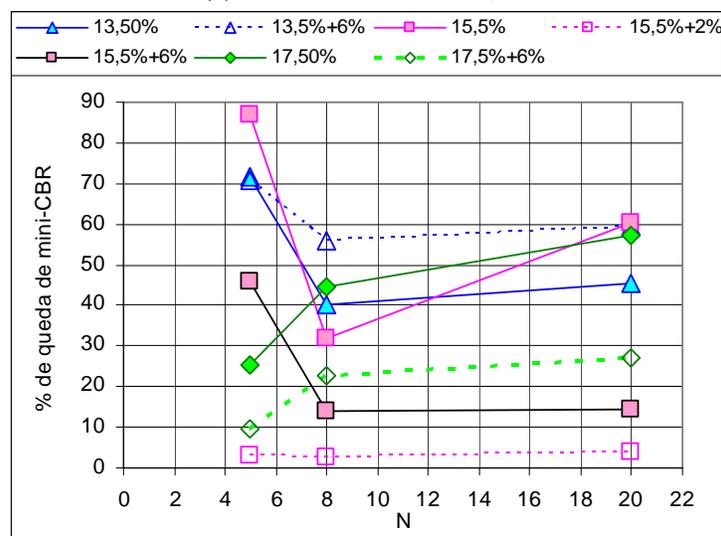


(a) Solo HB10 – w = 13,5%

(b) Solo HB10 – w = 15,5%

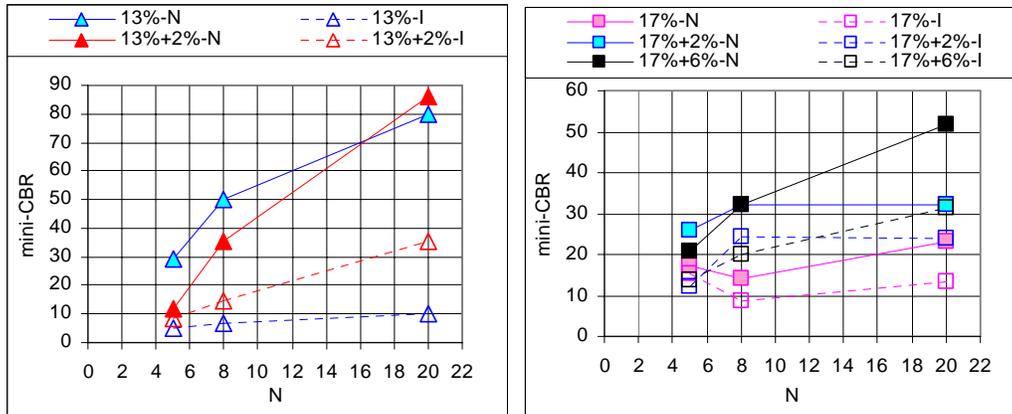


(c) Solo HB10 – w = 17,5%



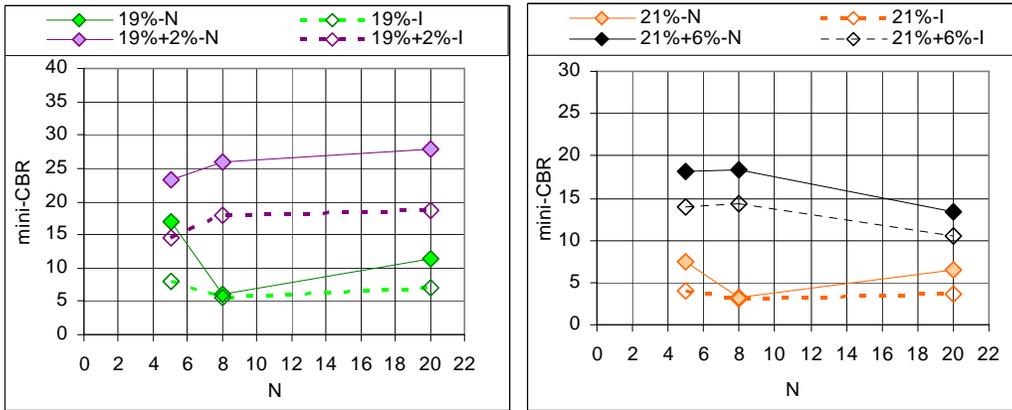
(d) Variação percentual do solo HB10

Figura XI.1 - Efeito da saturação na resistência do solo HB10.



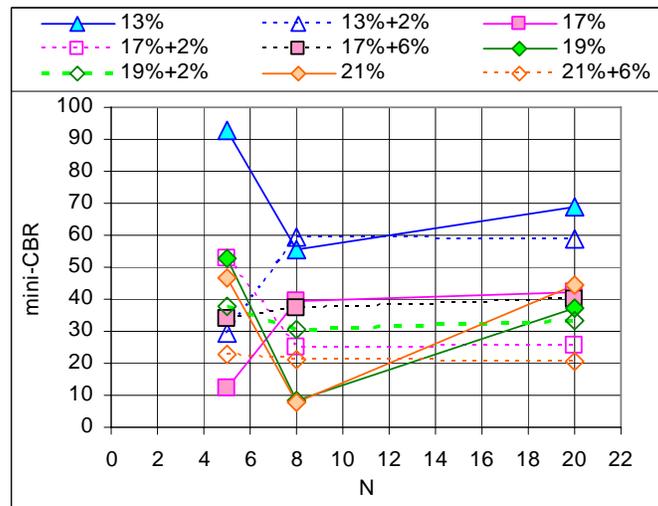
(a) Solo HB11 – w = 13%

(b) Solo HB11 – w = 17%



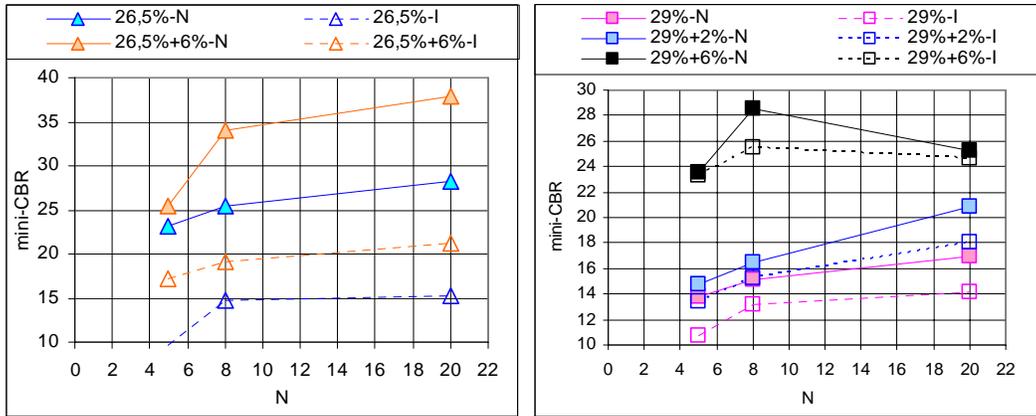
(c) Solo HB11 – w = 19%

(d) Solo HB11 – w = 21%



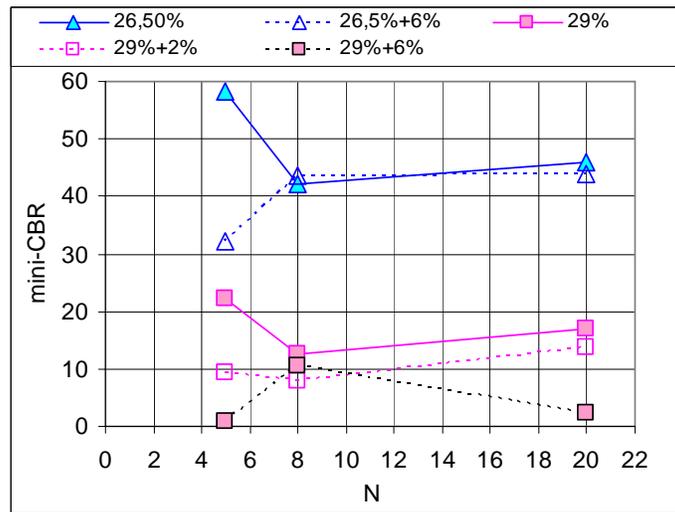
(d) Variação percentual do solo HB11

Figura XI.2 - Efeito da saturação na resistência do solo HB11.



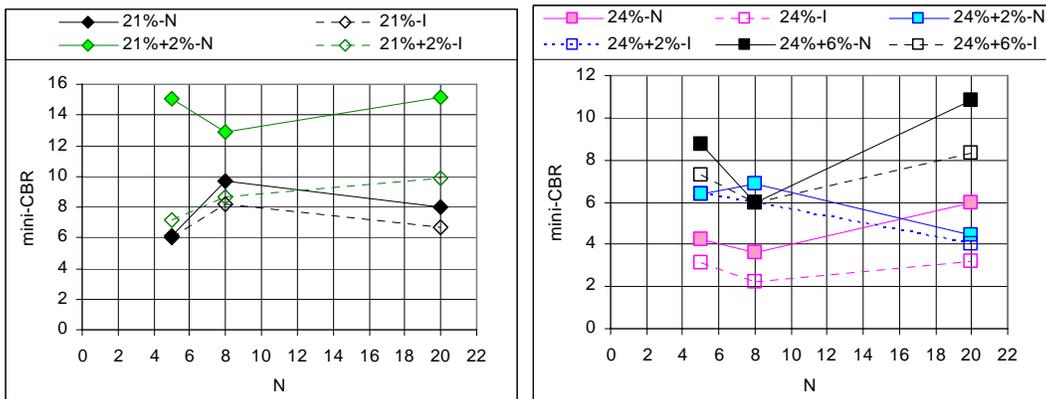
(a) Solo HB12 – w = 26,5%

(b) Solo HB12 – w = 29%



(c) Variação percentual do solo HB12

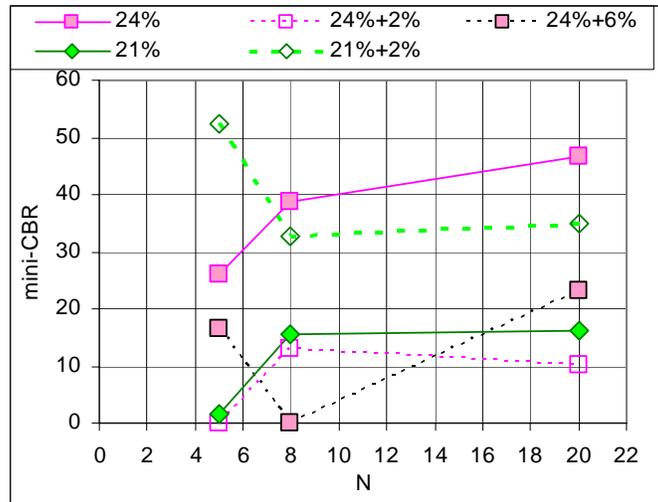
Figura XI.3 - Efeito da saturação na resistência do solo HB12.



(a) Solo HBR1 – w = 21%

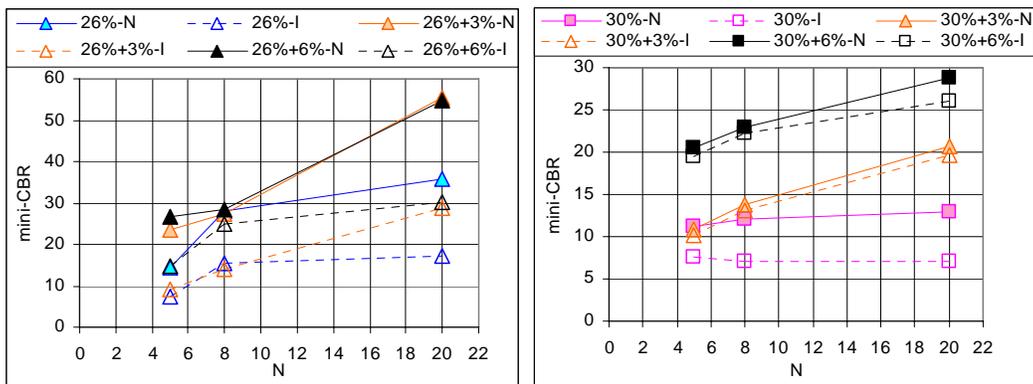
(b) Solo HBR1 – w = 24%

Figura XI.4 - Efeito da saturação na resistência do solo HBR1.



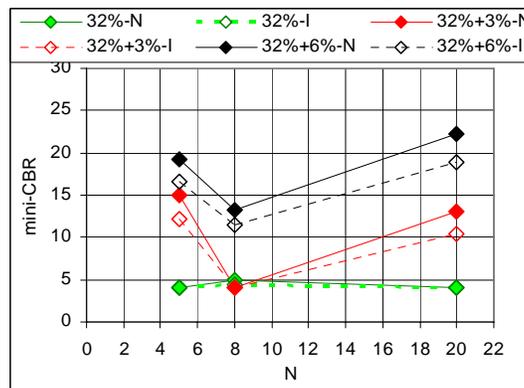
(c) Variação percentual do solo HBR1

Figura XI.4 - Efeito da saturação na resistência do solo HBR1 - Continuação.



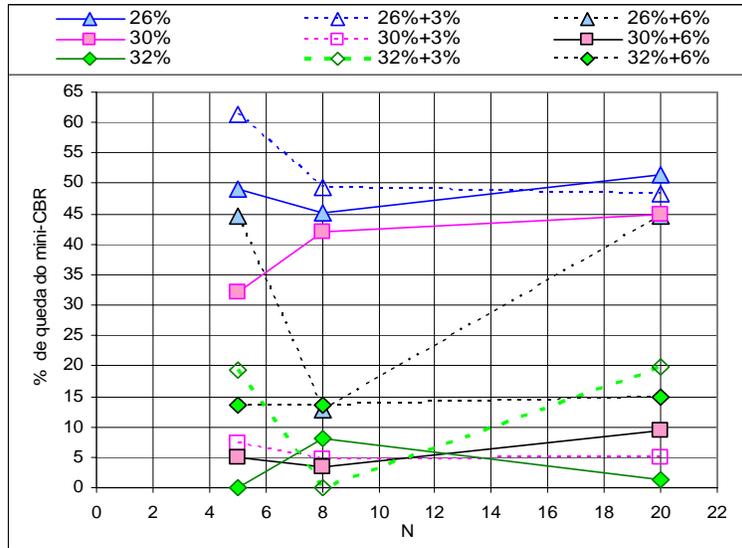
(a) Solo HBR2 – w = 26%

(b) Solo HBR2 – w = 30%



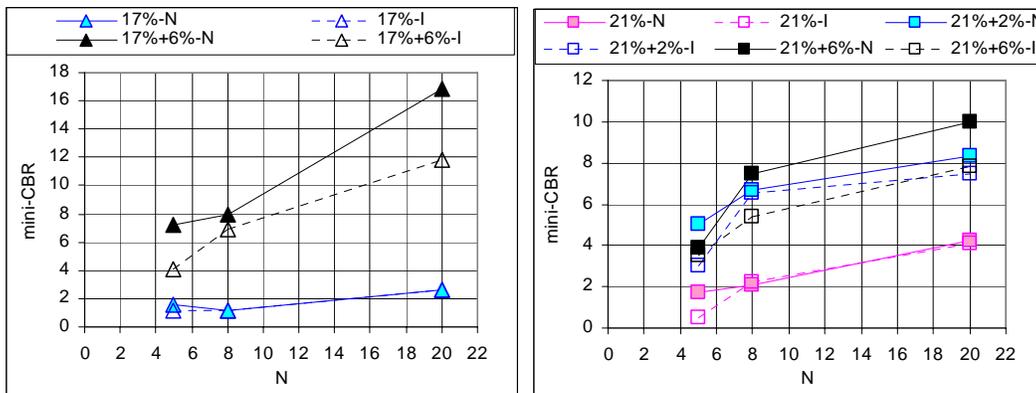
(c) Solo HBR2 – w = 32%

Figura XI.5 - Efeito da saturação na resistência do solo HBR2.



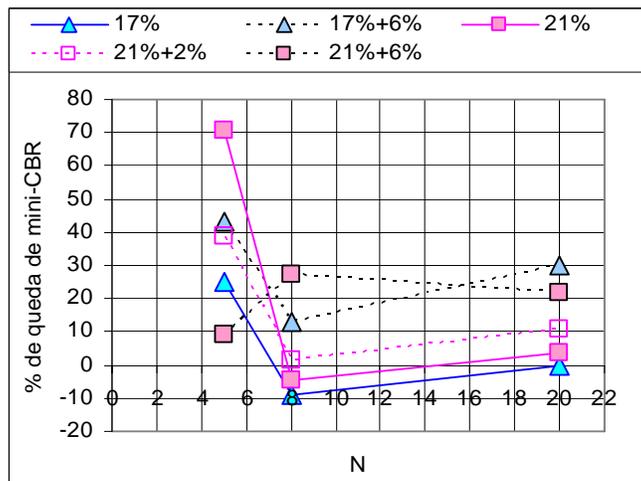
(d) Variação percentual do solo HBR2

Figura XI.5 - Efeito da saturação na resistência do solo HBR2.



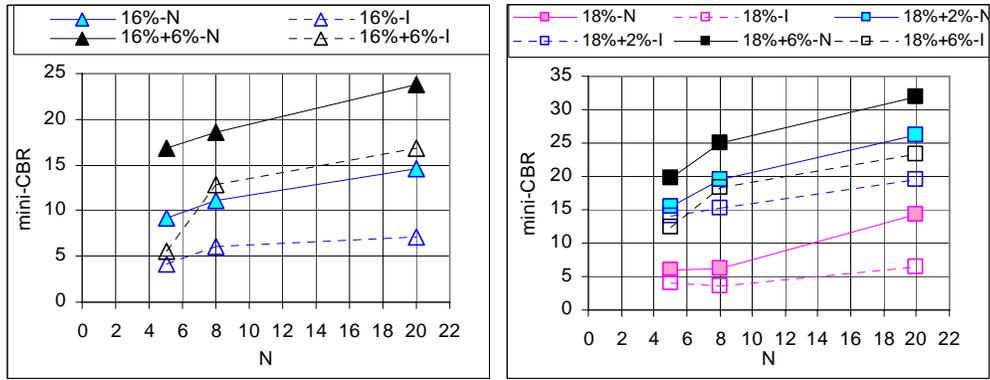
(a) Solo ZM3 – w = 17%

(b) Solo ZM3 – w = 21%



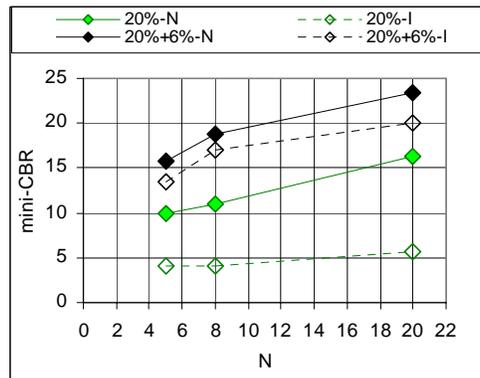
(c) Variação percentual do solo ZM3.

Figura XI.6 - Efeito da saturação na resistência do solo ZM3.

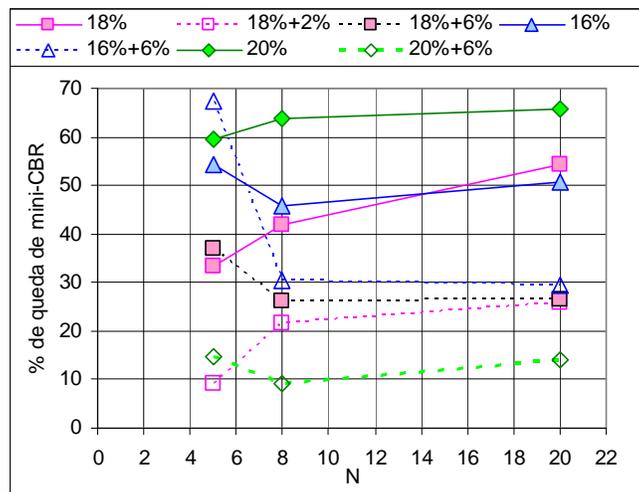


(a) Solo SF13 – w = 16%

(b) Solo SF13 – w = 18%



(c) Solo SF13 – w = 20%



(d) Variação percentual do solo SF13

Figura XI.7 - Efeito da saturação na resistência do solo SF13.

**ANEXO XII – RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS A COMPRESSÃO  
SIMPLES PARA OS SOLOS COMPACTADOS NA CONDIÇÃO NATURAL E  
ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE**

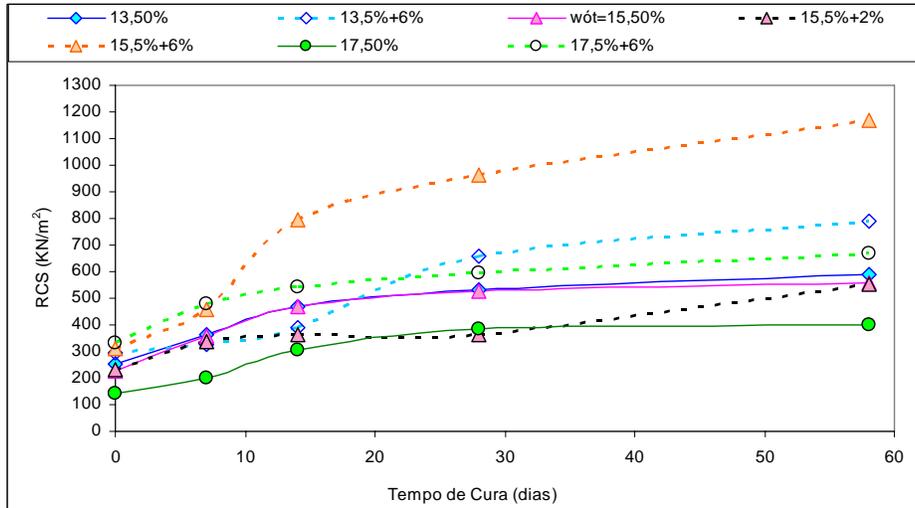


Figura XII.1- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HB10.

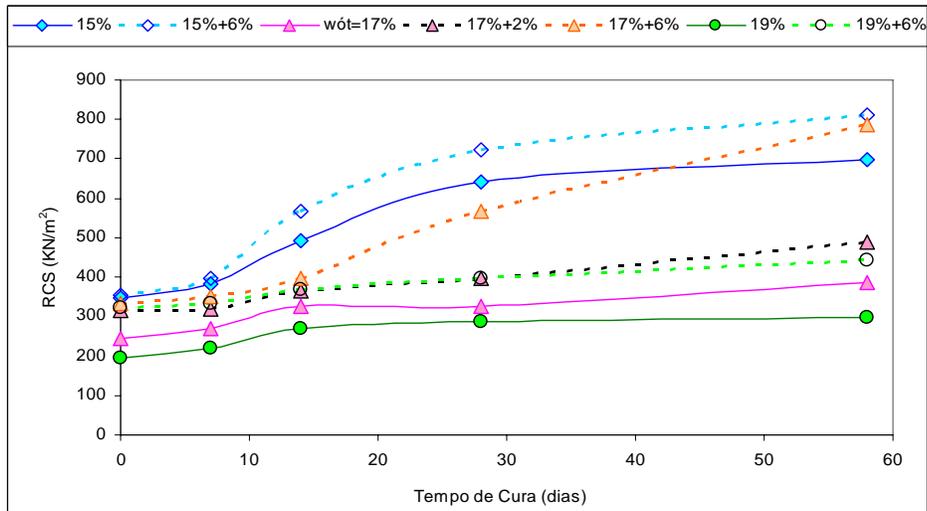


Figura XII.2- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HB11.

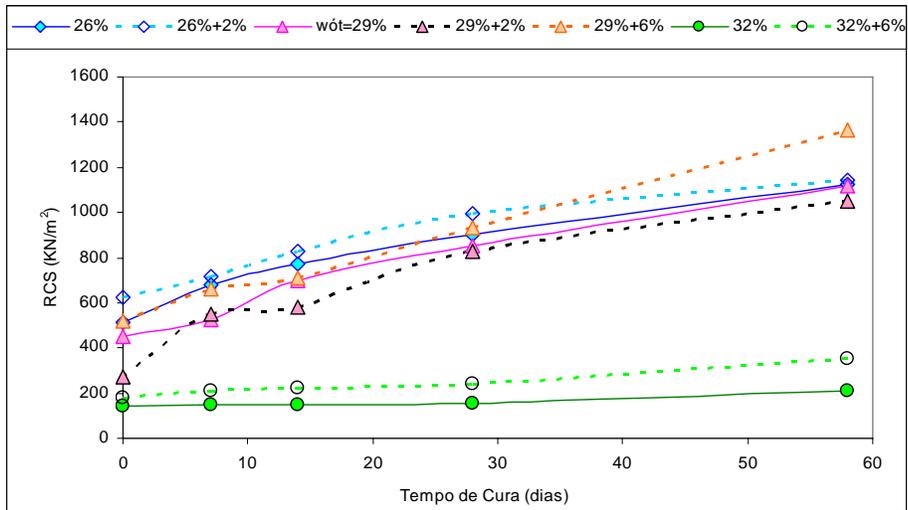


Figura XII.3- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HB12.

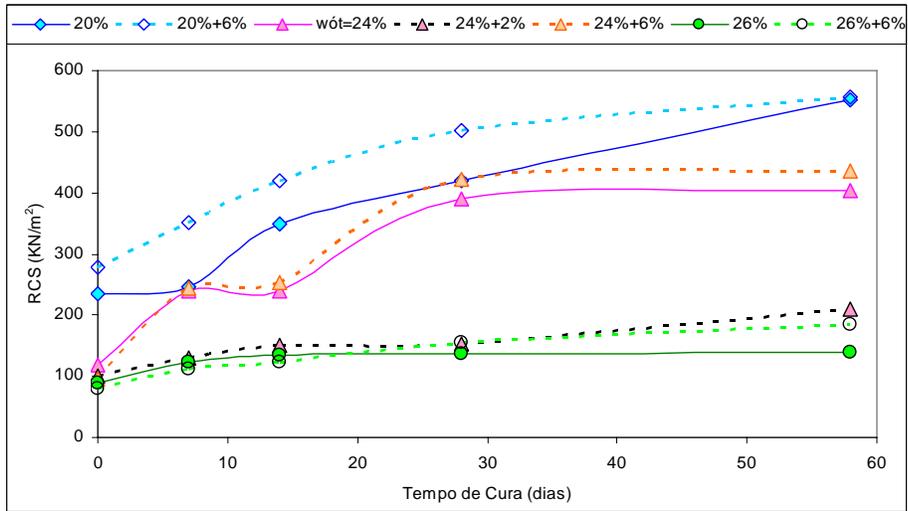


Figura XII.4- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HBR1.

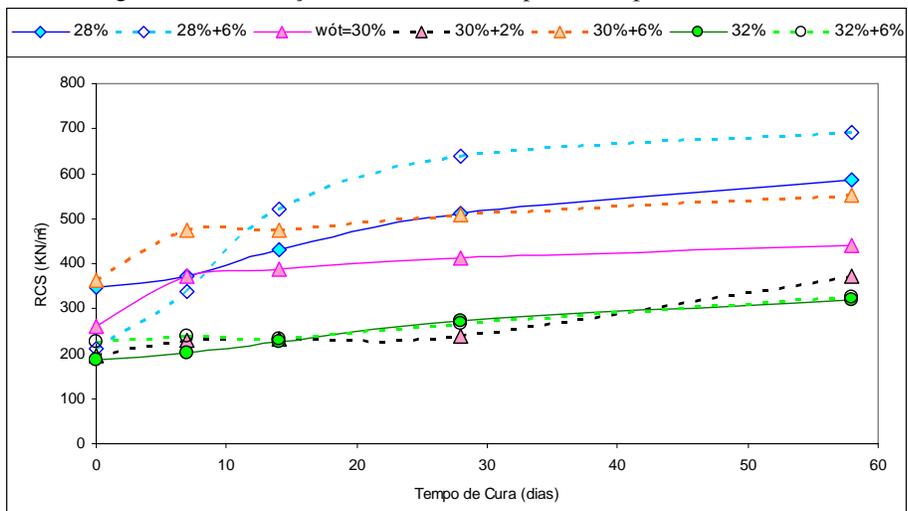


Figura XII.5- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo HBR2.

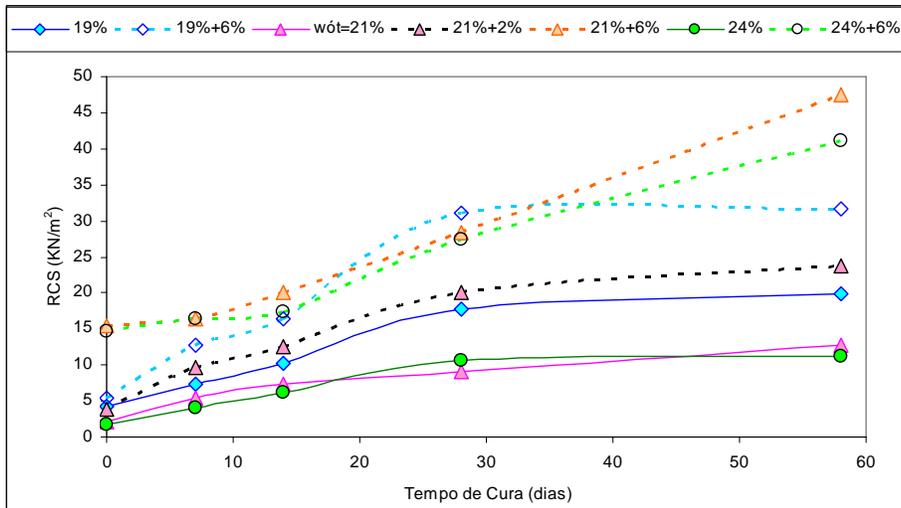


Figura XII.6 - Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo ZM3.

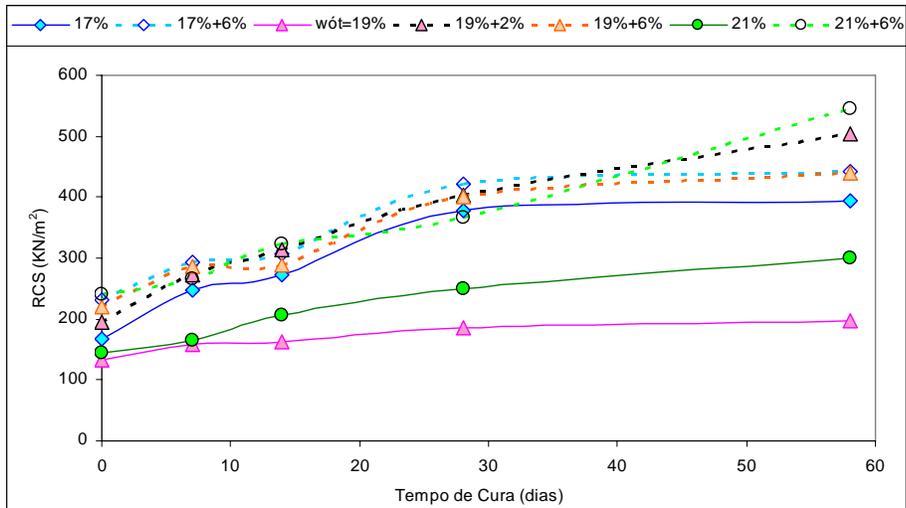


Figura XII.7 - Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo SF2.

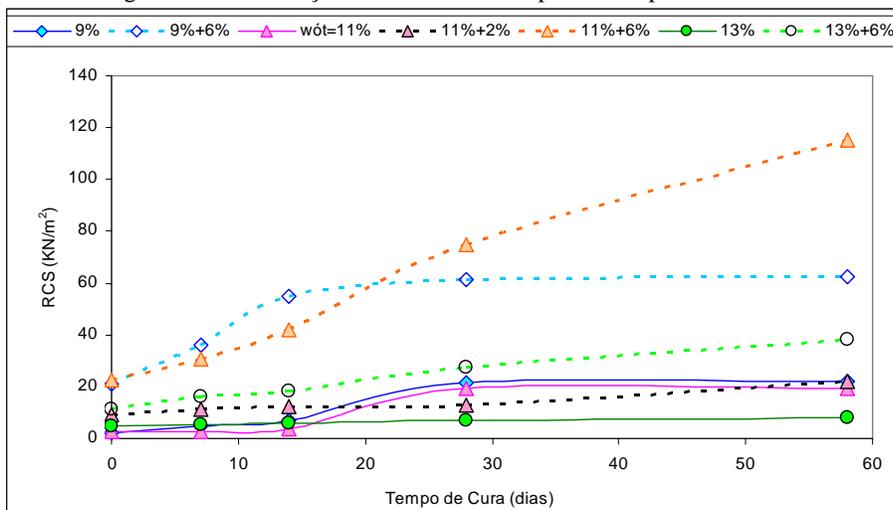


Figura XII.8 - Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo SF8.

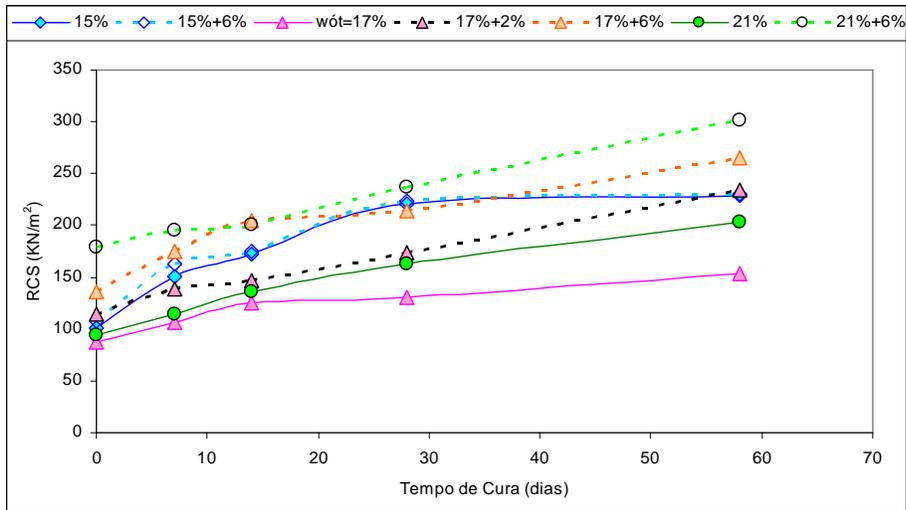


Figura XII.9- Evolução da RCS com o tempo de cura para o solo SF13.

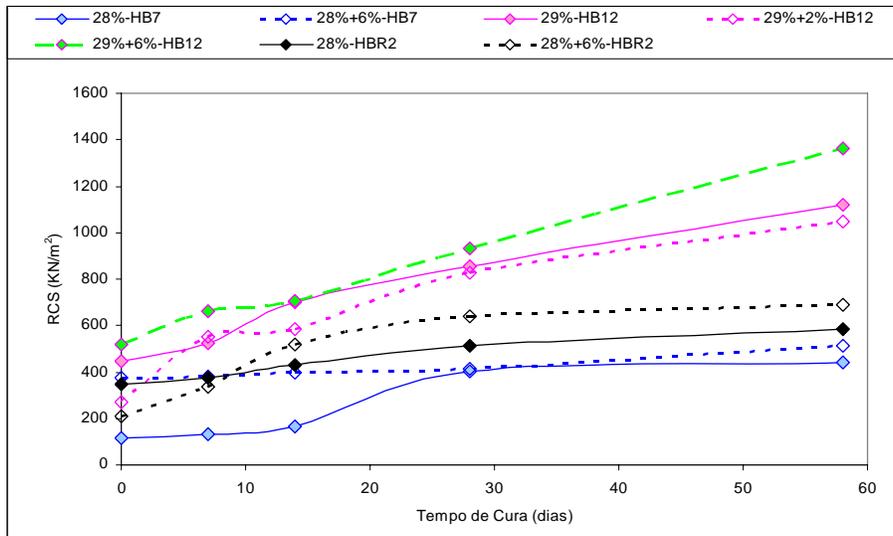


Figura XII.10 – Comparação entre os latossolos compactados a 28% e 29% de umidade.

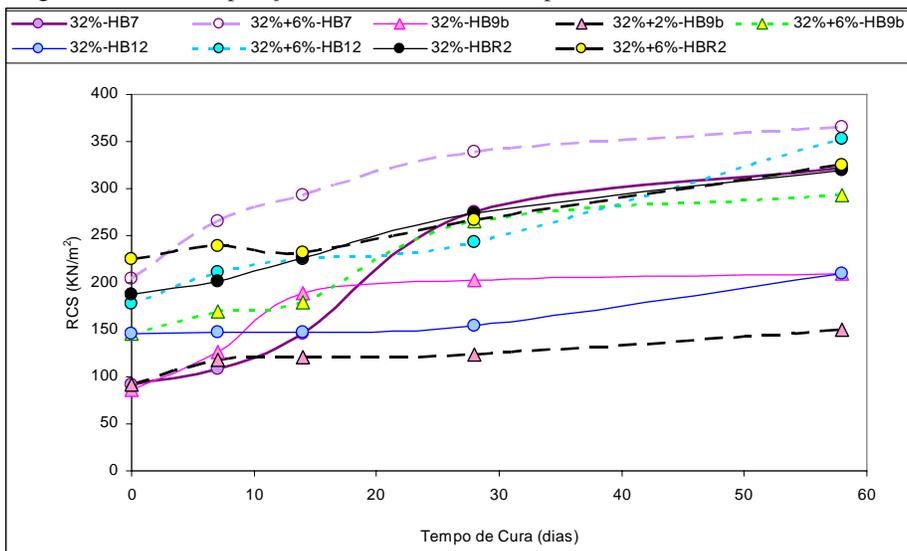


Figura XII.11 – Comparação entre os latossolos compactados a 32% de umidade.

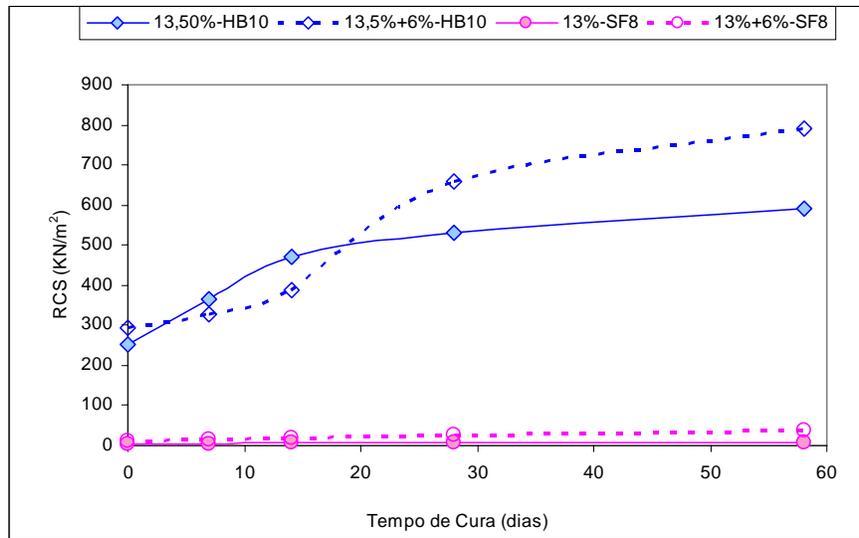


Figura XII.12 – Comparação entre os solos HB10 e SF8 compactados a 13% de umidade.

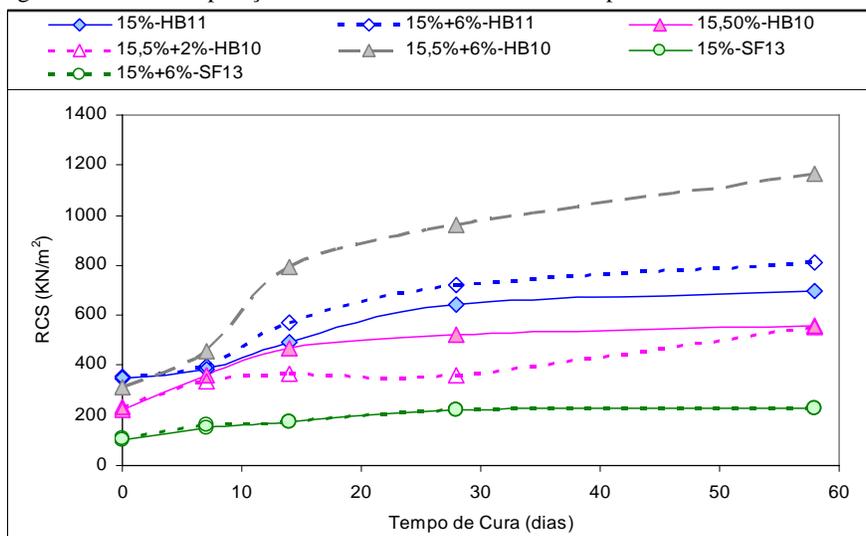


Figura XII.13 – Comparação entre os solos HB10, HB11 e SF13 compactados a 15% de umidade.

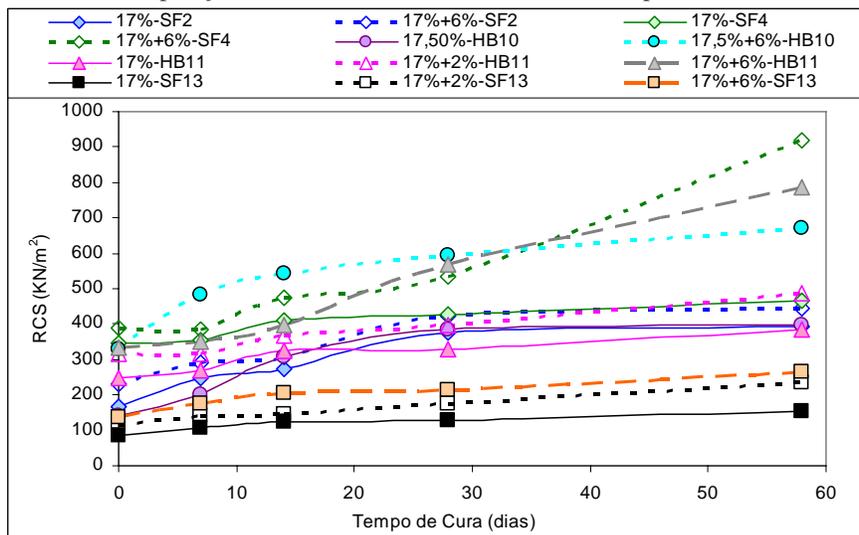


Figura XII.14 – Comparação entre os solos HB10, HB11, SF2 e SF13 compactados a 17% de umidade.

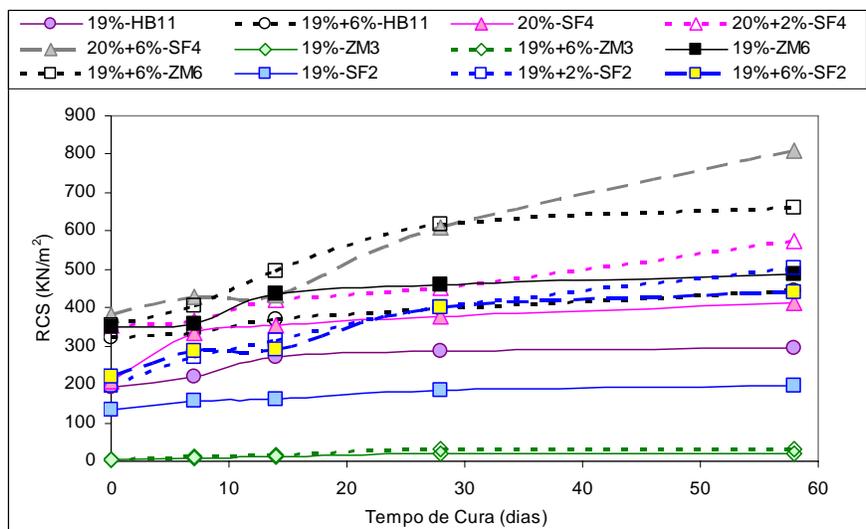


Figura XII.15 – Comparação entre os solos HB11, ZM3, ZM6, SF2 e SF4 compactados a 19% e 20% de umidade.

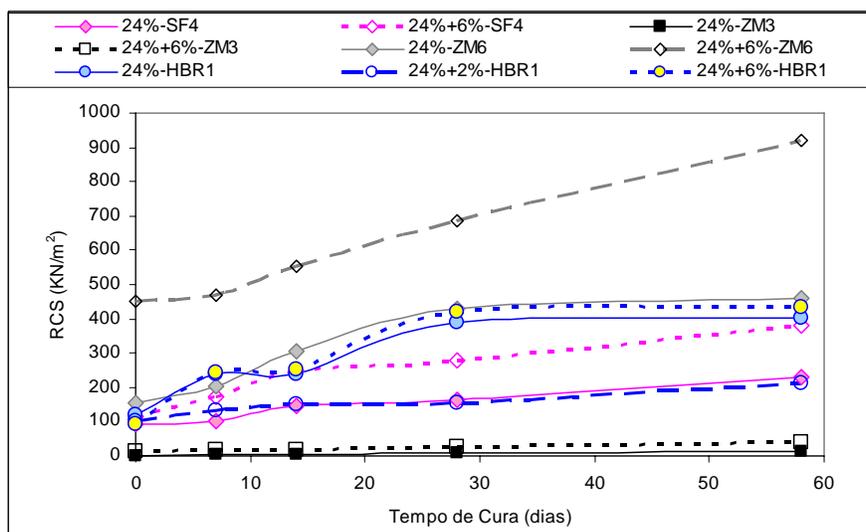


Figura XII.16 – Comparação entre os solos HBR1, ZM3, ZM6 e SF4 compactados a 24% de umidade.

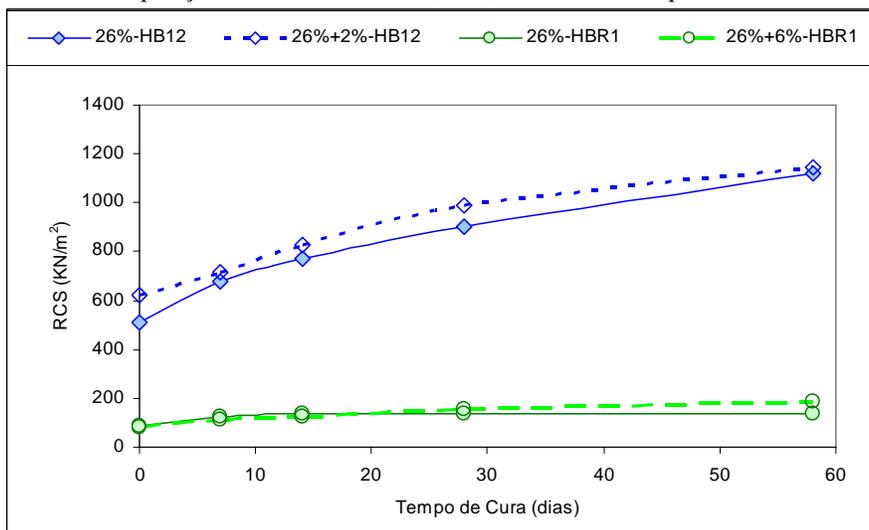


Figura XII.17 – Comparação entre os solos HBR1 e HB12 compactados a 26% de umidade.

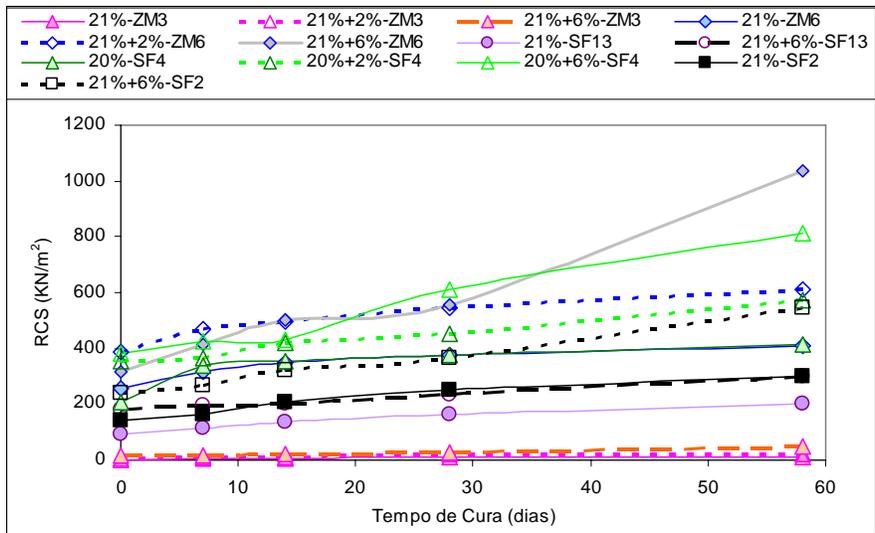


Figura XII.18 – Comparação entre os solos ZM3, ZM6, SF2, SF4 e SF13 compactados a 20% e 21% de umidade.

### ANEXO XIII – CURVAS DE ABSORÇÃO

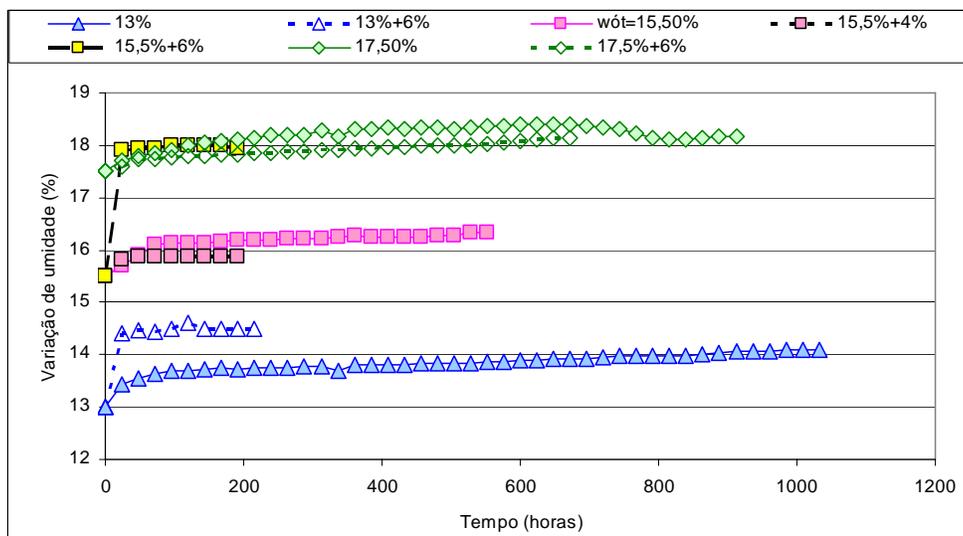


Figura XIII.1 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HB10.

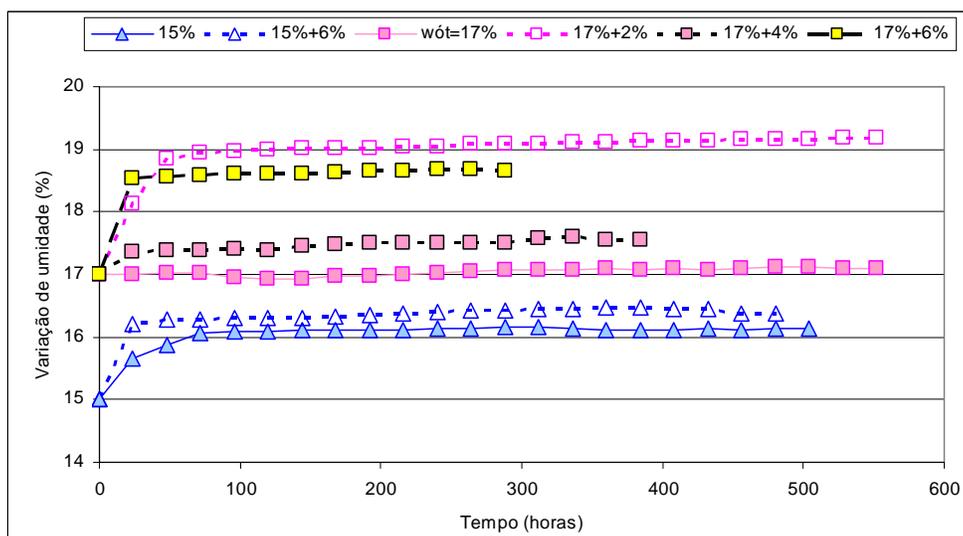


Figura XIII.2 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HB11.

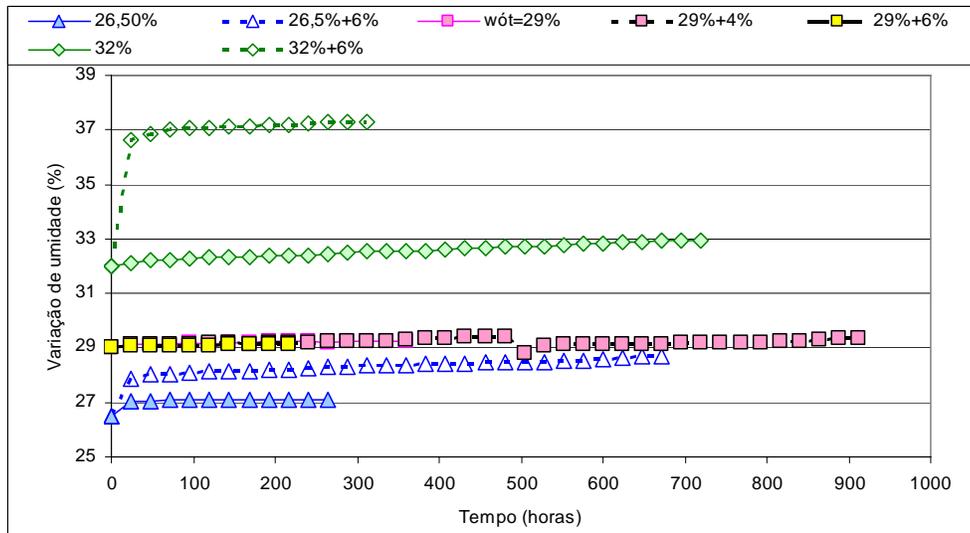


Figura XIII.3 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HB12.

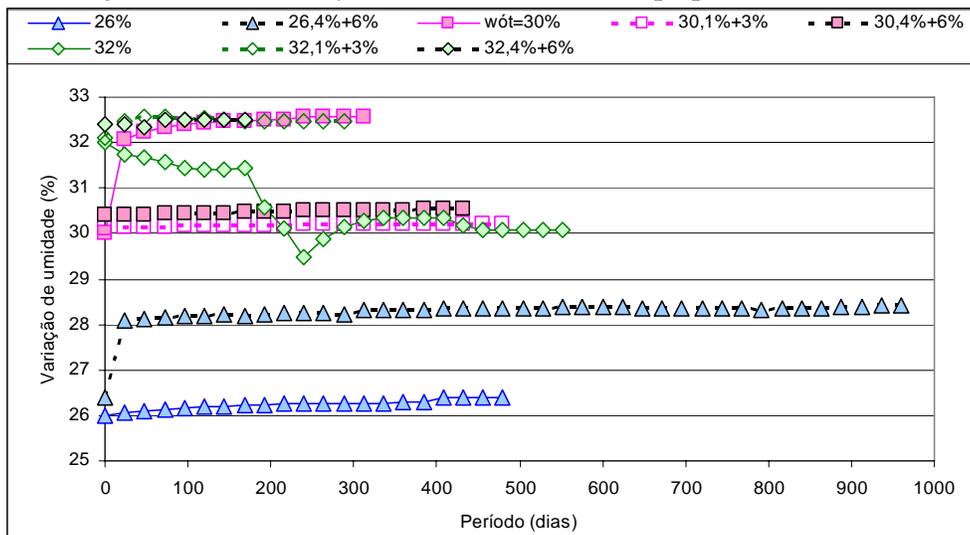


Figura XIII.4 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HBR1.

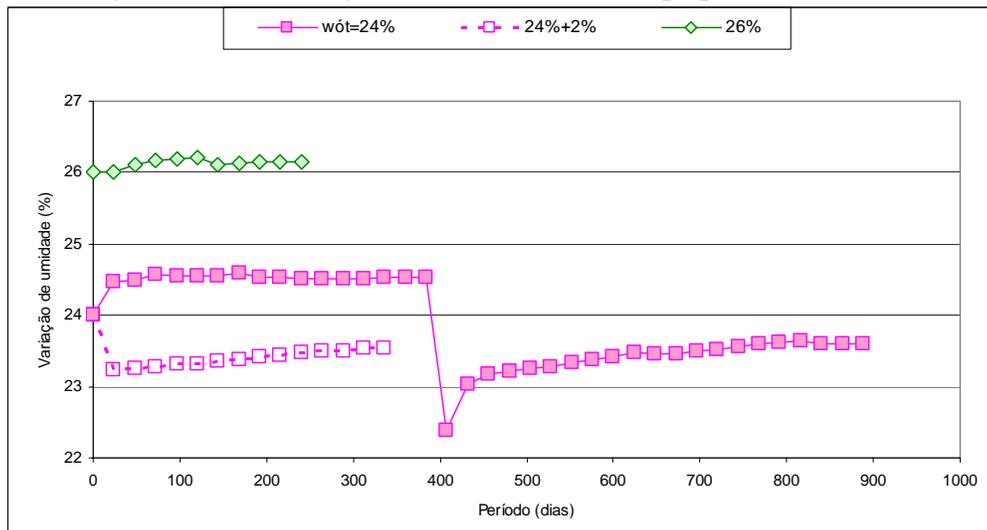


Figura XIII.5 - Evolução da umidade com o tempo para o solo HBR2.

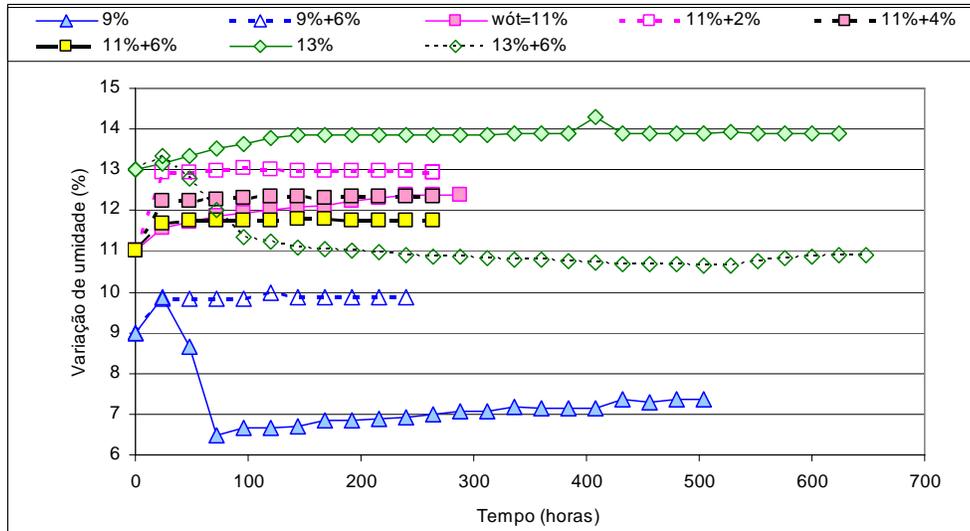


Figura XIII.6 - Evolução da umidade com o tempo para o solo SF8.

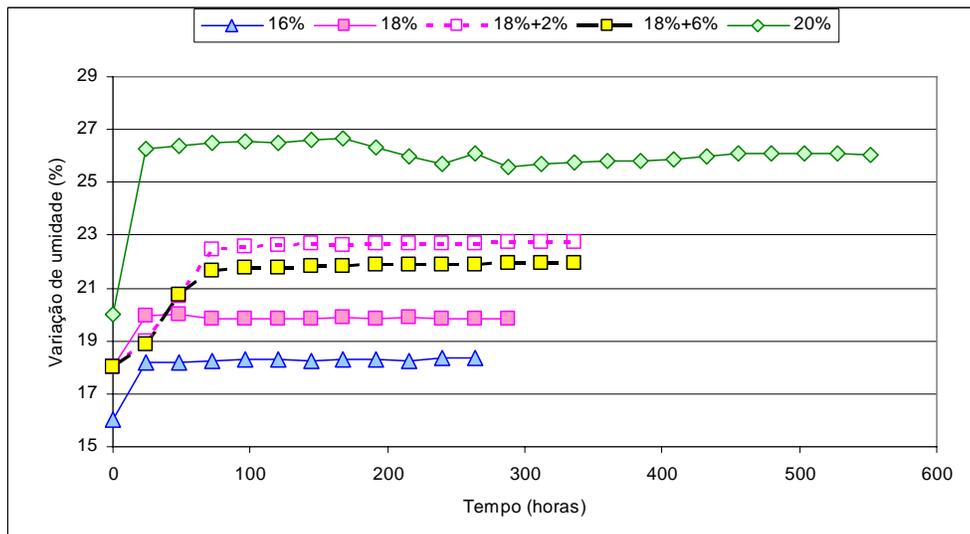


Figura XIII.7 - Evolução da umidade com o tempo para o solo SF13.