

CORRELAÇÕES ENTRE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS,  
MINERALÓGICAS, GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS DE SOLOS  
TROPICAIS ARGILOSOS DE MINAS GERAIS

CICERO PEREIRA BATISTA JUNIOR

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Geólogo pelo  
Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador (a):

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Helena Polivanov – Departamento de Geologia – UFRJ

Prof. Dr. Márcio Marangon – Departamento de Engenharia Civil – UFJF

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - UFRJ  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA MATEMÁTICA E NATUREZA – CCMN  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Abril, 2005

CORRELAÇÕES ENTRE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS,  
MINERALÓGICAS, GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS DE SOLOS  
TROPICAIS ARGILOSOS DE MINAS GERAIS

CICERO PEREIRA BATISTA JUNIOR

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Geólogo pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Avaliado pela comissão examinadora abaixo assinada.

Aprovada por:

Prof. Dr<sup>a</sup>. Laura Maria Goretti da Motta  
Examinadora – Geotecnia – COPPE – UFRJ

Prof. Dr. Eurípides do Amaral Vargas Junior  
Examinador – Departamento de Engenharia Civil – PUC

Prof. Dr<sup>a</sup>. Helena Polivanov  
Orientadora – Departamento de Geologia – UFRJ

Prof. Dr. Márcio Marangon  
Orientador – Departamento de Engenharia Civil – UFJF

Rio de Janeiro - RJ  
Abril, 2005

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Batista Jr., Cicero Pereira

Correlações entre Características Químicas, Mineralógicas, Geológicas e Geotécnicas de Solos Tropicais Argilosos de Minas Gerais / Cicero Pereira Batista Junior – Rio de Janeiro, 2005.

88 p. 29,7 cm

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, 2005.

1. Solos Tropicais. 2. Caracterização Química.
3. Caracterização Mineralógica. 4. Caracterização Geotécnica.

## DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar o esforço na realização deste trabalho, ao meu pai Cicero Pereira Batista e minha mãe Zuleida Curty Batista, pelo estímulo, compreensão, carinho, educação e ensinamentos da vida.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à Professora Helena Polivanov pela orientação, empenho, estímulo e, além da sua incansável contribuição com seus conhecimentos e interesse no desenvolvimento desta pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos ao Professor Márcio Marangon que me deu a oportunidade de participar de sua pesquisa de Doutorado em Geotecnia, realizada pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Gostaria de registrar que além da orientação sempre prestativa, esse Professor demonstrou ser uma pessoa muito dedicada, responsável, zeloso, um excelente profissional e, o mais importante de tudo, amigo.

À Professora Laura Maria Goretti da Motta pela acolhida na COPPE/UFRJ e todo o apoio e esclarecimento que me ofereceu ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Ao Departamento de Geologia - UFRJ que em parceria com a COPPE/UFRJ me deu a oportunidade de desenvolver a essa pesquisa.

A minha família resumida no meu pai Cícero Pereira Batista, na minha mãe Zuleida Curty Batista, minhas irmãs Cileyda Curty Batista e Caroline Curty Batista, minha avó Elza Teixeira Curty e na minha amada namorada Louize Thurler Machado Pimentel. Meus agradecimentos especiais porque vocês são o alicerce da minha vida.

Ao meu verdadeiro amigo, de 13 anos de convívio, Diogo Charanga; agradeço por estar sempre me incentivando e me fortalecendo para enfrentar todas as dificuldades e desafios da vida.

Aos amigos de Nova Friburgo, Dioguinho, Daniel Magrim, Pedro Ivo, Mateus, Dido, Jonathan, Meressi, Felipe Negão, Bruninho, Mário, Lucas, Cristiano, Igor e Tiago ED.

Aos amigos de faculdade, Marcelo, Cauê, Anselmo, Hilton, Marcos Baião, Max, Fabiano, Rafael, Vivian, Daniela, Priscila, Gilmara, Fabiana, Fredy, Leandro, Stutz, David, Afobado e Tiago.

## RESUMO

O trabalho descreve sobre as características principais dos solos não hidromórficos bem desenvolvidos pedogeneticamente, referidos genericamente na Geotecnia como solos de comportamento laterítico, com horizonte diagnóstico do tipo Latossolo ( $B_W$ ) ou Podzólico ( $B_T$ ), para a aplicação na área de pavimentos.

A realização desse trabalho teve como objetivo a correlação entre características químicas, mineralógicas, geológicas e geotécnicas para um conjunto de 33 amostras de solos coletados em parte do estado de Minas Gerais, aproveitando os cortes rodoviários, sendo feita a descrição das espessuras dos horizontes identificados e das características visuais e de tato.

Foram levantadas informações preliminares quanto os tipos de solo, segundo mapas pedológicos e trabalhos anteriores, e da geologia da área de estudo antes das coletas. Em laboratório as amostras foram submetidas a análises químicas, mineralógicas e geotécnicas.

Os resultados das análises químicas mostraram que o conjunto das 33 amostras de solos encontram-se em estado avançado de intemperização, indicando valores baixos de  $K_i$  e  $K_r$ . As análises mineralógicas mostraram a predominância do argilomineral caulinita e quantidades ínfimas de minerais primários.

Com os resultados concluídos pode-se fazer algumas correlações entre alguns parâmetros.

De forma geral, os solos da Zona da Mata, assim como os coletados no Sul de Minas, estes em menor evidência, apresentaram uma certa uniformidade para os resultados no que se refere à geologia, pedologia, química, mineralogia e características de ordem geotécnica. As amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes, que apresentam algumas condições diferentes das outras duas regiões estudadas, apresentaram resultados bem diversificados para as características estudadas como: pedologia, química, mineralogia e geotecnia.

Foram realizadas as classificações geotécnicas denominadas convencionais (TRB ou HRB e SUCS) e não-convencionais (MCT), sendo esta última a que teve resultados mais satisfatórios e coerentes.

## ABSTRACT

The work describes about the principal characteristics of the soils non hidromorphic developed by pedogenic processes, referred in geotechnic as soils of lateritic behavior, with horizon diagnosis of the type Latossol (BW) or Podsolíc (BT), for the application in the area of pavements.

The accomplishment of that work had as objective the correlation between characteristics chemical, mineralogical, geological and geotechnical for a group of 33 samples of soils collected partly of the state of Minas Gerais, taking advantage of the road cuts, being done to the description of the thickness of the identified horizons and of the visual characteristics and of touch.

Studies preliminary information as the soil types, according to pedologic maps and previous works, and of the geology of the study area before the collections. In laboratory the samples were submitted to analyses chemical, mineralogical and geotechnical.

The results of the chemical analyses showed that the group of the 33 samples of soils is in advanced state of weathering, indicating low values of  $K_i$  and  $K_r$ . The mineralogical analyses showed the predominance of the clay mineral kaolinite and tiny amounts of primary minerals.

With the concluded results it can be made some correlations among some parameters.

In a general way, the soils of the Zona da Mata, as well as collected in the Sul de Minas, these in smaller evidence, presented a certain uniformity for the results that refers to the geology, pedology, chemistry, mineralogy and characteristics of order geotechnical. The Zona Metalúrgica and Campos das Vertente's samples, that present some conditions different from the other two studied areas, they presented results well diversified for the characteristics studied as: pedology, chemistry, mineralogy and geotechnic.

Geotechnical's classifications denominated conventional (TRB or HRB and SUCS) and non - conventional (MCT) have done, being this last one the one that had more satisfactory and coherent results.

## ÍNDICE

<b>Dedicatória.....</b>	<b>IV</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>V</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista de Fotos.....</b>	<b>XVI</b>

### Capítulo I

<b>Introdução e Objetivo.....</b>	<b>1</b>
I. 1 – Introdução.....	1
I. 2 – Objetivo.....	3

### Capítulo II

<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
II. 1 - Solos Tropicais Lateríticos.....	4
II. 2 - Formação, Evolução e Horizontes dos Solos.....	5
II. 3 - Classificação Pedológica dos Solos.....	9
<b>Metodologia.....</b>	<b>12</b>
II. 4 - Caracterização e Classificação de Solos.....	12
II. 4. 1 – Caracterização de Solos.....	13
II. 4. 2 - Classificações Geotécnicas.....	21
II. 5 - Composição Mineralógica e Química dos Solos.....	26
II. 5. 1 – Mineralogia.....	27
II. 5. 1. 1 - Mineralogia das Argilas.....	28
II. 5. 2 – Química.....	30

### Capítulo III

<b>Características Físicas dos locais de Coleta.....</b>	<b>33</b>
III. 1 - Programa de Coleta de Solos.....	33
III. 2 - Características Físicas dos Pontos de Coleta.....	40
III. 2. 1 – clima.....	40
III. 2. 2 – vegetação.....	42
III. 2. 3 – geologia.....	43
III. 2. 4 – pedologia.....	45
III. 2. 5 – geomorfologia.....	48

### Capítulo IV

<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>50</b>
IV. 1 – Geologia.....	50
IV. 2 – Química.....	56
IV. 3 – Mineralogia.....	63
IV. 4 – Geotécnico.....	66
IV. 4. 1 - Classificações Geotécnicas Convencionais.....	66
IV. 4. 2– Classificação Geotécnica Não-Convencional.....	73

### Capítulo V

<b>Correlações entre Características Químicas, Mineralógicas, Geológicas e Geotécnicas.....</b>	<b>77</b>
V. 1 – Correlações entre a Química e Mineralogia.....	78
V. 2 – Correlações entre a Química e Geologia.....	79
V. 3 – Correlações entre a Química e Pedologia.....	80
V. 4 – Correlações entre a Pedologia e Geologia.....	81
V. 5 – Correlações entre a Geotecnia e Mineralogia.....	81

**Capítulo VI****Considerações Finais.....83****Conclusões e Sugestões.....86****Referências Bibliográficas.....88****LISTA DE TABELAS**

Tabela II. 1: Classe de Solo, Horizonte Diagnóstico, Nomenclatura Tradicional e Atual (MARANGON, 2004).....	8
Tabela II. 2: Correspondência entre nomenclatura tradicional e da EMBRAPA (1999) para Latossolos e Podzólicos.....	9
Tabela II. 3 : Classificação HRB (DNER, 1996).....	23
Tabela II. 4: Argilominerais com suas respectivas distâncias interplanares basais (001).....	29
Tabela III. 1: Classificação pedológica para as amostras ZM, segundo a nomenclatura consagrada e do sistema de classificação de solos da EMBRAPA (1999).....	47
Tabela III. 2: Classificação pedológica para as amostras MV e SL, segundo a nomenclatura consagrada e do sistema de classificação de solos da EMBRAPA (1999).....	47
Tabela IV. 1: Unidades geológicas e litologias predominantes relacionadas aos pontos de coleta da Zona da Mata (baseado na COMIG, 2002).....	51
Tabela IV. 2: Unidades geológicas e litologias predominantes relacionadas aos pontos de coleta da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes (baseado na COMIG, 2002).....	51
Tabela IV. 3: Resultados das análises químicas e teores de umidades das amostras deste estudo.....	57
Tabela IV. 4: Valores da subtração do pH em KCL e H <sub>2</sub> O.....	58
Tabela IV. 5: Valores para os índices de intemperismo Ki e Kr das amostras deste estudo.....	59
Tabela IV. 6: Resultados dos ensaios de complexo sortivo para as amostras da Zona da Mata.....	61
Tabela IV. 7: Resultados dos ensaios de complexo sortivo para as amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes.....	62
Tabela IV. 8: Resultados das análises mineralógicas por Difração de Raios-X.....	64
Tabela IV. 9: Resultados dos ensaios de caracterização tradicional dos solos – granulometria, densidade dos grãos, limites de Atterberg, Índice de grupo e classificações pelos sistemas USCS e TRB, para as amostras ZM.....	68
Tabela IV. 10: Resultados dos ensaios de caracterização tradicional dos solos –	

granulometria, densidade dos grãos, limites de Atterberg, Índice de grupo e classificações pelos sistemas USCS e TRB, para as amostras MV e SL.....69

Tabela IV. 11: Valores dos parâmetros e classes obtidas pela Metodologia MCT de classificação dos solos para as amostras ZM, MV e SL.....74

Tabela V. 1: Percentagens de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e o índice de intemperismo  $K_i$  para a identificação das subclasses, segundo a nomenclatura tradicional (OLIVEIRA et al., 1992).....81

## LISTA DE FIGURAS

Figura II. 1: Aparelho utilizado para a determinação do índice de liquidez.....	14
Figura II. 2: Método de determinação do limite de plasticidade.....	14
Figura II. 3: Gráfico para a determinação do coeficiente de deformação $c'$ .....	18
Figura II. 4: Gráfico para a determinação do coeficiente de compactação $d'$ .....	19
Figura II. 5: Gráfico para a determinação da perda de massa por imersão $P_i$ .....	21
Figura II.6: Gráfico de Plasticidade de Casagrande (ASTM, 1990).....	25
Figura II. 7: Gráfico de classificação MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).....	26
Figura III. 1: Macroregiões de planejamento do Estado de Minas Gerais com destaque para a área de interesse desta pesquisa – mais escura (IGA/CETEC, 1994).....	34
Figura III. 2: Macroregiões de planejamento do Estado de Minas Gerais com destaque para a área de estudo desta pesquisa (IGA/CETEC, 1994).....	35
Figura III. 3: Localização dos pontos de coleta de amostras desta pesquisa em relação às rodovias e municípios próximos, para a região da Zona da Mata.....	37
Figura III. 4: Localização dos pontos de coleta de amostras desta pesquisa em relação às rodovias e municípios próximos, para a região da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes.....	38
Figura III. 5: Localização dos pontos de coleta de amostras desta pesquisa em relação às rodovias e municípios próximos, para a região do Sul de Minas.....	39
Figura III. 6: Variações de temperatura média (em $^{\circ}\text{C}$ ), anual para os pontos de coleta.....	41
Figura III. 7: Variações da precipitação total anual (em mm), para os pontos de coleta.....	41
Figura III. 8: Vegetação Natural para o Estado de Minas Gerais. (SEA, 1980).....	43
Figura III. 9: Mapas de solos do estado de Minas Gerais obtido por AMARAL (1993).....	46
Figura III. 10: Número de amostras deste estudo por variação pedológica, segundo a classificação obtida (nomenclatura consagrada) (MARANGON, 2004).....	48

Figura IV. 1: Mapa geológico da região de coleta das amostras de solos com as respectivas localizações dos pontos.....	50
Figura IV. 2: Quantidade de amostras ZM distribuídas por unidades geológicas.....	53
Figura IV. 3: Quantidade de amostras MV e SL distribuídas por unidades geológicas.....	56
Figura IV. 4: Curvas granulométricas das amostras ZM de 01 a 08.....	70
Figura IV. 5: Curvas granulométricas das amostras ZM de 09 a 16.....	70
Figura IV. 6: Curvas granulométricas das amostras MV.....	71
Figura IV. 7: Curvas granulométricas das amostras SL.....	71
Figura IV. 8: Gráfico de Plasticidade de Casagrande (ASTM, 1990) onde estão distribuídas as 33 amostras de solos.....	73
Figura IV. 9: Gráfico de Classificação MCT dos Solos para as amostras ZM, MV e SL.....	75

**LISTA DE FOTOS**

- Foto II. 1: Equipamento de compactação, utilizado na Metodologia MCT de classificação dos solos, da COPPE – UFRJ.....15
- Foto II. 2: Exemplo de um desprendimento de um solo em um bloco coeso.....20
- Foto II. 3: Aparelho para a identificação dos argilominerais, difratômetro de raios-X.....30

## **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVO**

### **1.1 – Introdução**

Nas regiões tropicais úmidas a análise das coberturas superficiais de alteração, em função de suas características, assume grande importância para a Geologia de Engenharia.

Em Minas Gerais, as condições morfoclimáticas, promovem a formação de coberturas superficiais de espessura significativa, larga distribuição geográfica e profunda complexidade estrutural.

O conhecimento advindo da pedologia tem em muito contribuído para o melhor entendimento das características dos solos formados em climas tropicais, sendo uma poderosa ferramenta para a caracterização do meio físico, e conseqüentemente, vêm contribuir com muitas informações de interesse do Geólogo em aplicações diversas, uma vez que a pedologia fornece o conhecimento de limitações e aptidões de uso das diversas classes de solos.

A identificação apropriada de uma ocorrência de solo a partir da sua classe pedológica, e das informações geológicas é fator preliminar para a caracterização dos materiais a serem utilizados nas mais diversas aplicações da Geologia de Engenharia.

A caracterização das ocorrências referentes a horizontes de solos superficiais, pela pedologia, está associada e se relaciona a um conjunto de informações mais ampla da ocorrência de solo tendo como conseqüência o entendimento mais abrangente deste material a se trabalhar, como em relação a: sua gênese, estrutura, propriedades químicas e mineralógicas, propriedades e características de natureza geotécnica, entre outras.

O conhecimento das características químicas, mineralógicas e físicas nos permite fazer inferência sobre o material de origem, da forma do relevo, do sistema de drenagem e da susceptibilidade aos processos do meio físico como erosão, escorregamentos, recalques e contaminação entre outros.

A Geologia tem um papel importante nessas análises uma vez que, podemos prever alguns resultados que mais tarde poderão vir a se confirmar com os resultados prontos. Entende-se que uma vez compreendidas as características dos solos relacionadas à sua gênese

(evolução pedogenética, estudada pela Pedologia), particularmente as de caráter geotécnico de interesse direto ao profissional de Geologia, as suas limitações e aptidões de uso conhecidas; os resultados das descrições de campo e análises de laboratório podem ser extrapolados para solos semelhantes, com condições de acerto bastante satisfatórias.

O presente trabalho é parte integrante de uma Tese de Doutorado desenvolvida no Setor de Geotecnia – Engenharia Civil da COPPE – UFRJ (Marangon, 2004), e foi realizado em parceria Departamento de Geologia – UFRJ e COPPE – UFRJ.

O trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo que a revisão bibliográfica é apresentada no capítulo 2.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os solos tropicais de comportamento laterítico, levando em consideração a evolução, formação e horizontes dos solos; classificação pedológica, segundo a nomenclatura tradicional e a proposta pela EMBRAPA (1999); caracterização e classificação segundo a Engenharia; composição química e mineralógica dos solos.

No capítulo 3 é apresentado o programa de coleta dos solos indicando a localização dos pontos em relação ao mapa de Minas Gerais e suas macroregiões (Zona da Mata, Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes e Sul de Minas) e as características geoambientais (clima, vegetação, geologia, pedologia e geomorfologia) para cada macroregião de interesse.

No capítulo 4 são descritas e analisadas as características químicas, mineralógicas, geotécnicas, geológicas e pedológicas para o conjunto de amostras distribuídas em parte do estado de Minas Gerais.

No capítulo 5 descreve-se algumas correlações observadas entre as características químicas, mineralógicas, geotécnicas, geológicas e pedológicas dos solos.

No capítulo 6 apresentaram-se as considerações e conclusões finais em relação ao trabalho de pesquisa realizado.

## 1.2 – Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo estudar a correlação entre características químicas, mineralógicas, geológicas e geotécnicas para um conjunto de 33 amostras de solos tropicais argilosos coletados em parte do estado de Minas Gerais.

Foi realizada uma abordagem sobre as diversas características de um conjunto de amostras de solos, latossolos (latossolos) com horizonte diagnóstico B<sub>w</sub> e podzólicos (argissolos) com horizontes diagnósticos B<sub>T</sub>. São apresentadas inicialmente as características geoambientais dos locais de coletas do material e, posteriormente os resultados dos ensaios de laboratório realizado com o objetivo de caracterizar estas amostras de solos. A partir dos estudos de campo e laboratório são apresentadas algumas correlações entre as características químicas, mineralógicas, físicas, pedológicas e geológicas de solos tropicais argilosos de comportamento laterítico.

Para atingir as metas propostas nos objetivos desse trabalho foram realizados:

- estudo geológico,
- classificações pedológicas,
- ensaios químicos,
- ensaios mineralógicos,
- ensaios geotécnicos.

## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### II. 1 – Solos Tropicais Lateríticos

O solo tem sido interpretado de maneira diversa segundo enfoques científicos ou dependendo do objetivo. Para a Geologia, solo é produto do intemperismo físico e químico das rochas, para a Engenharia Civil é um material escavável, que perde sua resistência quando em contato com a água e para a Agronomia é uma camada superficial de terra arável, possuidora de vida microbiana (SALOMÃO e ANTUNES, 1998).

Solo tropical é entendido devido à localização geográfica de formação e desenvolvimento pedogenético. A região deste solo é de clima tropical ou intertropical (quente e úmido). Segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995), este solo é entendido também tecnologicamente como aquele que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento, em relação aos não tropicais em decorrência de atuação de processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas. Estes autores chegam a considerar que não basta que tenha sido formado na faixa astronômica tropical ou em região de clima tropical úmido, mas que possua peculiaridades de interesse geotécnico. Os solos tropicais podem ser divididos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995) em duas classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos.

O termo solo laterítico é usado neste trabalho para designar solos de comportamento geotécnico laterítico, diferente do conceito pedológico.

Na pedologia o conceito de laterítico é um processo de formação do solo, pelo qual esse foi submetido a laterização ou latolização. Existem outros tipos de formação do solo como, podzolização, salinização e gleização, que serão apresentados mais adiante.

Solo de comportamento laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMFE) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura, e/ou que possuem matérias translocados), de perfis bem drenados, desenvolvido sob atuação de clima tropical úmido. Possuem uma fração argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo

das caulinitas e de óxidos e hidróxidos de alumínio e/ou ferro que confere à estrutura poros e agregações altamente estáveis (NOGAMI et al, 1985).

## **II. 2 - Formação, Evolução e Horizontes dos Solos**

Os fatores de formação do solo são cinco:

- Clima: condiciona principalmente a ação da água da chuva e a temperatura.
- Materiais de origem: condiciona a circulação interna da água, a composição e o conteúdo mineral.
- Organismos, vegetais e animais: interferem no microclima, formando elementos orgânicos e minerais, conseqüentemente modifica as características químicas e físicas.
- Relevo: interfere na dinâmica da água, no microclima e nos processos de erosão e sedimentação.
- Tempo: transcorrido sob a ação dos demais fatores.

O desenvolvimento do solo inicia-se com o intemperismo, representado pelos fenômenos físicos e químicos que agindo sobre a rocha, conduzem a formação de materiais não consolidados que constituem o substrato pedogenético. Esse material poderá permanecer no local em que se desenvolveu (solo residual ou autóctone) ou ser transportado para outro local (solo transportado ou alóctone).

A formação do substrato pedogenético é iniciada pelo intemperismo físico e químico. O intemperismo físico atua na desintegração física e mecânica das rochas e é acentuada em função de mudanças bruscas de temperatura, ação desagregadora promovida pelas espécies vegetais de raízes e pela ação da água. Todos esses fatores colaboram e aceleram a alteração da rocha.

O intemperismo químico tem como função fundamental, a presença e circulação de água e a temperatura. Dependendo destes dois fatores o ambiente fica adequado ao desenvolvimento de reações, provocando varias transformações, por exemplo, de minerais primários da rocha original em minerais secundários, que passam a constituir um complexo

de alteração. O processo de alteração química mais importante é a hidrólise e esta se destaca em regiões de clima tropical e subtropical, onde a precipitação é maior que a evapotranspiração. Há outros processos como a hidratação, dissolução, carbonatação, oxidação e redução.

O intemperismo biológico é uma combinação de efeitos físicos e químicos, onde a ação de raízes, de escavação de animais e os ácidos vegetais são exemplos desse intemperismo.

Os processos de evolução pelos quais os solos são submetidos, segundo SALOMÃO e ANTUNES (1998), são:

- Podzolização (formação dos podzólicos): fenômenos característicos de regiões de clima temperado, condicionado por acúmulo de matéria orgânica, produção de ácidos húmicos, dispersão de sesquióxidos de ferro e alumínio e enriquecimento em sílica, em certos casos constitui mais de 80% da fração mineral dos horizontes superiores;
- Laterização (formação dos latossolos): fenômeno característico de regiões de clima tropical e intertropical (quente e úmido), condicionado pela lixiviação de bases e sílica produzidos por hidrólise, acumulação de sesquióxidos de ferro e alumínio e produção de argilominerais do grupo caolinítico;
- Salinização: fenômenos característicos de regiões de clima árido ou semi-árido, condicionado pela concentração de bases na forma de sais, que se precipitam nos horizontes superiores;
- Gleização: fenômeno também conhecido por hidromorfia, característico de locais saturados em água (microclima úmido e/ou terrenos mal-drenados), onde cátions metálicos, especialmente o ferro, se mantém na forma reduzida, favorecendo sua lixiviação, normalmente acompanhada pela remoção de argilominerais.
- Carbonatação: Processo que leva à concentração de carbonato de cálcio no solo, e a precipitação é menor que a evapotranspiração potencial, na maior parte do ano.

À medida que os processos físicos e químicos denominados intempéricos vão atuando, a camada de solo vai se tornando mais espessa e se diferenciando em subcamadas morfológicamente distintas, ou seja, há diferenciação vertical entre os horizontes, que definem o perfil de solo. Segundo SALOMÃO e ANTUNES (1998), os horizontes que compõem os perfis de solo, quando refletem os processos pedogenéticos (adição, translocação, perda e transformação), são denominados horizontes pedogenéticos, quando não refletem esta ação, convém denominá-los de camadas. Estes horizontes possuem características morfológicas como: cor, textura, estrutura, cerosidade, porosidade, consistência, cimentação, eflorescências e nódulos e concreções. Esses conjuntos de aspectos configuram o procedimento chamado análise tátil-visual.

Descrevem-se, os principais horizontes, que são em pedologia descritos por letras maiúsculas (POLIVANOV, 2000):

- O** Horizonte superficial, de constituição orgânica, sobreposto a alguns solos minerais. Formado em condições de drenagem sem restrições que possam resultar em estagnação de água.
- H** Horizonte sem constituição orgânica, superficial ou não, composto de resíduos acumulados sob condições de prolongada estagnação de água.
- A** Horizonte mineral, superficial ou em seqüência a horizonte ou camada O ou H, de concentração de matéria orgânica mineralizada. A matéria orgânica é incorporada ao solo mais por atividade biológica do que translocação. É o horizonte de maior atividade biológica, apresentando coloração escurecida.
- E** Horizonte mineral, cuja característica principal é a perda de argila, ferro, alumínio ou matéria orgânica com resultante concentração residual de areia e silte, constituídos de quartzo ou outros minerais resistentes. Usualmente tem coloração mais clara do que o horizonte imediatamente abaixo.
- B** Horizonte mineral bastante afetado por transformações pedogenética, em que pouco ou nada resta de estrutura original da rocha. O horizonte B pode encontrar-se à superfície em consequência da remoção de E, A ou O por erosão.

- C** Horizonte ou camada mineral de material inconsolidado sob o solum (horizonte A+B), relativamente pouco afetado por processos pedogenéticos, similar ao material a partir do qual o solum pode ou não ter se formado.
- R** Camada mineral de material consolidado, constituindo substrato rochoso contínuo ou praticamente contínuo.

Na tabela II. 1 abaixo há correspondência entre os grupos de solos propostos por SALOMÃO e ANTUNES (1998), as classes pedológicas segundo a nomenclatura tradicional e proposta pela EMBRAPA (1999) e para as classes pedológicas dos Latossolos e Podzólicos, de interesse desta pesquisa, apresenta-se uma correspondência entre as nomenclaturas tradicional e a do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, na tabela II. 2.

Tabela II. 1: Classe de Solo, Horizonte Diagnóstico, Nomenclatura Tradicional e Atual (Marangon, 2004).

<i>Classe de Solo</i>	<i>Horizonte Diagnóstico</i>	<i>Nomenclatura Tradicional</i>	<i>Classificação EMBRAPA(1999)</i>
Minerais Não Hidromórficos	B Latossólico	Latossolo	Latossolos Plintossolos
	B Textural	Podzólico Terra Roxa Estruturada Brunizem	Argissolos, Alissolos, Nitossolos, Luvisolos, Plintossolos. Nitossolos, Argissolos Chernossolos
	B Câmbico	Cambissolo	Cambissolos
	Sem Horizonte B	Litossolo	Neossolos
Minerais Hidromórficos	Materiais Arenosos	Podzol Podzol Hidromórfico Areia Quartzosa Hidromórfica	Espodossolos Espodossolos Neossolos
	Materiais Areno-argiloso ou Argilo-arenoso	Glei Cinzento Planossolo Planossolo Sódico	Gleissolos Planossolos Planossolos
	Materiais Argilosos	Glei Húmico Glei Pouco Húmico Glei Salino Tiomórfico	Plintossolos Gleissolos Gleissolos
Outros Solos		Areias Quartzosas Vertissolos Orgânicos	Neossolos Vertissolos Organossolos

Tabela II. 2 - Correspondência entre nomenclatura tradicional e da EMBRAPA (1999) para Latossolos e Podzólicos.

<i>Classe de Solo</i>	<i>Classificação EMBRAPA (1999)</i>	<i>Nomenclatura Tradicional</i>
Latossolos	Latossolos	Latossolos, excetuadas algumas modalidades de Latossolos Plínticos
Podzólicos	Alissolos	Podzólico Bruno Acizentado Distrófico ou Álicos, Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico ou Álico, Ta, e alguns Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico ou Álico Tb
	Argissolos	Podzólico Vermelho-Amarelo Tb, Podzólico Vermelho-Escuro Tb com B textural e o Podzólico Amarelo.
	Nitossolos	Alguns Podzólico Vermelho-Escuro Tb e alguns Podzólico Vermelho-Amarelo Tb.
	Luvisolos	Podzólico Vermelho-Amarelo Eutróficos e similares

### II. 3 - Classificação Pedológica dos Solos

As classes ou unidades pedológicas apresentam-se para maior facilidade de interpretação, como proposto por SALOMÃO e ANTUNES (1998), em três grupos: i – Solos Minerais Não Hidromórficos, ii - Solos Minerais Hidromórficos e iii – Outros Solos.

#### i – Solos Minerais Não Hidromórficos

Este grupo contempla os solos a serem estudados nesta pesquisa (latossolos e podzólicos, atual argissolos), onde se situam os denominados solos lateríticos.

Compreende solos desenvolvidos na zona de oxidação do terreno, pouco afetados pelo lençol freático e possui ótimas condições de drenagem. Esses solos podem se desenvolver a partir da pedogênese de diferentes tipos de rochas, como as rochas ígneas, metamórficas e sedimentares ou coberturas aluvionares e coluvionares. Inclui-se neste grupo:

- solos com horizonte B latossólico: caracterizado pelos latossolos em geral;
- solos com horizonte B textural: caracterizado pelos diversos podzólicos (atual argissolos) e Brunizem (atual chernossolo);

- solos com horizonte B câmbico ou incipiente: Cambissolo (atual neossolo câmbico);
- solos rasos, sem horizonte B: Litossolo (atual neossolo litólico).

Os solos com Horizonte B latossólico ou latossolos apresentam uma seqüência dos horizontes A, B e C com pouca diferenciação textural entre os horizontes A e B, notando-se uma certa homogeneidade. O horizonte B em geral é muito espesso e tem como característica a estrutura granular, microagregada ou maciça porosa, não apresentam minerais primários pouco resistentes ao intemperismo e a fração argila possui um alto grau de floculação e são constituídos basicamente de óxidos de ferro (hematita, goetita), óxido de alumínio (gibbsite) e argilominerais do grupo 1:1 (caulinita) (POLIVANOV, 2000).

Os latossolos podem ocorrer em relevos suaves de vertentes pouco declivosas. Essa tendência de localização geomorfológica dos latossolos deve-se ao fato desses se desenvolverem especialmente por ação das águas de infiltração, que provocam alteração dos minerais presentes e a remoção por lixiviação de substâncias como bases e sílicas, deixando *in situ* substâncias menos solúveis como ferro e alumínio na forma oxidada e propiciam condições favoráveis para a formação de argilominerais do grupo da caolinita.

Os solos com horizonte B textural, como os podzólicos (argissolos), apresentam a seqüência dos horizontes A, B e C com diferenciação nítida entre eles. O horizonte A apresenta textura mais arenosa e o horizonte B uma concentração de argila maior. O horizonte B é caracterizado pela cerosidade que é uma película coloidal com aspecto brilhante quando úmido e localiza-se nas paredes dos agregados estruturais ou dos macroporos. O horizonte A pode em alguns casos ser muito espesso podendo alcançar 1 m de espessura. O horizonte B textural é muito heterogêneo com subhorizontes facilmente delimitáveis e estrutura, geralmente em forma de blocos ou prismática. A fração argila do horizonte B apresenta baixo grau de floculação, podendo ser ativa ou inativa, dependendo dos argilominerais predominantes. O horizonte C é representado pelo material de origem (POLIVANOV, 2000).

É comum a associação de latossolos e podzólicos em relação a geomorfologia. Os primeiros se desenvolvem nas porções menos declivosas das vertentes e, os segundos, nas porções mais declivosas.

Os solos com horizonte B incipiente, os Cambissolos (atual neossolo câmbico) são solos caracterizados essencialmente pelo horizonte B incipiente – Bi, cujas características gerais são: presença de minerais primários facilmente intemperizáveis; argila mais ativa; Ki maior que 2,2; teores elevados de silte em relação à argila; ausência de cerosidade; espessura menor que 50 cm; podem apresentar resquícios da rocha mãe ou saprolito. Os solos que possuem este horizonte ocupam, geralmente, as partes jovens da paisagem. Os Cambissolos, assim como os solos com B textural, constituem um grupo bastante heterogêneo em termos de ambiente (RESENDE et al., 1999)

Os solos sem horizonte B, os Litossolos (atual neossolo litólico), são solos rasos, sobre rocha. Geralmente, em condições de topografia acidentada, há a formação de um solo raso, menor que 50 cm, perfil tipo A-R, isto é um horizonte A sobre a rocha ou o tipo A-C-R, sendo o C pouco espesso. Onde há muito afloramento de rocha, muitas vezes estes solos estão presentes (RESENDE et al., 1999).

#### ii - Solos Minerais Hidromórficos

Estes solos ocupam os terrenos baixos ou pequenos anfiteatros elevados que se constituem em cabeceiras de drenagem, sendo formado a partir de capeamentos ou coberturas detríticas sobre rochas cristalinas. Os Solos Hidromórficos são desenvolvidos bem próximos à zona saturada ou na própria zona saturada, portanto em condições de excesso de umidade, em que o lençol freático está próximo da superfície do terreno, podendo aflorar em períodos mais chuvosos. Esse ambiente é favorável à transformação de ferro férrico em ferroso (redução).

A característica pedológica comum aos Solos Hidromórficos é a presença de horizonte glei, marcada pela coloração própria do ferro na forma reduzida (cinza, esverdeada, azulada), formando mosqueado (manchas) em intensidade variada.

O grupo de Solos Hidromórficos abrange várias classes, diferenciadas por características específicas como, a natureza textural do material de origem, local de formação, natureza química da água, superficial ou subsuperficial e a posição do lençol freático em relação à superfície do terreno.

Inclui-se neste grupo:

- Solos desenvolvidos a partir de matérias arenosos, dando origem em geral, a solos com horizonte B podzol (atual espódico), como o Podzol (atual espodossolo), Podzol Hidromórfico (atual espodossolo) e Areia Quartzosa Hidromórfica;
- Solos desenvolvidos a partir de materiais areno-argilosos ou argilo-arenosos, provenientes tanto de sedimentos aluvionares, como de alteração, dando origem a solos denominados Gleissolos Cinzentos e Planossolos;
- Solos desenvolvidos a partir de materiais argilosos, provenientes de sedimentos de diferentes procedências, dando origem a solos do tipo Gleissolos Húmico, Pouco Húmico e Salino Tiomórfico.

### iii – Outros Solos

O sistema de classificação reúne ainda outros solos não enquadráveis nos grupos anteriores, a saber:

- Areias Quartzosas;
- Vertissolos;
- Solos Orgânicos.

## **METODOLOGIA**

### **II. 4 - Caracterização e Classificação de Solos**

O sistema de classificação de solos podem ser divididos em convencionais e não-convencionais.

As classificações convencionais se baseiam em ensaios de caracterização, tais como o de granulometria e os Limites de Atterberg. Como principal sistema de classificação não-convencional tem-se o sistema MCT de classificação dos solos que se baseia no ensaio de compactação (miniatura) e no ensaio de perda de massa por imersão.

## II. 4. 1 – Caracterização de Solos

### (i) granulometria

A análise granulométrica de um material consiste na determinação das dimensões das partículas que compõem um solo e das proporções relativas em que elas se encontram, sendo representada graficamente pela curva de distribuição granulométrica. Esta curva é plotada em um diagrama semi-logarítmico, cujo eixo das abcissas tem o logaritmo do tamanho das partículas e nas ordenadas em escala aritmética a percentagem que passa acumulada da amostra total.

Na determinação da fração considerada grossa do solo, isto é, partículas com dimensões maiores do que 0,074 mm (peneira de nº 200 da ASTM), foram utilizados os procedimentos, de acordo com o método de ensaio ME 80/94 Solos – análise granulométrica por peneiramento, do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER).

A metodologia de ensaio, adotada para a determinação da granulometria das partículas menores que 0,074 mm, também foi a do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), ME 51-94 Solos - análise granulométrica. O hexametáfosfato de sódio foi o defloculante utilizado para a dispersão das partículas dos solos, com duração de 15 minutos no aparelho dispersor. No cálculo da granulometria por sedimentação, utiliza-se o valor da massa específica dos solos, tendo sido obtidos a partir da metodologia de ensaio do DNER ME 93-94 Solos – determinação da densidade real.

### (ii) Limites de Atterberg

Os limites de liquidez e de plasticidade, definidos por Atterberg em 1911, e que em conjunto com a granulometria, são utilizados para classificar os solos segundo a TRB e a SUCS. Através da diferença entre os limites de liquidez e o de plasticidade é possível obter-se o índice de plasticidade (IP), parâmetro também utilizado nas citadas classificações.

O valor do limite de liquidez pode ser obtido através do método de ensaio do DNER, ME 122/94, enquanto o limite de plasticidade determina-se através da metodologia ME 82/94 do citado Órgão. A figura II. 1 mostra o aparelho utilizado para a determinação

do limite de liquidez e a figura II. 2 mostra o método de determinação do limite de plasticidade.

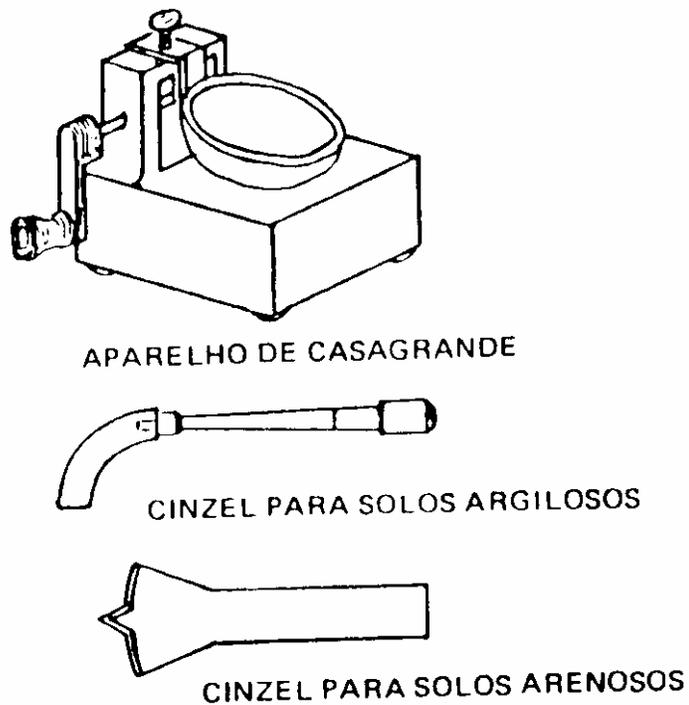


Figura II.1 – Aparelho utilizado para a determinação do índice de liquidez.

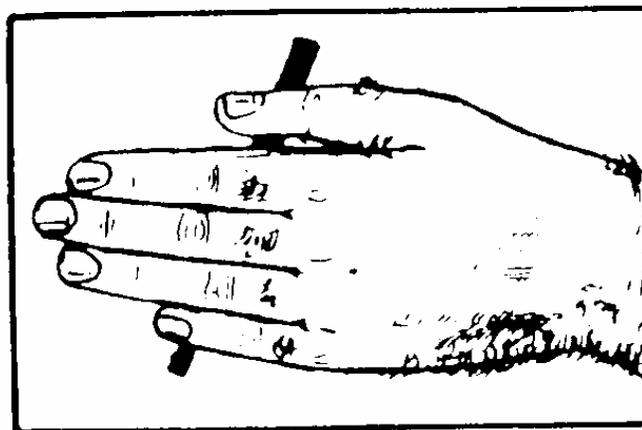


Figura II. 2 – Método de determinação do limite de plasticidade.

### (iii) Ensaio de Compactação

Para a realização do ensaio de compactação, executado em equipamento miniatura, utiliza-se:

- Molde cilíndrico (diâmetro=50mm), limitando o uso à solos que passam integralmente na peneira de 2,0mm, ou com fração retida não significativa.
- Soquete de seção plana com peso variável (leve com 2270g e pesado com 4500g) e queda livre de 30,5cm.
- Base de pistão que permite a movimentação do molde durante a compactação, distribuindo melhor a energia aplicada pelo soquete.
- Dispositivo manual que permite extração do corpo de prova.

Tem-se como método MCV, os seguintes procedimentos:

A foto II. 1 mostra o equipamento de compactação, utilizado na Metodologia MCT de classificação dos solos, da COPPE – UFRJ.



Foto II. 1: Equipamento de compactação, utilizado na Metodologia MCT de classificação dos solos, da COPPE – UFRJ.

### Método MCV (designado de Mini-MCV)

Para cada umidade aplicam-se, sucessivamente, energias crescentes, até não se conseguir aumento sensível da densidade. Assim, obtém-se sempre uma família de curvas de compactação, após o término do ensaio.

O procedimento do MCV, “valor da condição de umidade” (Moisture Condition Value) foi proposto por Parsons em 1976 (PARSONS, 1976) objetivando, sobretudo o controle de compactação na Inglaterra, com cilindros de 100mm e soquete de 7kg. A adaptação para solos tropicais com o uso de CPs (corpos de prova) de 50mm foi proposta por Nogami e Villibor em 1980 (NOGAMI e VILLIBOR, 1980).

Da amostra seca ao ar e passada na peneira de 2mm separam-se pelo menos 5 porções com diferentes umidades, compreendendo uma faixa um pouco mais ampla que normalmente adotada no ensaio de compactação tradicional.

Toma-se uma porção com determinada umidade (H1) e pesam-se 200g, introduzindo-a no molde que deve ser devidamente posicionado no equipamento de compactação, sendo utilizado junto do cilindro de compactação um espaçador. Dá-se o primeiro golpe ( $n=1$ ) e mede-se a altura  $A_1$ .

Retira-se o espaçador e repetem-se as operações de medida de altura após o primeiro golpe, para  $n=2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, \dots, n, \dots, 4n$ , sendo finalizada a compactação quando:

- a diferença de altura entre leituras sucessivas for menor que 0,1mm
- 4n golpes atingir 256 golpes
- houver nítida expulsão de água no CP

Repetem-se as operações para os outros teores de umidade, H2, H3, H4,...

Em relação a primeira condição para finalização da compactação, o DNER (1994) diz que se deve interromper a compactação quando a diferença entre leituras  $a_{4n} - a_n$  for menor que 2,0 mm.

#### *a) Curvas de Deformabilidade (Mini-MCV) - Coeficiente $c'$*

Para cada teor de umidade traça-se a curva  $n \times (a_{4n} - a_n)$  (número de golpes  $\times$  diferença de altura) em escala monolog ( $\log_{10}$ ) para  $n$ . Estas curvas de deformabilidade são

denominadas curvas Mini- MCV porque a partir delas pode-se determinar o valor da condição de umidade, tomando-se a curva correspondente a um determinado teor de umidade e procurando-se a sua interseção com a reta de equação  $a=2\text{mm}$ , que foi adotada como referência para os CP (copo de prova) da metodologia, determinando assim o valor de golpes  $B_i$  correspondente. Define-se Mini MCV para cada teor de umidade pela expressão II. 1.

$$\text{Mini MCV} = 10 \times \text{Log}_{10} (B_i) \quad (\text{II. 1})$$

Para facilitar a determinação do Mini-MCV correspondente a cada teor de umidade as folhas de ensaio poderão já apresentar uma escala com os valores  $10 \times \text{Log}_{10} (B_i)$ .

O Coeficiente  $c'$  é o coeficiente angular (sem sinal) da reta “assimilável” à curva Mini-MCV (com o uso da escala linear no eixo das abscissas). Assim, para cada curva ( $a_{4n} - a_n$ ) x golpes, correspondente a uma umidade, tem-se um  $c'$ .

Foi adotada a curva de deformabilidade correspondente a Mini-MCV igual a 10 a ser obtida diretamente ou por interpolação gráfica apropriada visto que raramente se obtém uma com Mini-MCV igual a 10.

A figura II. 3 apresenta o gráfico para a determinação do coeficiente de deformação  $c'$ , cuja reta “assimilável” à curva Mini-MCV igual a 10 é a de cor rosa.

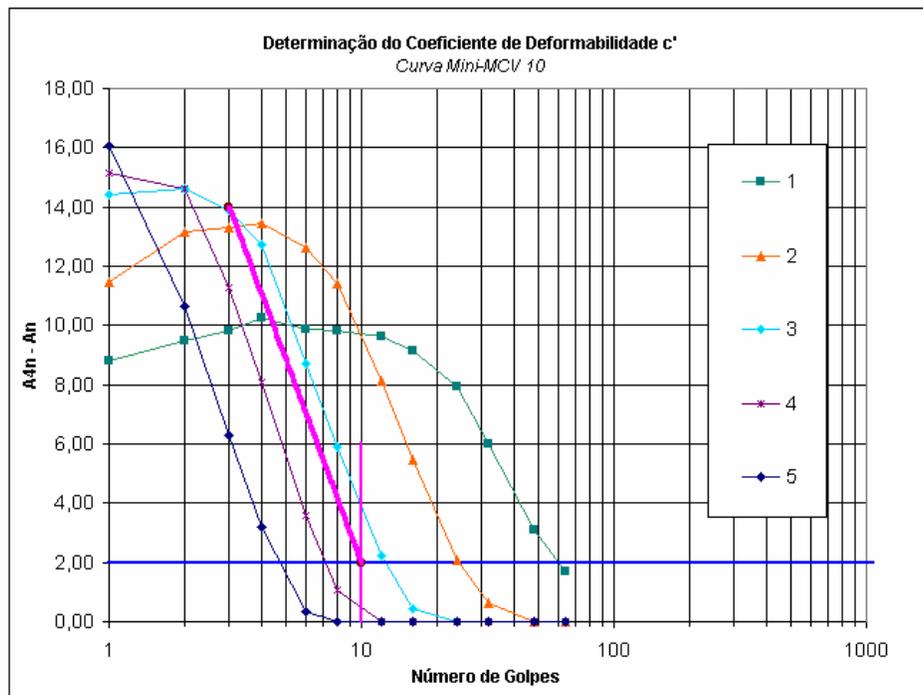


Figura II. 3: Gráfico para a determinação do coeficiente de deformação  $c'$ .

b) *Curvas de Compactação - Coeficiente  $d'$*

Calculadas as massas específicas aparentes secas (MEAS) traça-se a família de curvas de compactação.

O coeficiente  $d'$  é definido como a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV e o teor de umidade de compactação correspondente expresso em %. A figura II. 4 apresenta o gráfico para a determinação do coeficiente de compactação  $d'$ .

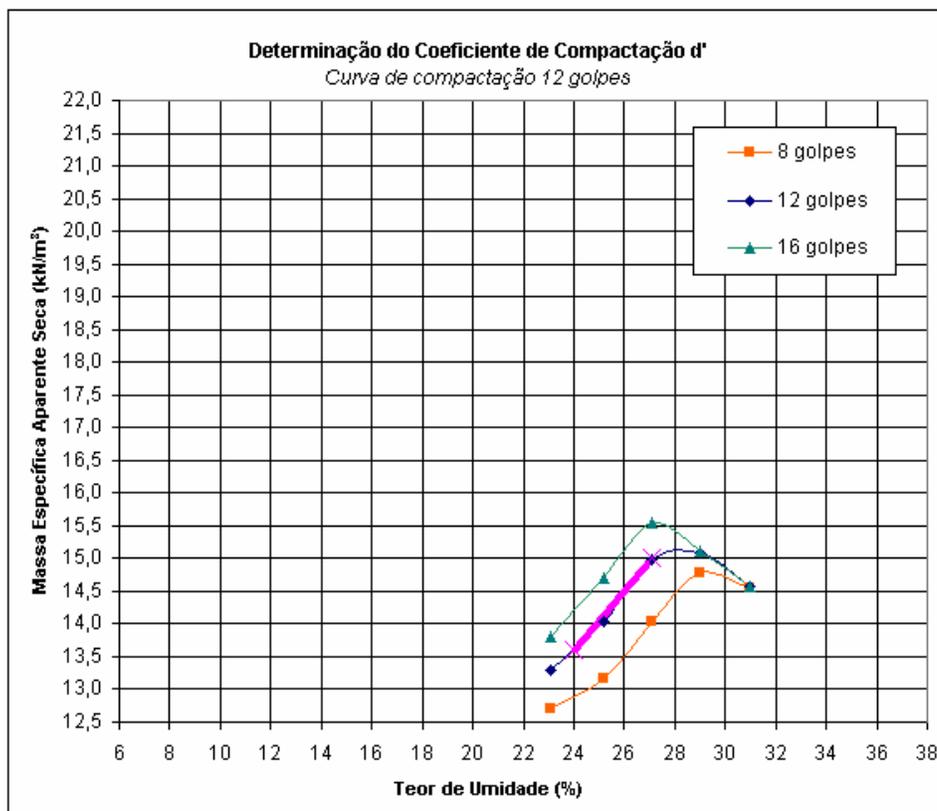


Figura II. 4: Gráfico para a determinação do coeficiente de compactação  $d'$ .

#### iv - Ensaio de Perda de Massa por Imersão em Água

Para a determinação do valor da perda de massa por imersão são utilizados os corpos de prova compactados segundo o procedimento Mini-MCV.

Os corpos de provas são parcialmente extraídos dos moldes de compactação, de maneira que fiquem com saliência de 10mm, e imersos em uma cuba preenchida com água, anotando o comportamento nas primeiras horas. Após cerca de 20 horas esgota-se a água e secam-se as cápsulas que contêm a parte desagregada para pesagem.

Obtém-se o “ $P_i$ ” expresso pela massa seca em percentagem da massa seca da parte do corpo de prova inicialmente saliente, para cada teor de umidade. No caso de desprendimento do solo em bloco coeso, visto na foto II. 2, o “ $P_i$ ” a ser adotado é o valor multiplicado por 0,5 (fator de redução).



Foto II. 2: Exemplo de um desprendimento de um solo em um bloco coeso.

O valor de “Pi” a ser usado para fins classificatórios é obtido por interpolação gráfica, traçando-se a curva de variação das percentagens acima obtidas,  $P_i \times \text{Mini-MCV}$ , procurando-se o valor correspondente a Mini-MCV 10 ou 15, conforme se trate de solo de baixa ou elevada massa específica aparente, conceito fixado de acordo com o seguinte:

Considera-se baixa MEAS quando a altura final do corpo de prova para Mini-MCV igual a 10 for igual ou maior que 48mm e elevada MEAS quando não se obtiver a condição anterior. A figura II. 5 apresenta o gráfico para determinação da perda de massa por imersão.

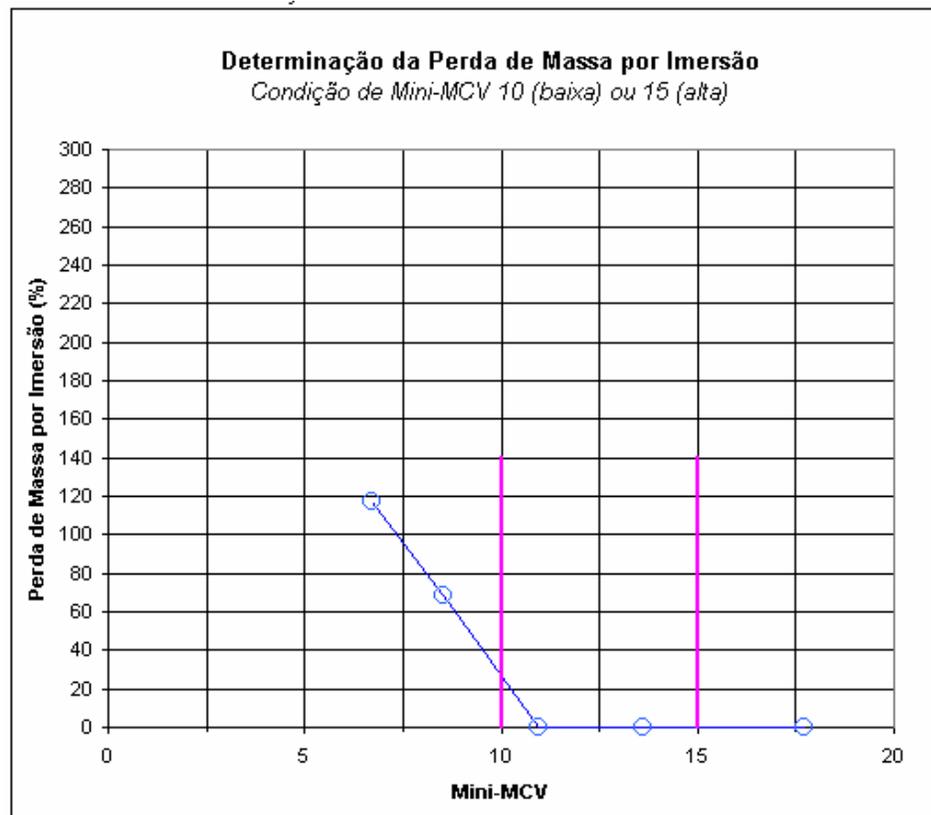


Figura II. 5: Gráfico para a determinação da perda de massa por imersão  $P_i$ .

#### II. 4. 2 - Classificações Geotécnicas

A Classificação Geotécnica é muito importante, pois ela fornece as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos. Essa classificação utiliza os ensaios de granulometria e os limites de Atterberg, visto acima, para determinar e classificar os estados dos solos.

Destacam-se as classificações denominadas convencionais: i - TRB (Transportation Research Board) ou HRB (Highway Research Board) e ii - USCS (Unified Soil Classification System) ou SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e não convencionais : (iii) MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).

### i – A Classificação TRB ou HRB

Segundo PASTORE e FONTES (1998), esta classificação é mais aplicada em estrada, sendo também conhecida como AASHTO. Originária da antiga classificação do *Bureau of Public Roads*, subdividida em oito grupos (A-1 a A-8), de acordo com sua granulometria, sendo o grupo A-1, o grupo com melhores propriedades e o A-8, o de pior qualidade.

Foi realizada uma revisão entre 1943 e 1945 pelo *Highway Research Board*, essa revisão passou a ser conhecido como HRB. Nesta revisão alguns grupos foram subdivididos e foi introduzido o Índice de Grupo (IG), que é função da porcentagem em peso do material com diâmetro menor que 0,074mm, do limite de liquidez (LL) e do índice de plasticidade (IP). O IG é um número inteiro, sendo obtido através da seguinte fórmula:

$$IG = (F-35) [0,2 + 0,005 (LL-40)] + 0,01 (F-15) (IP-10)$$

onde:

F = porcentagem de solo que passa na peneira 0,074mm, expressa como número inteiro.

Esta porcentagem é baseada somente no material que passa na peneira 75mm(3”);

LL = limite de liquidez, expresso em porcentagem;

IP = índice de plasticidade, expresso em porcentagem.

A classificação geral do HRB, mostrada na tabela II. 3, divide o solo em dois tipos de materiais, os granulares (%passando na peneira n° 200  $\leq$  35%) e os siltosos e argilosos (%passando na peneira n° 200  $>$  35%). A classificação de um determinado solo é realizada por enquadramento no seu respectivo grupo e em seguida, caso exista, em um subgrupo através do processo de eliminação no sentido da esquerda para a direita. O solo será classificado pelo primeiro grupo ou subgrupo, cujos valores apresentados pelo material ensaiado em laboratório (granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade), enquadre-se nas características geotécnicas exigidas pela citada tabela. É utilizado também o índice de grupo (IG), que varia de 0 a 20, onde quanto maior for este valor pior será a capacidade de suporte do solo como terreno de fundação (subleito) do pavimento (CHAVES, 2000).

Tabela II. 3 : Classificação HRB (DNER, 1996).

Classificação Geral	Solos granulares ( 35% ou menos da fração passando na malha 200)						Solos siltsos e argilosos ( Mais de 35% da fração na malha 200)					
	A - 1		A - 3	A - 2			A - 4	A - 5	A - 6	A - 7		
Classificação por Grupos e Subgrupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7					
Análise Granulométrica												
% passando na malha 10	<< 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
% passando na malha 40	< 30	< 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	
% passando na malha 100	< 15	< 25	< 10	< 35	< 35	< 35	< 35	> 35	>35	>35	>35	
Características referentes aos limites de consistência												
Limite de liquidez	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
Índice de plasticidade	< 6	NP	< 10	< 10	> 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10	
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	< 4	< 4	<< 8	< 12	< 16	< 20	
Tipo de material	Pedregulho e areia		Areia fina	Pedregulho e areias siltsos ou argilosas			Solos Siltsos		Solos argilosos			
Comportamento como camada do pavimento	Excelente a Bom					Regular a Mau						

## ii – Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)

Esta classificação foi desenvolvida por Casagrande entre 1942 e 1944. A terceira revisão foi publicada em um artigo de CASAGRANDE (1948) pela American Society of Civil Engineers (ASCE). Esta classificação visava principalmente a sua aplicação na seleção de materiais para projetos de aeroportos militares.

Conforme PASTORE e FONTES (1998), os solos são agrupados em 14 grupos, representados por duas letras, da seguinte maneira:

**solos grossos:** GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, SC

**solos finos:** CL, ML, OL, CH, MH, OH, PT

O significado da primeira letra é o seguinte:

G: gravel (pedregulho)

S: sand (areia)

C: clay (argila)

M: mo (silte em sueco)

O: organic (orgânico)

PT: peat (turfa)

e o significado da segunda letra:

para os **solos grossos** (indicando a granulometria)

W – well (bem graduada)

P – poor (mal graduada)

M – mo (silte em sueco)

C – clayed (argiloso)

para os **solos finos** (indicando a plasticidade)

L – low (baixa plasticidade)

H – high (alta plasticidade)

A SUCS publicada pela ASTM (1990), divide o material em três classes de acordo com o tamanho das partículas. Apresenta-se abaixo o gráfico de plasticidade de Casagrande (ASTM, 1990), figura II. 6.

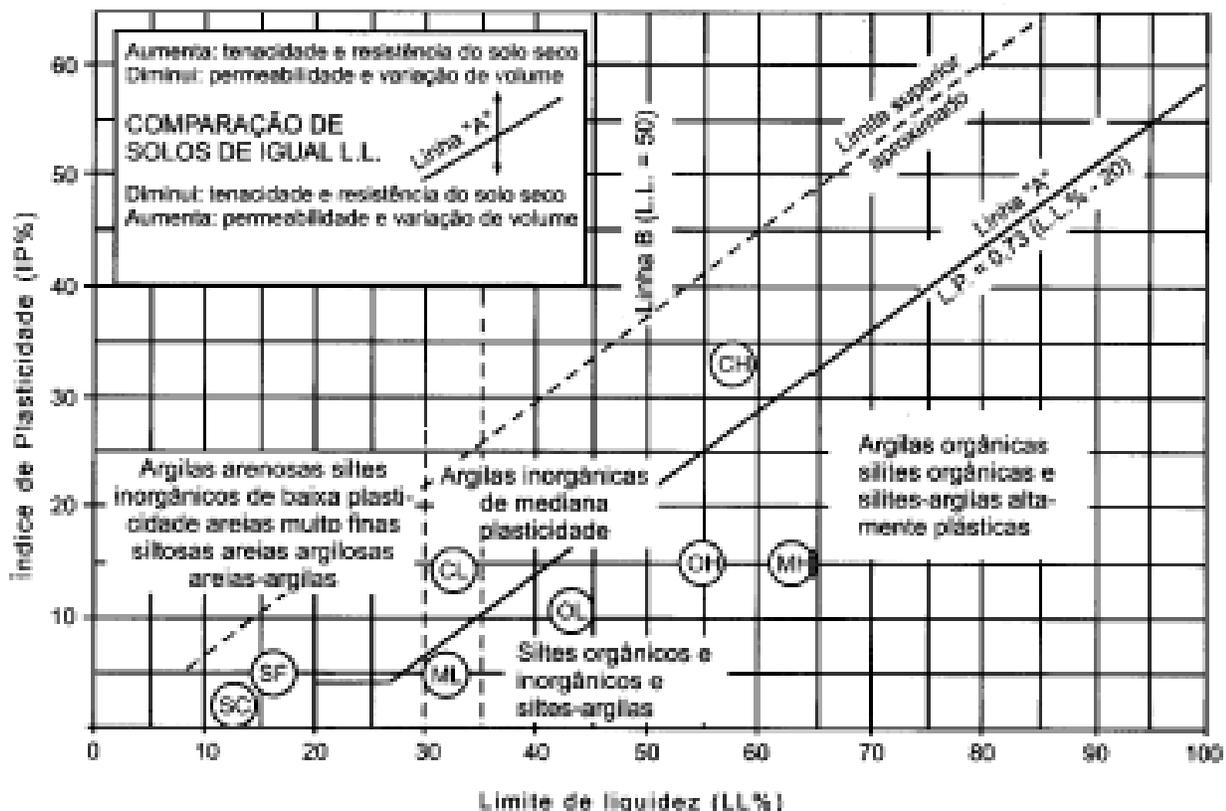


Figura II. 6: Gráfico de Plasticidade de Casagrande (ASTM, 1990).

### (iii) Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)

A classificação geotécnica MCT baseia-se na determinação de algumas propriedades mecânicas e hidráulicas em corpos de provas de 50 mm de diâmetro. Essa classificação é apropriada apenas para solos de granulação fina, que passam integralmente na peneira de 2,0mm ou que têm uma percentagem desprezível retida nesta peneira, ou que a sua influência nas propriedades do solo, possa ser avaliada para que os resultados obtidos sejam devidamente corrigidos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Os ensaios e dados a serem obtidos, em resumo, são:

- a) Ensaio de Compactação - Procedimento Mini-MCV
  - . coeficiente  $c'$
  - . coeficiente  $d'$
- b) Ensaio de Perda de massa por imersão

. Perda de massa “Pi”, correspondente a Mini-MCV 10 (MEAS baixa) ou Mini-MCV 15 (MEAS alta)

. Curva “Pi” x Mini MCV, que pode ser necessária como critério auxiliar de decisão

c) Cálculo do índice  $e'$  pelo emprego da expressão II. 2:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (\text{II. 2})$$

A determinação do grupo classificatório se dá a partir de gráfico em que se tem no eixo das abscissas, o coeficiente  $c'$  e no eixo das ordenadas, o coeficiente  $e'$ . O grupo é obtido diretamente no gráfico da figura II. 7.

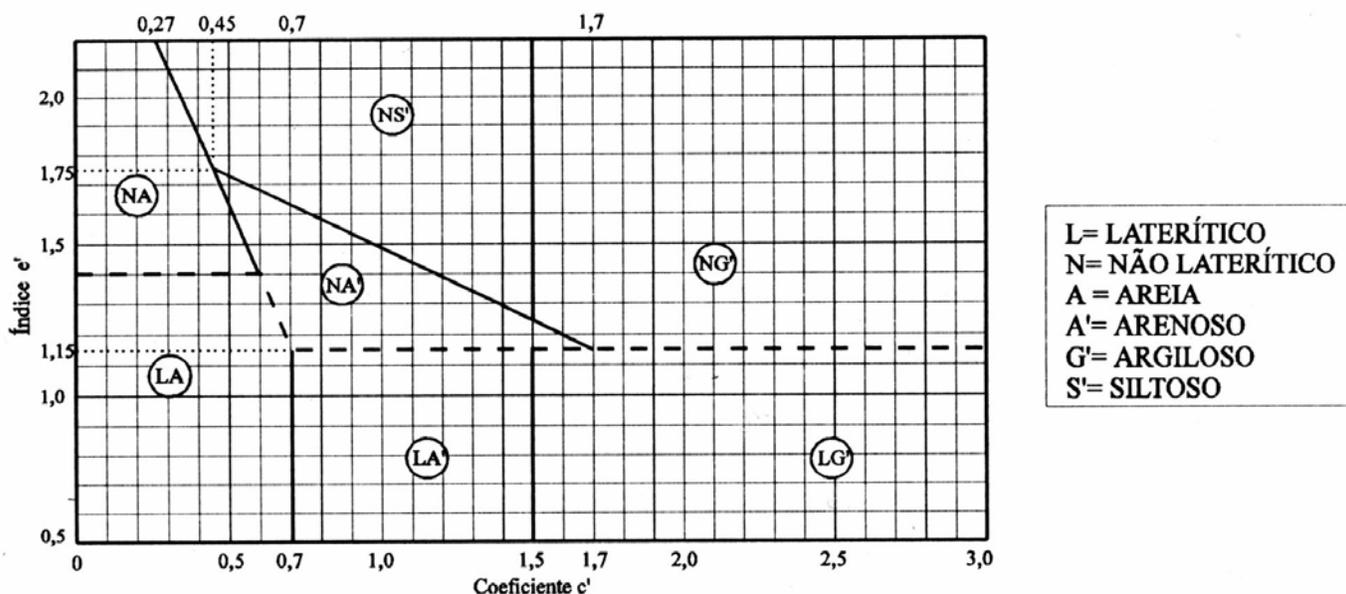


Figura II. 7 – Gráfico de classificação MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

## II. 5 - Composição Mineralógica e Química dos Solos

A natureza da rocha matriz, sua composição mineralógica e química exercem grande influência sobre as características do solo da qual se origina. Em muitos casos, “a composição mineralógica e química da rocha matriz não só determinam a eficácia das

*forças de intemperismo, como também controlam, ocasional e parcialmente, a vegetação natural” (BUCKMAN e BRADY, 1960).*

A constituição da fração argila dos solos argilosos tropicais, sobretudo dos lateríticos, desempenha um papel decisivo no comportamento peculiar desses solos. Daí a necessidade de se conhecer as peculiaridades de constituição dos solos tropicais, mesmo que sua determinação só possa ser feita excepcionalmente (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

## **II. 5. 1 - Mineralogia**

Em relação à mineralogia na fração granulométrica argila, podemos destacar os seguintes minerais: i – argilominerais e ii – óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro.

### i – Argilominerais

Argilominerais são silicatos hidratados de alumínio, podendo conter ferro, magnésio, potássio, sódio, lítio e etc., em sua composição (POLIVANOV, 1984).

São constituídos, estruturalmente, por grupos de tetraedros de  $(\text{SiO}_4)^{-4}$  e de octaedros de  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  ou  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ , ambos com arranjo hexagonal. Os tetraedros e os octaedros de ligam dando origem á diversas estruturas cristalinas dos grupos dos argilominerais. A exceção do grupo sepiolita – paligorquita (fibrosos), os argilominerais tem a estrutura lamelar e se dividem desta forma:

- grupo das caulinitas (caulinita, haloisita, endelita, etc.)
- grupo das esmectitas (montmorilonita, beidelita, nontronita, etc.)
- grupo das ilitas
- grupo das vermiculitas
- grupo das cloritas
- grupo dos argilominerais de camadas mistas ou interestratificados

Os argilominerais se formam por decomposição de minerais primários, por diagênese e por alteração hidrotermal.

Os argilominerais caracterizam-se por possuir uma série de propriedades peculiares, das quais se destacam: a grande superfície específica, as cargas elétricas serem

predominantemente negativas, tornam-se plásticos quando apropriadamente umedecidos e, nesta condição, se submetidos à secagem, adquirem considerável resistência. Apresentam grandes variações volumétricas, tanto por perda de umidade, como por aumento da umidade e quando a suspensão aquosa, exibem o fenômeno da floculação (agregação dos grãos) e dispersão, em grau dependente da concentração e da natureza das substâncias químicas em solução.

Esses minerais são os constituintes principais das frações finas dos solos e, quando em grande quantidade, exercem um fator muito importante no sistema solo-água, pois define o comportamento desse sistema. Pode haver também nessa faixa granulométrica, materiais amorfos, matéria orgânica e óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro POLIVANOV (1984).

#### ii – Óxidos e Hidróxidos de Alumínio e Ferro

Quanto aos hidróxidos e óxidos de ferro e alumínio mais freqüentes na fração argila dos solos tropicais, pode-se citar a goetitha, a gibbisita, a hematita e magnetita. Estes óxidos e hidróxidos apesar de possuírem elevada superfície específica e diminutas dimensões, não são plásticos ou são muito pouco plásticos, não são expansivos e possuem uma capacidade de troca catiônica desprezível. Segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995), “os óxidos de ferro e de alumínio hidratados possuem propriedades cimentantes, desempenhando papel importante na formação de agregados (torrões ou grumos) e concreções lateríticas dos solos lateríticos”.

#### **II. 5. 1. 1 - Mineralogia das Argilas**

Na identificação da mineralogia das argilas, pode ser usada diferentes métodos, tais como: microscopia eletrônica de transmissão, difratometria de Raios-X, análise térmica diferencial e termogravimétrica, entre outros. Faz-se referência nesse trabalho apenas ao método de difração de Raios-X, tendo em vista o interesse deste trabalho.

Os procedimentos e os métodos descritos a seguir podem ser vistos em POLIVANOV (1984).

Os Raios-X são radiações eletromagnéticas da mesma natureza das radiações que compõem a luz branca visível ao olho humano, só que os comprimentos de onda são cerca de 1000 vezes menores que os comprimentos de onda de luz visível. A produção de raios-X esta associada à perda de energia de elétrons.

O método de difração de raios-X oferece vantagens em relação aos outros métodos, sejam eles físicos (Análise Térmica Diferencial) e químicos (Análise Química), pois o difratograma apresenta um numero grande de picos facilitando a identificação dos argilominerais ou óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, principalmente no caso de mistura onde pode haver superposição de picos. A desvantagem desse método é que este falha na identificação de substâncias amorfas. A foto II. 3 mostra o aparelho, difratômetro de raios-X, utilizado para a identificação dos argilominerais.

Para a identificação do argilomineral é necessário o conhecimento de sua distância interplanar basal. A tabela II. 4 abaixo faz referências as distâncias interplanares basais dos argilominerais, segundo BRINDLEY and BROWN (1980).

Tabela II. 4: Argilominerais com suas respectivas distâncias interplanares basais (001).

ARGILOMINERAIS	DISTÂNCIA INTERPLANAR BASAL (Å)
Caulinita	7
Montmorilonita	14
Micas	10
Cloritas	14
Paligorsquita / Sepiolita	10 – 12



Foto II. 3: Aparelho para a identificação dos argilominerais, difratômetro de raios-X.

## II. 5. 2 - Química

Em relação às análises químicas, existem dois processos para a determinação dos elementos químicos: a total e a seletiva. Faz-se referência nesse trabalho apenas o processo de análise química seletiva, tendo em vista o interesse deste. A análise do complexo sortivo é abordado neste item.

### Análises Químicas Seletivas

As principais análises químicas feitas com frequência para caracterizar uma amostra de solo correspondem aos ensaios de determinação de PH, de “óxido de silício” ( $\text{SiO}_2$ ), “óxido de

alumínio” ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), “óxido de ferro” ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e de perda ao fogo, com o objetivo de determinar, entre outros, os índices de intemperismo Ki e Kr.

Os seguintes procedimentos são usados na COPPE – UFRJ, conforme EMBRAPA (1999), na realização destes ensaios:

pH – Mistura-se 10g de solo que passa na peneira nº10 (2mm), seco ao ar com 25ml de  $\text{H}_2\text{O}$  deionizada e mediu-se o pH após uma hora, através do medidor de pH, com eletrodo de vidro combinado. As leituras são também realizadas substituindo a água deionizada por solução KCl (1N).

$\%\text{SiO}_2$ ,  $\%\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\%\text{Al}_2\text{O}_3$  – Pesa-se 1 a 2g de solo que passa na peneira nº10 (2mm) seco a  $105^\circ\text{C}$ , em balança analítica, calcinando-se a  $600^\circ\text{C}$  por 2 horas. Passa-se então para erlenmeyer de 250 ml com auxílio de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  1:1) realizando-se ataque a quente com condensador de refluxo durante uma hora. No filtrado (extrato sulfúrico) são dosados o ferro e o alumínio, e o resíduo foi fervido com NaOH 0,5N por 5 minutos e filtrado. Neste extrato alcalino são determinada a sílica e o resíduo final foi calcinado a  $1.000^\circ\text{C}$  determinando-se a quantidade de material não atacado (resíduo %). Nesse tipo de tratamento somente os argilominerais são atacados.

O óxido de ferro é determinado por complexometria pelo EDTA (ácido complexante de metais), utilizando o ácido salicílico e titulando com  $\text{ZnSO}_4$ . Já o óxido de alumínio é obtido por complexometria pelo EDTA (ácido complexante de metais), após a separação do ferro, e titulando  $\text{ZnSO}_4$  utilizando o xilenol orange com indicador.

A porcentagem de sílica é determinada por método colorimétrico com molibdato de amônia, desenvolvendo o composto amarelo, que absorve em  $\lambda = 410\text{nm}$  ( $10^{-9}\text{m}$ ).

$\Delta\text{P}$  %(perda ao fogo) – é obtida pela diferença de peso do solo ao ser calcinado a  $900^\circ\text{C}$  em relação ao solo seco a  $105^\circ\text{C}$ .

Ki e Kr - As relações Ki e Kr, isto é, as relações  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  são calculadas sob a forma molecular, baseada nas determinações acima descrita.

### Complexo Sortivo

$\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  e  $\text{Al}^{+++}$  permutáveis – Extraídos com solução normal de KCl na proporção 1:10. Numa alíquota determinou-se o  $\text{Al}^{+++}$  pela titulação da acidez, usando-se azul bromotimol como indicador. Nesta mesma alíquota, após a determinação de  $\text{Al}^{+++}$ , determinou-se  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$  pelo EDTA. Em outra alíquota do extrato de KCl, determinou-se  $\text{Ca}^{++}$ .

$\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  permutáveis – Extraídos com HCl 0,05N e determinados por fotometria de chama.

Valor S (soma das bases permutáveis) – Obtida pela soma de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ .

$\text{H}^+$  +  $\text{Al}^{+++}$  permutáveis – Extraídos com acetato de cálcio normal pH=7 e titulada a acidez resultante pelo NaOH 01 N, usando-se fenolftaleína como indicador.

$\text{H}^+$  permutável – Calculado, subtraindo-se do valor  $\text{H}^+$  +  $\text{Al}^{+++}$ , o valor de  $\text{Al}^{+++}$ .

Valor de T (capacidade de permuta de cátions) – Obtido pela soma de S +  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{+++}$ .  
*“Denomina-se troca iônica o processo reversível pelo qual íons retidos na superfície de uma fase sólida são substituídos por outros íons, sem que haja modificação de sua estrutura cristalina” (POLIVANOV, 2004)*

Valor V (saturação de bases) – calculado pela fórmula  $S \times 100/T$ .

Porcentagem de saturação com  $\text{Na}^+$  - calculada pela fórmula:  $100 \times \text{Na}^+/T$ .

## **CAPÍTULO III – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS LOCAIS DE COLETA**

Para a realização do presente estudo que tem como objetivo pesquisar as correlações entre características químicas, mineralógicas, geológicas e geotécnicas, foram utilizados os dados de 33 solos coletados e estudados por MARANGON (2004), em seu trabalho de doutoramento desenvolvido na COOPE - UFRJ, que o autor dessa monografia teve a oportunidade de participar durante um período de aproximadamente 1 ano, em que desenvolveu um estágio extra-curricular, em parceria Departamento de Geologia e COPPE, ambos UFRJ.

### **III. 1 - Programa de Coleta de Solos**

A área de coleta dos solos para a pesquisa compreende o Estado de Minas Gerais que situa-se entre os paralelos 14°14' e 22°55' de latitude sul e os meridianos de 39°51' e 51°03' a oeste de Greenwich. A extensão territorial mineira é a quarta do país (atrás do Amazonas, Pará e Mato Grosso) – cerca de 7% da área nacional, com cerca de 588 384 km<sup>2</sup>, distribuída em oito macroregiões de planejamento, ocupando áreas territoriais com tamanhos e recursos naturais diversificados. Conta com 853 municípios, segundo IBGE (2002).

As oito macroregiões do Estado de Minas Gerais estão ilustrados na Figura III. 1 e correspondem as: Noroeste, Jequitinhonha, Rio Doce, Alto São Francisco, Triângulo/Alto Paranaíba, Zona da Mata, Metalúrgica/Campo das Vertentes e Sul de Minas. Na figura está destacado de cor mais escura as áreas de interesse da pesquisa.

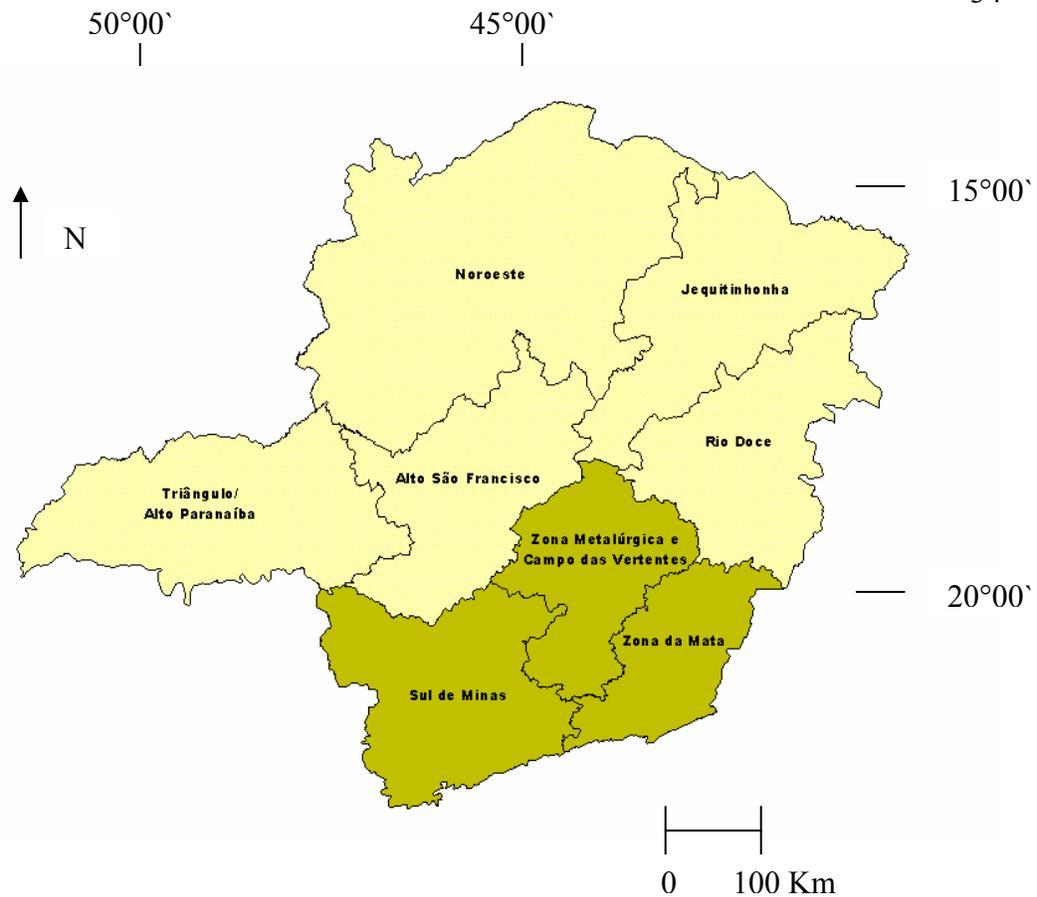


Figura III. 1 – Macroregiões de planejamento do Estado de Minas Gerais com destaque para a área de interesse desta pesquisa – mais escura (IGA/CETEC, 1994).

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi selecionada uma área de cerca de 25% do total do Estado de Minas Gerais (região centro-sul-sudeste) para o desenvolvimento desta pesquisa.

Das oito macrorregiões administrativas de Minas Gerais, foram escolhidas para o programa de pesquisa a Zona da Mata (ZM), Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes (MV) e Sul de Minas (SL). A Figura III. 2 localiza as três macroregiões referidas, dentro do Estado de Minas Gerais.

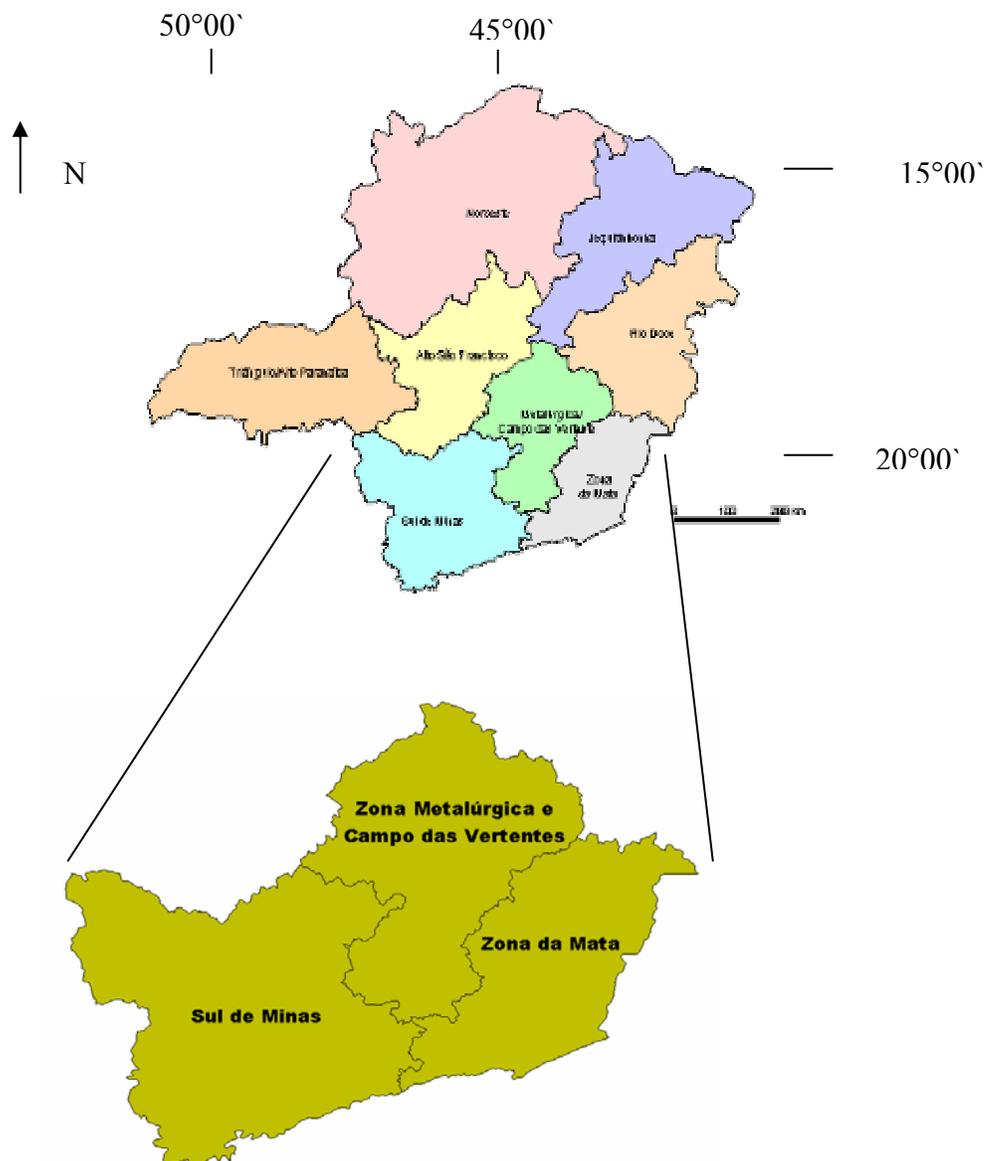


Figura III. 2 – Macroregiões de planejamento do Estado de Minas Gerais com destaque para a área de estudo desta pesquisa (IGA/CETEC, 1994).

Para a coleta de amostras, foram analisados previamente alguns mapas, como o mapa pedológico da DNPM (1983) e dados de um levantamento pedológico EMBRAPA (1980b). Mapas rodoviários foram consultados, pois o objetivo ou a prioridade do local de coleta das amostras de solos eram as rodovias ainda não pavimentadas. Foram analisadas essas situações e de acordo com a classe pedológica de interesse desta pesquisa e o tipo de pavimentação, o local seria visitado para a confirmação destes dois fatores.

Algumas rodovias que constavam como não pavimentada na referência do DER (2001) não confirmaram tal condição quando da visita de coleta. Dos 33 pontos de coleta para o estudo desta pesquisa, 20 rodovias se encontravam pavimentadas, porém com um número significativo em condições insatisfatórias do pavimento. Das outras 13 rodovias, 8 não apresentavam pavimentação (condição de subleito natural), 2 foram encontradas em obras de pavimentação, 1 com obras de duplicação e outras 2 com pavimentação recentemente executada.

Para fins de esclarecimento, o autor deste trabalho não participou diretamente das coletas das amostras no campo, no entanto, os estudos prévios de mapas geológicos e pedológicos contaram com a participação do autor deste trabalho.

Na região da Zona da Mata, amostras identificadas com a denominação “ZM”, foram coletadas 16 amostras como pode se observar à localização na Figura III. 3.

Na região da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes, amostras identificadas com “MV”, foram coletadas 9 amostras, podendo observar a localização na Figura III. 4 e no Sul de Minas, amostras identificadas como “SL”, 8 amostras, Figura III. 5.

As amostras foram inicialmente numeradas e agrupadas segundo as regiões de localização, por uma questão meramente relacionada à organização dos dados, permitindo melhor identificação da amostra em relação a sua localização.

Com as coordenadas UTM obtidas no campo, por MARANGON (2004), foi possível fazer uma série de sobreposições dos pontos de localização das coletas com outros dados, referentes a vários tipos de mapas temáticos (geológico, pedológico, geoambiental, etc). O programa de geoprocessamento utilizado foi o “ArcView”, que possibilita a sobreposição de vários “layers”, podendo correlacionar várias características físicas do meio com os pontos de coleta das amostras.

As amostras somaram cerca de 1500kg de solo que foram posteriormente encaminhadas, por caminhão, para o laboratório de geotecnia “Prof. Jacques de Medina”, da UFRJ, onde se iniciaram os ensaios.



Figura III. 3 – Localização dos pontos de coleta de amostras desta pesquisa em relação às rodovias e municípios próximos, para a região da Zona da Mata.

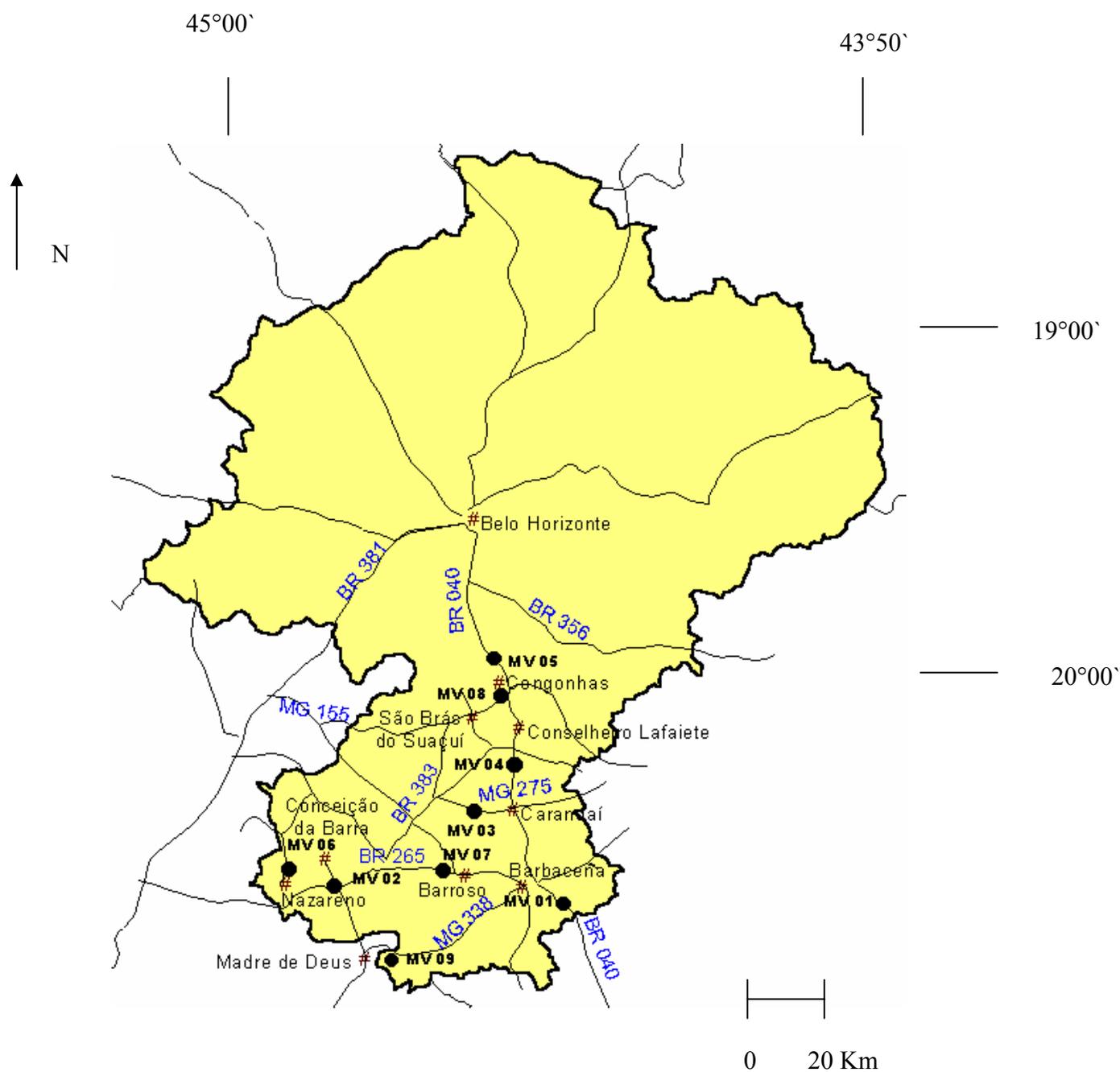


Figura III. 4 – Localização dos pontos de coleta de amostras desta pesquisa em relação às rodovias e municípios próximos, para a região da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes.



Figura III. 5– Localização dos pontos de coleta de amostras desta pesquisa em relação às rodovias e municípios próximos, para a região do Sul de Minas.

### **III. 2 - Características Físicas dos Pontos de Coleta**

Realizadas as coletas e estabelecidos os posicionamentos geográficos destes pontos, foi possível com o uso dos recursos do geoprocessamento, realizar algumas análises que melhor caracterizam as condições geoambientais em que se encontram cada amostra desta pesquisa. Foram pesquisados o clima, vegetação, geologia, pedologia e geomorfologia.

#### **III. 2. 1 – clima**

A área em estudo se caracteriza por um clima temperado úmido, com precipitação média anual igual entre 1200 a 1500 mm, podendo chegar em certos períodos do ano ultrapassar 1500 mm. As chuvas são do tipo periódico com verões úmidos e invernos secos, podendo apresentar deficiência ou excedente hídrico. Outra característica é a presença de geadas, em altitudes acima de 850 metros, sendo que nas cotas mais elevadas da Mantiqueira pode-se atingir mais de 23 dias de geada por ano (AMARAL, 1993).

Diferentemente da região norte que é marcado por um calor intenso, na região de estudo, predominam temperaturas baixas, podendo atingir até 9 graus.

A Figura III. 6 mostra a localização dos pontos de coleta com suas respectivas temperaturas, podendo notar que as amostras “MV” estão em uma faixa de temperatura menor que 19 graus, as amostras “SL” estão localizadas entre 19 e 21 graus (exceto a SL 02) e as amostras “ZM” estão melhores distribuídas, entre 19 e 24 graus.

Em relação às variações de precipitação total anual para os pontos de coleta, nota-se que na Figura III. 7, as amostras “MV”, “SL” e “ZM” estão entre 1200 e 1500 mm

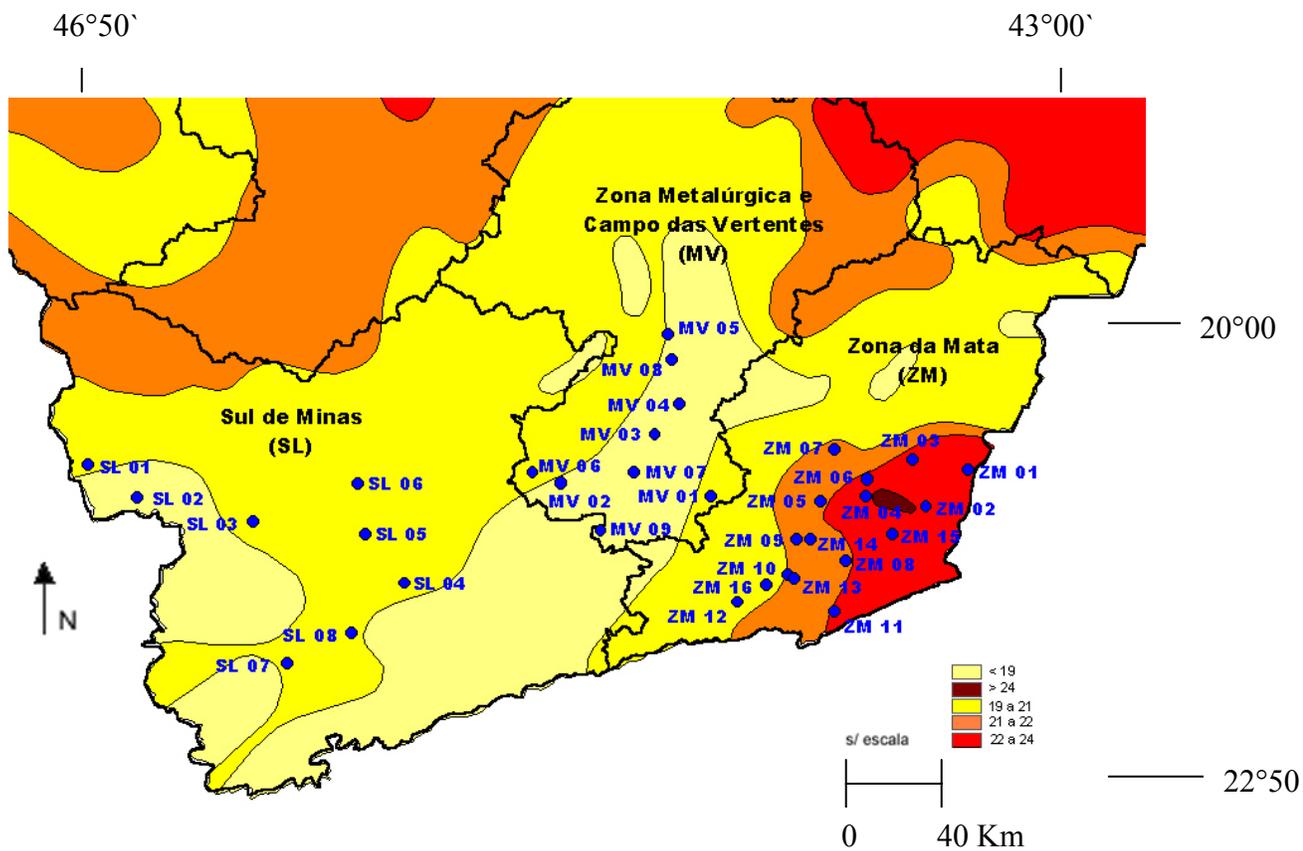


Figura III. 6 – Variações de temperatura média (em  $^{\circ}\text{C}$ ), anual para os pontos de coleta.

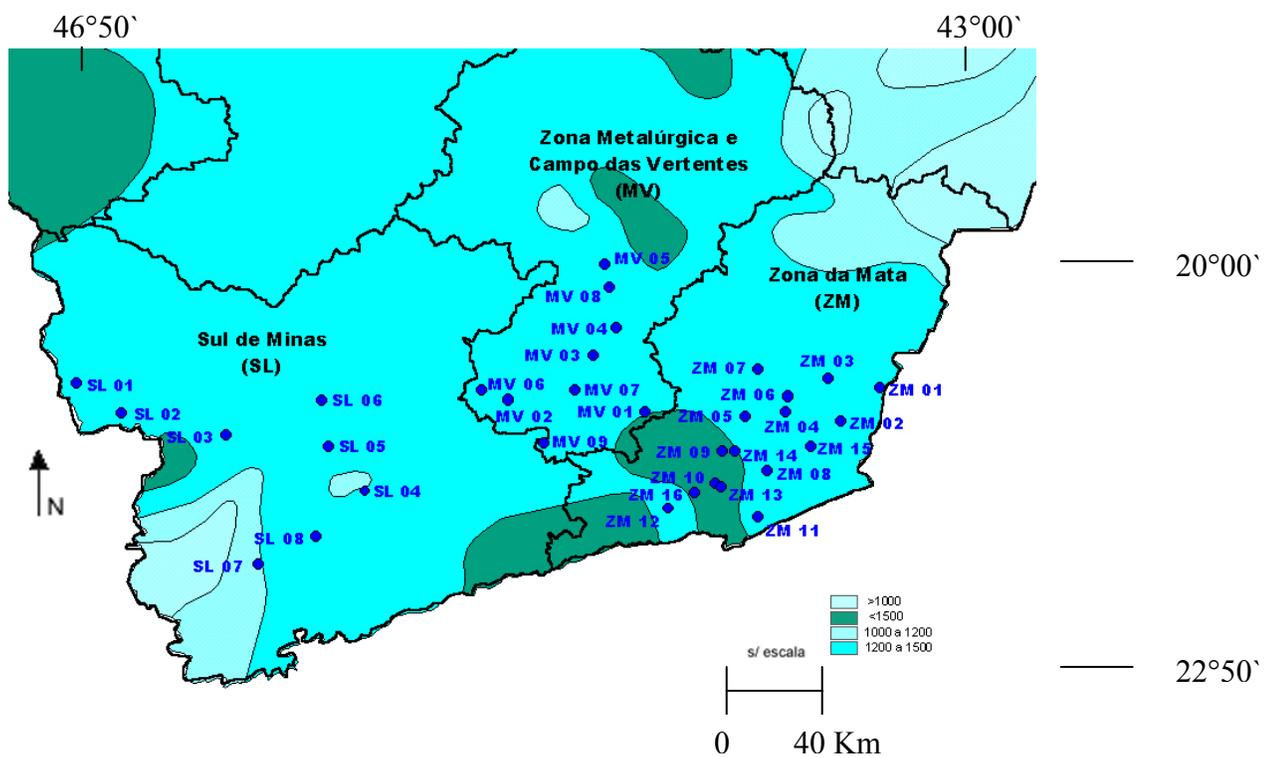


Figura III. 7 – Variações da precipitação total anual (em mm), para os pontos de coleta.

### III. 2. 2 – vegetação

A cobertura vegetal modificou-se bastante a menos de um século. No século XVII iniciou-se um processo de exploração das matas visando a extração do pau Brasil tendo continuado no século XVIII com o desflorestamento objetivando a demanda por madeira para atender os diversos setores da atividade econômica. Posteriormente este processo visou a preparação de terras para a exploração de culturas agrícolas como o café.

Na insuficiência de dados do regime hídrico dos solos, que abranjam todas as unidades de mapeamento em grau de detalhamento compatível, as fases de vegetação podem ser analisadas para permitir fazer inferências sobre relevantes variações de condições de umidade dos solos, uma vez que a vegetação primária reflete diferenças climáticas imperantes nas diversas condições das terras. Assim pode-se buscar correlações tentativas entre as fases de vegetação utilizadas comumente nos levantamentos de solos (que buscam inferir o regime hídrico do solo através do percentual de caducidade da vegetação primária) com as descrições de vegetação empregadas em levantamentos de recursos naturais como a do projeto RadamBrasil, por exemplo, que buscam retratar a fitofisionomia e a condição florística brasileira (AMARAL, 1993).

A Figura III. 8 apresenta, em resumo, as principais ocorrências de vegetação natural do identificadas por ocasião de um trabalho de zoneamento agroclimático realizado para o Estado, na década de 70 (SEA, 1980).

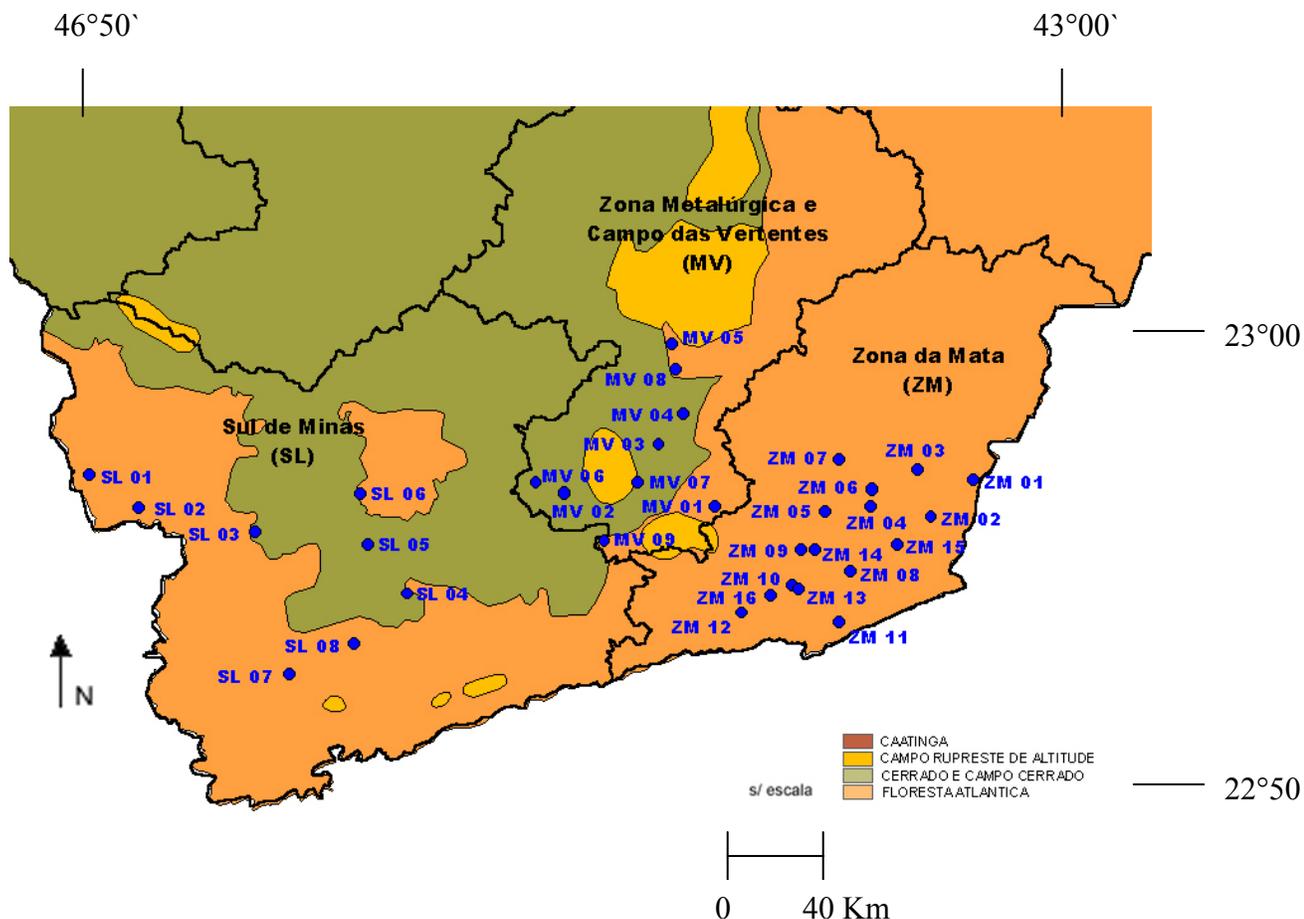


Figura III. 8 – Vegetação Natural para o Estado de Minas Gerais. (SEA, 1980).

### III. 2. 3 – geologia

Considerando a descrição apresentada pelo projeto RADAMBRASIL elaborado pela DNPM (1983), no que diz respeito ao levantamento geológico, pode-se descrever que geologicamente a área de estudo faz parte do Cráton Paramirim onde foram datadas rochas gnáissicas, migmatíticas e granulíticas que forneceram idades de 3.000 M.A., revelando uma idade Arqueana precose da região. A esse período pode-se relacionar episódios de abertura de riftes (vale ou depressão alongada) numa crosta pouco espessa, por onde intrudiram lavas básicas e ultrabásicas e se depositaram sedimentos associados. Houve uma intensa atividade tectônica de idade 2.100 M.A. a 1.700 M.A., afetando a região, onde se deu ampla granitização e migmitização das rochas pré-existentes. Supõe-se que no

arqueano (3.000 M.A.) deveria existir uma crosta sílica, pouco espessa, por onde intrudiram lavas ultrabásicas e básicas e depositaram-se sedimentos. Empurrões de oeste para leste são as representações finais da tectônica Transamazônica (1.700 M. A). No proterozóico médio (1.600 M.A.), houve um novo período de instabilidade crustal, cujo mecanismo proposto foi uma colisão continental, devido ao fechamento do mar pré-cambriano, ocorrido no proterozóico superior. O arranjo das litologias no terreno, a intensa granitogênese e a desarmonia estrutural permitem supor que a placa colidante foi a posicionada a leste. Rochas carbonáticas correspondem à linha de sutura desse mar Pré-Cambriano. No final do Pré-Cambriano (540MA) o cinturão Pan-Africano se estenderia para sul e se confundiria com o cinturão Móvel Atlântico e o Cinturão Rokelides se prolongaria do mesmo modo, correspondendo a borda tectonizada da Bacia Bambuí. Já no Cambriano-Ordoviciano teria lugar, na parte oriental do continente sul-americano atual, a formação de depósitos molássicos, além de vulcanitos associados a sedimentos em pequenos riftes intracontinentais. O Siluriano Inferior definido como o estágio de estabilização da Plataforma Brasileira, é caracterizada por uma grande calma nesta plataforma, surgindo às bacias (sinéclises) paleomesozóicas, dentre elas a bacia do Paraná que é uma bacia intracacratônica simétrica, definindo sua existência como unidade autônoma de sedimentação a partir do Devoniano, que sofreu processo erosional até o carbonífero superior. Durante o Permiano Inferior acentuaram-se as depressões deposicionais. O final Permiano Superior e Triássico Inferior ou Médio foi um período em que encerraram-se os fenômenos sedimentares e instalaram-se processos erosivos. O intervalo Triássico Inferior até o início do Jurássico Superior caracterizou-se pelo regime geocrático da plataforma brasileira. O final do Jurássico foi marcado pela reativação de antigas plataformas e origem de novos processos magmáticos que produziram os grandes derrames basálticos. Com a tectogenia atlântica houve o início do Cretáceo.

Acima foi descrita, de forma resumida, a geologia da área de estudo, sendo apresentada no Capítulo 4 a geologia local de cada ponto de coleta de amostra de solo.

### III. 2. 4 – pedologia

O mais recente e importante trabalho conhecido e desenvolvido na década de 90 é resultado de pesquisa da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, publicado em dissertação de Mestrado de AMARAL (1993). Este trabalho compila vários mapas, com atualização de legendas de todo o Estado na escala 1: 1.000.000. Utilizou-se como material básico os levantamentos de recursos naturais do projeto RADAMBRASIL complementados com os trabalhos do CNPS, e teve como objetivo principal conhecer a aptidão agrícola das terras do Estado de Minas Gerais.

O trabalho de AMARAL (1993) visou avaliar as condições agrícolas das terras, levando-se em consideração as características do meio ambiente, propriedades físicas e químicas das diferentes classes de solo e a viabilidade de melhoramento dos cinco fatores limitantes básicos das terras, de interesse direto da área de agricultura: fertilidade natural, excesso de água, deficiência de água, susceptibilidade à erosão e impedimentos ao uso de implementos agrícolas.

Pode-se considerar que para a Zona da Mata a predominância dos latossolos e podzólicos vermelho-amarelos que ocupam maior parte da área, e extensões menos significativas de cambissolos próximos a serra do Caparoá e estes solos estão principalmente sobre granulitos, charnockitos, e migmatitos. Para a Zona Metalúrgica e Campos das Vertentes verifica-se a ocorrência de latossolos vermelho-amarelos, de podzólicos vermelho-amarelos e a predominância de solos poucos desenvolvidos (cambissolos), solos estes também característicos da região do Alto São Francisco que apresenta como segunda ocorrência considerável os latossolos vermelho-escuros, que se pode considerar o solo predominante de ocorrência no Sul de Minas. As formações de latossolos vermelho-escuros são predominantes nesta região de divisa com o Estado de São Paulo, estendendo-se até o Triângulo Mineiro.

O mapa de solos obtido por AMARAL (1993) encontra-se digitalizado indicando a nível exploratório a distribuição das manchas de todos os tipos de solos e afloramentos de rochas distribuídos pelo Estado de Minas Gerais, e esse mapa está representado na figura III. 9 abaixo.

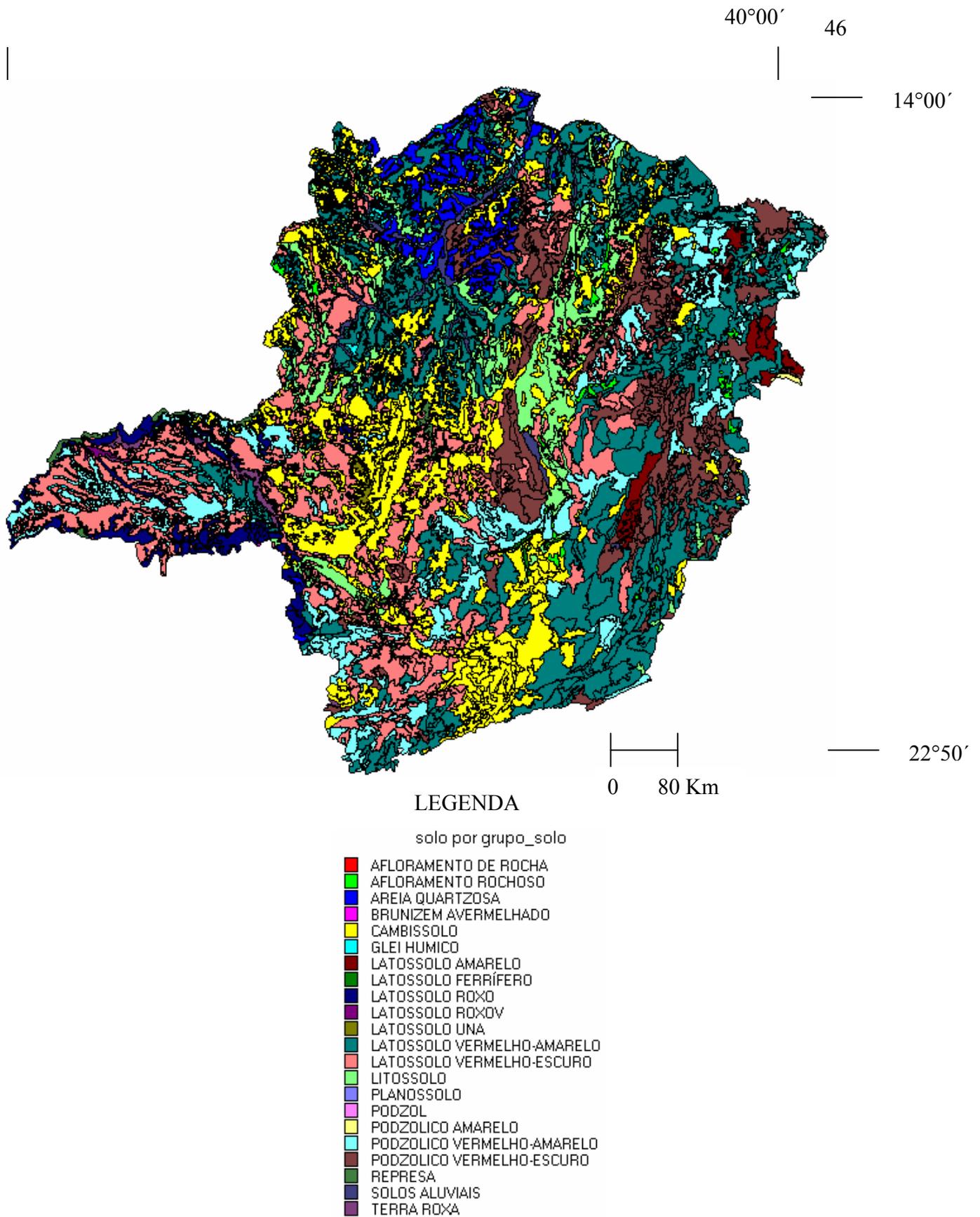


Figura III. 9: Mapas de solos do estado de Minas Gerais obtido por AMARAL (1993).

As classes pedológicas para as amostras estudadas neste trabalho foram obtidas levando em consideração todos os elementos levantados no campo, por MARANGON (2004) e particularmente os seus teores de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a sua cor, o coeficiente de alteração geoquímica do solo “Ki”, apresentado no item seguinte, e o valor obtido para a saturação de bases, conforme apresentado por OLIVEIRA et al (1992). As tabelas III. 1 e III. 2 apresentam a classificação pedológica obtidas para as amostras, segundo a nomenclatura consagrada e a nova nomenclatura apresentada pelo sistema de classificação de solos da EMBRAPA (1999).

Tabela III. 1 - Classificação pedológica para as amostras ZM, segundo a nomenclatura consagrada e do sistema de classificação de solos da EMBRAPA (1999).

<i>Amostra</i>	<i>Classificação Pedológica</i>	
	<i>nomenclatura consagrada</i>	<i>EMBRAPA (1999)</i>
ZM01	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM02	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Vermelho- Amarelo Distrófico
ZM03	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM04	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Amarelo Distrófico
ZM05	Latossolo Vermelho-Escuro	Latossolo Vermelho Distrófico
ZM06	Latossolo Vermelho-Escuro	Latossolo Vermelho Distrófico
ZM07	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Vermelho Distrófico
ZM08	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM09	Latossolo Bruno	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM10	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM11	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM12	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM13	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM14	Latossolo Bruno	Latossolo Amarelo Distrófico
ZM15	Latossolo Vermelho-Escuro	Latossolo Vermelho Distrófico
ZM16	Latossolo Bruno	Latossolo Amarelo Distrófico

Tabela III. 2 – Classificação pedológica para as amostras MV e SL, segundo a nomenclatura consagrada e do sistema de classificação de solos da EMBRAPA (1999).

<i>Amostra</i>	<i>Classificação Pedológica</i>	
	<i>nomenclatura consagrada</i>	<i>EMBRAPA (1999)</i>
MV01	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Amarelo Distrófico
MV02	Latossolo Bruno	Latossolo Vermelho Distrófico
MV03	Latossolo Roxo	Latossolo Vermelho Distrófico
MV04	Latossolo Roxo	Latossolo Vermelho Distroférricos
MV05	Latossolo Ferrífero	Latossolo Vermelho Perférricos
MV06	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Vermelho- Amarelo Distrófico
MV07	Latossolo Vermelho-Escuro	Latossolo Vermelho Eutrófico
MV08	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Eutróficos

MV09	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho Distrófico
SL01	Latossolo Vermelho-Escuro	Latossolo Vermelho Distrófico
SL02	Latossolo Bruno	Latossolo Vermelho Distrófico
SL03	Latossolo Roxo	Latossolo Vermelho Distrófico
SL04	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Distrófico
SL05	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Vermelho Distrófico
SL06	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Distrófico
SL07	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Vermelho Distrófico
SL08	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Vermelho Distrófico

A figura III. 10 apresenta um resumo do número de amostras por variação pedológica identificada na classificação (MARANGON, 2004).

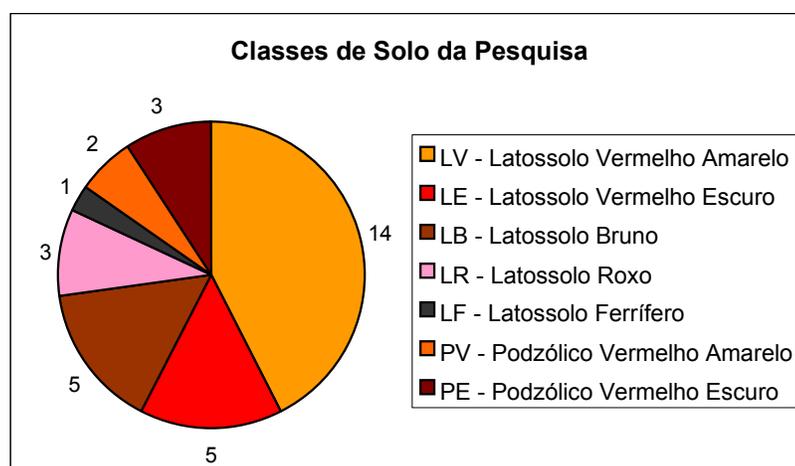


Figura III. 10 – Número de amostras deste estudo por variação pedológica, segundo a classificação obtida (nomenclatura consagrada) (MARANGON, 2004).

### III. 2. 5 – geomorfologia

A região da Zona da Mata está inserida na Unidade Serranias da Zona da Mata Mineira, que apresenta uma superfície de 10.173 Km<sup>2</sup> e limita-se a leste com os Maciços do Caparão e os Patamares Escalonados do Sul Capixaba, ao sul com a Depressão Escalonada dos Rios Pomba – Muriaé e a oeste com o Planalto de Campos das Vertentes e Depressão Interplanáltica do Médio Rio Doce. Sua denominação se deve ao fato de se encontrar totalmente inserida na zona fisiográfica conhecida como Zona da Mata. O aproveitamento desta terminologia procura facilitar a localização e utilizar uma denominação muito difundida. As Serranias da Zona da Mata foram identificadas como relevos de formas

alongadas, tipo cristas e linhas de cumeeada, que ocorrem principalmente na parte leste do Estado de Minas Gerais. Os relevos topograficamente elevados e com aspecto serrano estão localizados preferencialmente a oeste e a sul da unidade. Os tipos modelados mais comuns referem-se à dissecação diferencial, com predominância de índices de aprofundamento situados entre 268 e 344m, principalmente nos setores centrais da unidade. As áreas com relevos de dissecação homogênea ocorrem de maneira mais restrita (RAMBRASIL, 1983).

A região da Zona Metalúrgica e Campos das Vertentes está inserida na Unidade Planalto de Campo das Vertentes, contanto com uma área de 39.564 Km<sup>2</sup> totalmente localizada no Estado de Minas Gerais. Configura um elevado compartimento planáltico intensamente dissecado em formas mamelonares e cristais, resultando uma paisagem característica do tipo “mares de morros”. As altimetrias vão de 400 a 1.300 m e a unidade destaca-se como importante divisor de quatro grandes bacias hidrográficas – Rio Doce, São Francisco, Paraná e Paraíba do Sul. A diversidade de feições do relevo permite a subdivisão da área em dois compartimentos morfológicos distintos. O primeiro, corresponde a um compartimento que apresenta a predominância de modelados de dissecação homogênea, ocorrendo próximo às Unidades Geomorfológicas Patamares e Planaltos da Canastra e Depressão do Alto São Francisco. O segundo compartimento refere-se a parte oriental da unidade em questão, onde há setores alinhados de modelados de dissecação diferencial com aprofundamentos médios de 75 a 274 m (RAMBRASIL, 1983).

A região de Sul de Minas está inserida em duas unidades geomorfológicas: Região da Mantiqueira Meridional e Região dos Planaltos do Alto Rio Doce. A primeira região corresponde a uma área de 13.176 Km<sup>2</sup>, cujas altitudes variam de pouco mais de 900 m, na área ao norte do rio Preto, até 2.787 m no pico das Agulhas Negras. O relevo se apresenta influenciado por intenso tectonismo, com soerguimentos de blocos e falhamentos, dispostos no sentido NE – SO. A região ocupa a posição de grande divisor de água das bacias dos rios Grande, Paraíba do Sul, Piracicaba e Tiête. A Região dos Planaltos do Alto Rio Doce corresponde a uma área de 17.609 Km<sup>2</sup> cujas altitudes médias estão em torno de 1.150 m. Esta região pode-se dividir em duas unidades geomorfológicas: Depressão do Sapucaí e Planalto de Andrelândia (RAMBRASIL, 1983).

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### IV. 1 – Geologia

Com os mapas temáticos gerados a partir do programa de geoprocessamento, “ArcView”, foram feitas sobreposições dos pontos de coleta com o mapa geológico apresentado pela COMIG (2002), conforme visto na figura IV. 1.

O mapa digital dispõe de um banco de dados correlacionando às unidades geológicas e as litologias predominantes sendo estes dados apresentados, resumidamente, na tabela IV. 1 para as amostras da Zona da Mata (amostras ZM) e na tabela IV. 2 para as amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes (amostras MV) e Sul de Minas (amostras SL).

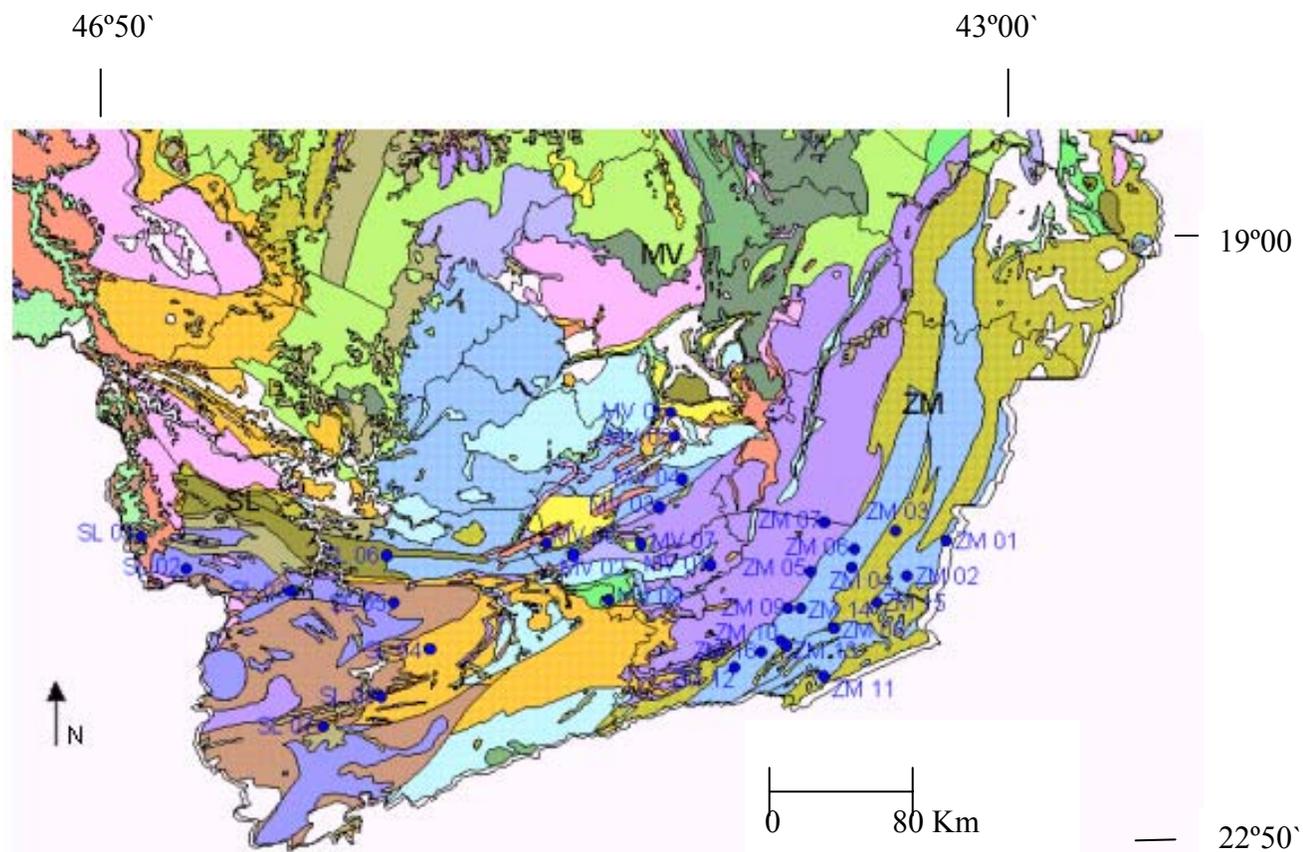


Figura IV. 1: Mapa geológico da região de coleta das amostras de solos com as respectivas localizações dos pontos.

Tabela IV. 1 - Unidades geológicas e litologias predominantes relacionadas aos pontos de coleta da Zona da Mata (baseado na COMIG, 2002).

<i>Amostra</i>	<i>Unidade Geológica</i>	<i>Litologia Predominante</i>
ZM01	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM02	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM03	Complexo Juiz de Fora	Gnaisses granulítico
ZM04	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM05	Complexo Mantiqueira	Granitóides
ZM06	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM07	Complexo Mantiqueira	Granitóides
ZM08	Complexo Paraíba do Sul	Gnaisses
ZM09	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM10	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM11	Complexo Paraíba do Sul	Gnaisses
ZM12	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM13	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM14	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM15	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito
ZM16	Complexo Juiz de Fora	Gnaisse Charnockito

Tabela IV. 2 - Unidades geológicas e litologias predominantes relacionadas aos pontos de coleta da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes (baseado na COMIG, 2002).

<i>Amostra</i>	<i>Unidade Geológica</i>	<i>Litologia Predominante</i>
MV01	Complexo Mantiqueira	Granitóides
MV02	Grupo São João Del Rei	Metassedimentares
MV03	Grupo São João Del Rei	Metassedimentares
MV04	Complexo Barbacena	Granitos e quartzo-dioritos
MV05	Grupo Itabira	Itabirito
MV06	-	Batólito granítico e pegmatitos
MV07	Grupo São João Del Rei	Metacalcários
MV08	Grupo Nova Lima	Seqüência vulcano-sedimentar
MV09	Complexo Barbacena	Gabro
SL01	Formação Aquidauana	Arenitos e conglomerados
SL02	Complexo Varginha	Granulitos e gnaisses charnockíticos
SL03	Complexo Varginha	Granulitos e gnaisses charnockíticos
SL04	Grupo Andrelândia	Seqüências metassedimentares e mica-xistos
SL05	Complexo Varginha	Granulitos e gnaisses graníticos á tonalíticos
SL06	Complexo Campos Gerais	Gnaisses e tonalito-trondjeemito
SL07	Complexo Amparo	Gnaisses porfiróides
SL08	Grupo Andrelândia	Seqüências metassedimentares e mica-xistos

Com base no trabalho do DNPM (1983), apresenta-se a seguir resumidamente, algumas informações de algumas unidades geológicas que foram identificadas e relacionadas.

#### Amostras da Zona da Mata (ZM):

##### Complexo Juiz de Fora:

O Complexo estende-se na direção nordeste-sudoeste (N20<sup>0</sup>E) desde Volta Redonda até Vale do Rio Doce, numa extensão de 360 Km. Caracteriza a “Série Juiz de Fora” pelas rochas de “suíte charnockítica” de idade 2.800 MA, a qual foi interpretada como sendo metassedimentos, que foram granitizadas e tectonizadas no Ciclo Transamazônico, em ambientes de alta temperatura. As rochas desse Complexo caracterizam-se por se encontrar em fácies granulito, estruturalmente se apresentando como migmatitos, gnaisses e cataclasitos. Nesta unidade foram coletadas as amostras ZM 01, 02, 03, 04, 06, 09, 10, 12, 13, 14, 15 e 16.

##### Complexo Paraíba do Sul

O Complexo Paraíba do Sul compõe o embasamento do Cinturão Móvel Atlântico, expondo-se nos limites dos Estados de Minas Gerais e Bahia, até o litoral sul paulista, estendendo-se pelos estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro. Esta associado a litologias da “Faixa Paraíba” como sendo formado por gnaisses diversos, migmatitos e charnockitos de idade Paleo-Meso Arqueano. Todo esse conjunto de rochas sofreu metamorfismo na fácies anfíbolítica e granulítica. O Complexo Paraíba do Sul é uma entidade submetida a eventos tectonotermais ao longo de todo Pré-Cambriano. Nesta unidade foram coletadas as amostras ZM 08 e ZM 11.

A figura IV. 2 abaixo representa a quantidade de amostras ZM distribuídas por unidades geológicas.

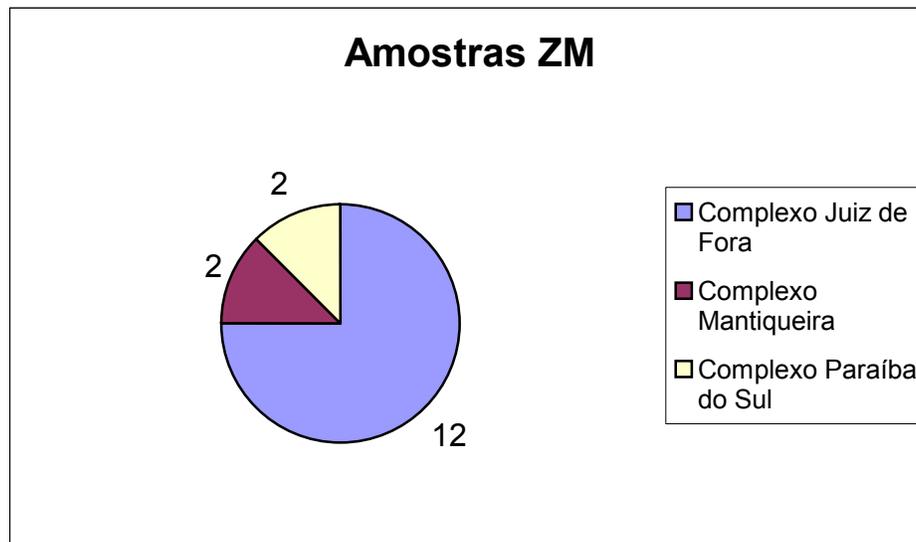


Figura IV. 2: Quantidade de amostras ZM distribuídas por unidades geológicas.

Amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes (ZM) e Sul de Minas (SL):

Complexo Barbacena

O Complexo Barbacena distribui-se em duas extensas áreas da região cratônica da Folha SF 23 RJ, uma a oeste numa área de 4.800 Km<sup>2</sup> e outra a leste 7.000 Km<sup>2</sup>. A “Série Barbacena” está associada a um conjunto de rochas xistosas, básicas e meta-básicas, extremamente granitizadas que teriam sido formadas em ambiente geosinclinal. A idade fundamental é arqueana, com retrabalhamento no Ciclo Transamazônico com indicação de idade radiométrica variável até o Proterozóico Médio. O Complexo Barbacena representa o embasamento do Cráton Paramirim. Nesta unidade foram coletadas as amostras MV 04 e 09.

Grupo São João Del Rei

O Grupo São João Del Rei situa-se na região centro sul de Minas Gerais, alguns quilômetros a oeste de Barbacena. Esse Grupo foi subdividido em cinco formações: Caranaíba, Barroso, Prados, Tiradentes e Carandaí, sendo as quatro primeiras resultantes de diferenças provenientes de mudanças de fácies sedimentares devido a variações do ambiente de sedimentação, e a última, resultante de variação de maior grau metamórfico. A

idade fundamental desse grupo é Proterozoico Inferior. As rochas presentes são metassedimentos de baixo grau metamórfico como metacalcários, filitos e xistos, por exemplo. Nesta unidade foram coletadas as amostras MV 02, 03 e 07.

#### Grupo Itabira

O grupo Itabira foi dividido em duas formações intergradativas. A basal, denominada Itabirito Cauê, constituinte da fácies ferruginosa metamorfizada e a Formação Gandarela composta principalmente por rochas carbonáticas de vários tipos. O Grupo Itabira economicamente é de grande valia, pois contém grandes reservas de minério de ferro, constando ainda a presença de manganês e de veios contendo ouro que cortam o Itabirito Cauê. Nesta unidade foi coletada a amostra MV 05.

#### Grupo Nova Lima

O grupo Nova Lima obedece a uma configuração espacial típica de seqüências vulcanossedimentares, expressando-se no terreno, na forma de extensos e contínuos segmentos lineares incorporados à área cratônica. Rochas como xistos e filitos (de origem vulcanoclástica), quartzito, formação ferrífera, intercalações ultramáficas (komatiitos, serpentinitos e metaperidotitos) são características desse Grupo. Nesta unidade foi coletada a amostra MV 08.

#### Complexo Varginha

Localizada nas cidades de Varginha, Alfenas, Serrania, Machado e Guaxupé, no sudoeste mineiro e São José do Rio Pardo e São João da Boa Vista, no nordeste paulista. As rochas que caracterizam o Complexo Varginha têm idade Transamazônica rejuvenescidas no Brasiliano e, exibem estruturas gnáissicas homogêneas ou bandadas e gradativamente passam a domínios migmatíticos. Extensos afloramentos de granulitos são visíveis em áreas desse Complexo. Nesta unidade foram coletadas as amostras SL 02, 03 e 05.

#### Complexo Campos Gerais

Este Complexo está localizado ao longo de uma faixa com aproximadamente 260 Km de comprimento e largura média de 20 Km e tem seu limite oriental próximo a cidade de

Itumirim e prolonga-se para oeste até as cercanias de Cássia. De uma maneira geral, compõe-se este Complexo de idade em torno de 1.650 MA, milonitos, gnaisses quartzofeldspáticos, granitóides, tonalitos e migmatitos que posteriormente sofreram uma deformação causada por movimentação tectônica, com as mais variadas intensidades que ocorreu no Ciclo Transamazônico. Nesta unidade foi coletada a amostra SL 06.

#### Complexo Amparo

O Complexo Amparo constitui um conjunto litológico distribuído em uma ampla área, cuja forma grosseira triangular e em seus “vértices” encontram-se as cidades de Itu, Minduri e Guaxupé. Tem idade Arqueana e está representado basicamente por biotita-gnaisses e hornblenda-biotita gnaisses que posteriormente sofreram metamorfismo de média a alta pressão na fácies anfíbolito. Nesta unidade foi coletada a amostra SL 07.

#### Grupo Andrelândia

Localizada principalmente nas Folhas Barbacena, onde foi definida, Varginha e Franca. O Grupo Andrelândia de idade Proterozóico Inferior, é subdividido em três unidades de acordo com o crescente grau de metamorfismo, que aumenta de norte para sul e de noroeste para sudeste. Sequências metassedimentares e mica-xistos estão reunidas nesse Grupo. Nesta unidade foi coletada a amostra SL 04.

A figura IV. 3 representa a quantidade de amostras MV e SL distribuídas por unidades geológicas.

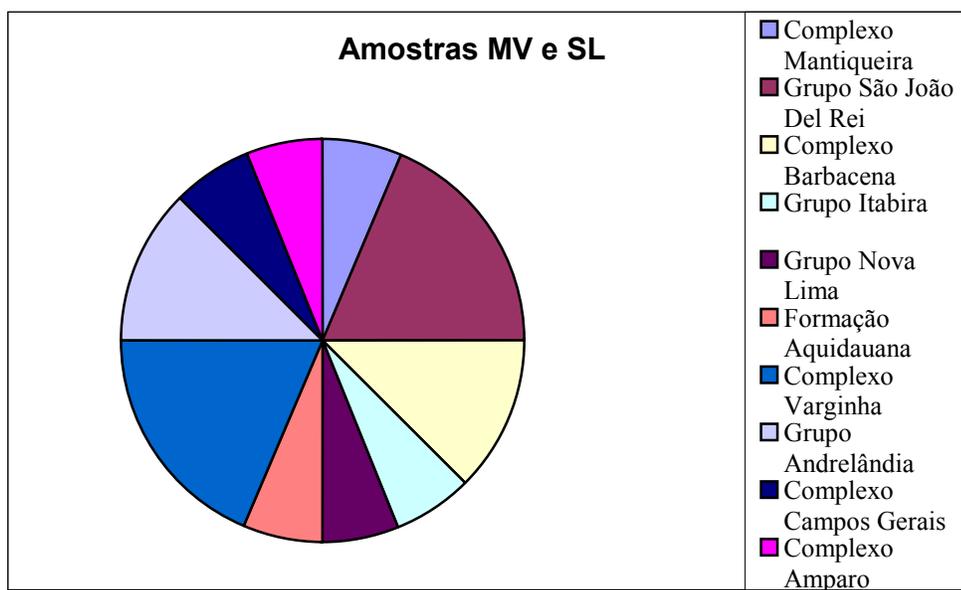


Figura IV. 3: quantidade de amostras MV e SL distribuídas por unidades geológicas.

Observa-se que quase 75% das amostras correspondentes à região Zona da Mata, apresenta gnaiss charnockito do Complexo Juiz de Fora, e os restantes seriam granitóides e gnaisses diversos. Diferentemente das amostras referentes a região da Zona da Mata que praticamente só possui rochas metamórficas, as amostras “MV” e “SL” apresentaram grandes diferenças de litologias, contendo os três tipos de rochas, metamórficas, ígneas e sedimentares.

## IV. 2 – Química

São apresentados na tabela IV. 3 os resultados das análises químicas que foram feitas no setor de Química dos solos do laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Foram realizadas análises químicas para todas as 33 amostras de solos, assim como o valor de teor de umidade (umidade higroscópica).

Tabela IV. 3 – Resultados das análises químicas e teores de umidades das amostras deste estudo.

Amostra	$\Delta P\%$	Ataque Sulfúrico				pH		$W_{\text{hig}}$ (%)
		SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Res. %	H <sub>2</sub> O	KCl	
ZM01	11,37	22,8	25,00	10,30	29,09	4,67	4,51	5,51
ZM02	11,40	20,6	24,10	10,10	30,28	5,08	5,26	9,33
ZM03	11,93	16,9	26,00	8,70	34,87	5,07	5,85	9,97
ZM04	10,58	22,2	26,20	12,90	29,77	4,75	4,16	6,72
ZM05	10,02	21,2	23,00	13,60	27,80	5,11	4,9	6,92
ZM06	10,45	24,8	22,70	11,50	26,87	4,31	4,53	5,46
ZM07	11,77	20,8	26,20	11,30	26,40	5,33	5,4	5,11
ZM08	11,45	19,1	25,40	9,70	32,34	4,39	3,98	4,97
ZM09	12,13	20,1	25,80	13,20	25,44	4,53	4,06	3,52
ZM10	10,86	19,1	23,30	9,60	34,16	4,31	4,07	9,92
ZM11	10,62	20,3	23,30	9,80	32,05	4,46	4,71	5,49
ZM12	12,66	12,4	23,40	10,70	37,43	4,85	5,51	4,02
ZM13	12,78	17,6	23,00	16,00	25,15	4,05	4,47	11,86
ZM14	14,58	18,8	30,80	15,50	15,94	5,00	5,49	4,60
ZM15	10,28	21,3	21,20	10,30	33,08	5,20	4,98	4,94
ZM16	16,17	15,0	30,10	14,40	19,41	4,42	5,45	4,93
MV01	13,31	11,20	23,70	8,60	40,67	5,78	6,09	8,01
MV02	14,92	19,50	29,80	15,00	17,54	5,67	6,33	6,53
MV03	19,35	15,90	36,50	17,60	6,99	5,37	6,08	7,18
MV04	18,89	9,43	30,60	25,30	11,12	5,22	6,63	8,24
MV05	13,91	0,93	9,30	40,60	29,30	4,70	5,59	9,00
MV06	12,99	17,20	24,70	8,60	33,62	4,57	5,58	11,00
MV07	19,44	5,23	32,80	12,30	27,02	6,35	6,85	6,57
MV08	14,15	22,00	25,40	20,50	14,38	5,86	6,15	4,75
MV09	21,72	8,41	33,50	18,40	11,17	5,67	6,68	3,11
SL01	5,23	8,20	10,50	8,00	65,29	5,09	4,8	1,55
SL02	13,47	21,80	26,80	13,00	22,53	5,38	5,53	4,02
SL03	14,73	17,50	28,20	12,00	23,58	4,88	4,39	6,63
SL04	14,19	15,10	30,50	12,60	22,00	5,63	5,6	6,25
SL05	9,67	18,40	22,30	6,30	40,60	5,32	5,33	5,82
SL06	10,67	13,80	20,80	8,80	42,70	5,23	5,53	4,11
SL07	11,86	14,40	23,40	11,30	35,37	5,54	5,67	8,01
SL08	10,07	14,30	20,30	9,10	42,85	5,31	5,89	6,53

$\Delta P\%$  - percentual de Perda ao Fogo /  $\%Res.$  - percentual de Resíduos /  $W_{\text{hig}}\%$  - percentual de Água Higroscópica.

Observa-se que de uma forma geral que os solos da Zona da Mata, representados pelas letras ZM, apresentam uma certa uniformidade de resultados para 14 amostras, apenas as amostras ZM 14 e ZM 16 possuem menor quantidade de resíduos, indicando maior quantidades de minerais primários. Verifica-se também para essas amostras maior quantidade de alumina e  $\Delta P$ .

Para as amostras MV os resultados obtidos foram bem diversificados. A amostra de solo MV 05 possui a maior quantidade de  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$  menores de  $SiO_2$  e , sendo o valor se sílica quase desprezível. Observa-se também para a mostra MV 01, a grande quantidade de resíduos, indicando, como mencionado acima, maior quantidade de minerais primários após o ataque sulfúrico e a pequena percentagem de  $Fe_2O_3$ .

As amostras de Sul de Minas, representadas pelas letras SL, não apresentaram resultados muito diferentes das amostras da Zona da Mata, ressaltando que a SL 01 possui a maior quantidade de resíduos de todas as 33 amostras após o ataque do ácido sulfúrico.

Quanto aos valores de pH determinados em  $H_2O$ , obteve-se para todas as amostras resultados indicando de se tratar de solos moderadamente a fortemente ácidos, variando resultados acima de 4,05 e abaixo de 6,35, sendo o primeiro a amostra mais ácida (ZM 13) e o último a amostra mais alcalina (MV 07). Na comparação dos dois métodos utilizados na determinação do pH, obteve-se resultados variáveis para um método em relação ao outro, com exceção dos solos da região da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes que apresentaram todas as determinações em KCl maior do que em  $H_2O$ .

Tabela IV. 4 - Valores da subtração do pH em KCl e  $H_2O$ .

<i>Amostra</i>	<i>pH (KCl) – pH (H<sub>2</sub>O)</i>	<i>Amostra</i>	<i>pH (KCl) – pH (H<sub>2</sub>O)</i>
ZM01	-0,16	MV01	0,31
ZM02	0,18	MV02	0,66
ZM03	0,78	MV03	0,71
ZM04	-0,59	MV04	1,41
ZM05	-0,21	MV05	0,89
ZM06	0,22	MV06	1,01
ZM07	0,07	MV07	0,5
ZM08	-0,41	MV08	0,29
ZM09	-0,47	MV09	1,01
ZM10	-0,24	SL01	-0,29
ZM11	0,25	SL02	0,15
ZM12	0,66	SL03	-0,49

ZM13	0,42	SL04	-0,03
ZM14	0,49	SL05	0,01
ZM15	-0,22	SL06	0,3
ZM16	1,03	SL07	0,13
		SL08	0,58

Os valores de  $\Delta\text{pH}$  ( $\text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$ ), são apresentados na tabela IV. 4 e indicam que nos solos da Zona da Mata, sete amostras são eletronegativas (ZM 01, 04, 05, 08, 09, 10 e 15) e 9 são eletropositivas (ZM 02, 03, 06, 07, 11, 12, 13, 14 e 16). As amostras MV (Campo das Vertentes e Zona Metalúrgica) são todas eletropositivas as amostras SL (Sul de Minas) três são eletronegativas (SL 01, 03 e 05) e cinco são eletropositivas (SL 02, 05, 06, 07 e 08).

Os resultados para os índices de intemperismo  $K_i$  (relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e  $K_r$  ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) são apresentados na tabela IV. 5.

Quanto menor o valor de  $K_i$  para um solo de um determinado horizonte, tanto mais adiantado o estágio de intemperização dos constituintes minerais, e o valor 2,0 equivale a composição da caulinita e 2,2 o limite superior para os latossolos, de constituição relativamente menos intemperizada.

Tabela IV. 5 - Valores para os índices de intemperismo  $K_i$  e  $K_r$  das amostras deste estudo.

<i>Amostra</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>K<sub>r</sub></i>	<i>Amostra</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>K<sub>r</sub></i>
ZM01	1,55	1,23	MV01	0,80	0,65
ZM02	1,45	1,15	MV02	1,11	0,84
ZM03	1,10	0,91	MV03	0,74	0,57
ZM04	1,44	1,09	MV04	0,52	0,34
ZM05	1,57	1,14	MV05	0,17	0,04
ZM06	1,86	1,40	MV06	1,18	0,97
ZM07	1,35	1,06	MV07	0,27	0,22
ZM08	1,28	1,03	MV08	1,47	0,97
ZM09	1,32	1,00	MV09	0,43	0,32
ZM10	1,39	1,10	SL01	1,33	0,89
ZM11	1,48	1,17	SL02	1,38	1,06
ZM12	0,90	0,70	SL03	1,05	0,83
ZM13	1,30	0,90	SL04	0,84	0,67
ZM14	1,04	0,79	SL05	1,40	1,19
ZM15	1,71	1,30	SL06	1,13	0,89
ZM16	0,85	0,65	SL07	1,05	0,80
			SL08	1,20	0,93

Todos os valores de  $K_i$  resultam menores que 1,86, apresentando as amostras ZM 06 e ZM 15 os maiores valores, sendo essas amostras as menos intemperizadas. Os menores valores de  $K_i$  estão para as amostras MV indicando uma condição de “grau de intemperização” alto, sendo a amostra MV 07 a mais intemperizada das 33 amostras.

Em relação aos valores de  $K_r$ , não há uma discrepância muito grande comparado com os resultados de  $K_i$ . O índice  $K_r$  varia entre 1,40 e 0,22, sendo os maiores valores para as amostras ZM 06 e ZM 15 e menores valores para MV 07.

Em relação ao complexo sortivo, cujos resultados são apresentados na tabela IV. 6 para as amostras ZM e tabela IV. 7 para as amostras MV e SL nota-se que o somatório da concentração de cálcio e magnésio não varia muito para as 33 amostras de solo, exceto para MV 08 com 3,0 cmol<sub>c</sub>/Kg e ZM 06 com 1,5 cmol<sub>c</sub>/Kg (não há um valor separado para esses dois elementos químicos, apenas o somatório). A concentração de sódio tem valores na ordem de 0,00 a 0,05. O potássio apresenta-se com resultados variando de 0,01 a 0,04 exceto para as amostras SL 05 e ZM 11, com valores 0,08 e 0,11, respectivamente. Os valores de alumínio variam entre 0,0 e 0,7 para as amostras da Zona da Mata e para as amostras das regiões da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes e Sul de Minas não se detectou alumínio exceto para a amostra SL 03 com 0,2 cmol<sub>c</sub>/Kg. O hidrogênio aparece com resultados mais expressivos nas amostras da Zona da Mata e em menor quantidade para as outras duas regiões, mas ao valor mais expressivo desse elemento químico é para a amostra a amostra SL 03 com 5,7 cmol<sub>c</sub>/Kg.

De acordo com a EMBRAPA (1999), podemos com a relação  $100 \text{ Al}^{+++} / \text{S} + \text{Al}^{+++}$ , classificar os solos em álicos e não álicos. Se esta relação obtiver valor maior que 50% o solo é álico e se for menor que esse valor o solo é considerado não álico. Em relação às amostras da Zona da Mata, apenas 4 amostras foram classificadas como álicos, ZM 08, ZM 09, ZM 10 e ZM 13. Todas as amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes classificaram-se como não álicos e apenas uma amostra do Sul de Minas classificou-se como álico, a amostra SL 03.

Tabela IV. 6 – Resultados dos ensaios de complexo sortivo para as amostras da Zona da Mata.

Amostra	Complexo Sortivo (cmol <sub>c</sub> /kg)								Valor V Sat. Base	$\frac{100 \text{ Al}^{+++}}{\text{S} + \text{Al}^{+++}}$
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S	Al <sup>+++</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T		
ZM01	0,3		0,01	0,05	0,4	0,1	2,4	2,9	14	20
ZM02	0,2		0,01	0,01	0,2	0,0	1,5	1,7	12	0
ZM03	0,2		0,03	0,01	0,2	0,0	0,8	1,0	20	0
ZM04	0,6		0,01	0,01	0,6	0,3	2,3	3,2	19	33
ZM05	0,1		0,01	0,01	0,1	0,0	1,5	1,6	6	0
ZM06	0,5	1,0	0,02	0,01	1,5	0,2	2,4	4,1	37	12
ZM07	0,1		0,02	0,00	0,1	0,0	1,5	1,6	6	0
ZM08	0,2		0,02	0,02	0,2	0,7	3,3	4,2	5	78
ZM09	0,1		0,01	0,01	0,1	0,6	3,0	3,7	3	86
ZM10	0,1		0,01	0,01	0,1	0,6	2,5	3,2	3	86
ZM11	0,1		0,11	0,01	0,2	0,0	1,8	2,0	10	0
ZM12	0,3		0,01	0,01	0,3	0,0	2,0	2,3	13	0
ZM13	0,1		0,01	0,01	0,1	0,3	3,3	3,7	3	75
ZM14	0,2		0,01	0,01	0,2	0,0	1,6	1,8	11	0
ZM15	0,3		0,01	0,01	0,3	0,0	2,1	2,4	13	0
ZM16	0,1		0,01	0,01	0,1	0,0	1,8	1,9	5	0

Tabela IV. 7 – Resultados dos ensaios de complexo sortivo para as amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes.

Amostra	Complexo Sortivo (cmol <sub>c</sub> /kg)								Valor V Sat. Base	$\frac{100 \text{ Al}^{+++}}{\text{S} + \text{Al}^{+++}}$
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S	Al <sup>+++</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T		
MV01	0,1	1	0,01	0,01	0,1	0	1,5	1,6	6	0
MV02	0,1	1	0,01	0,01	0,1	0	0,7	0,8	12	0
MV03	0,1	1	0,04	0,01	0,2	0	1,6	1,8	11	0
MV04	0,1	1	0,01	0,01	0,1	0	1,2	1,3	8	0
MV05	0,1	1	0,02	0,02	0,1	0	4,4	4,5	2	0
MV06	0,1	1	0,03	0,01	0,1	0	2,0	2,1	5	0
MV07	0,8	1	0,02	0,01	0,8	0	0,7	1,5	53	0
MV08	2,6*	0,4*	0,02	0,01	3,0	0	1,8	4,8	63	0
MV09	0,1	1	0,01	0,01	0,1	0	1,0	1,1	9	0
SL01	0,4	1	0,04	0,01	0,5	0	1,6	2,1	24	0
SL02	0,1	1	0,01	0,01	0,1	0	1,8	1,9	5	0
SL03	0,1	1	0,02	0,01	0,1	0,2	5,7	6,0	2	67
SL04	0,1	1	0,04	0,01	0,1	0	1,2	1,3	8	0
SL05	0,1	1	0,08	0,01	0,2	0	1,3	1,5	13	0
SL06	0,4	1	0,03	0,01	0,4	0	1,8	2,2	18	0
SL07	0,1	1	0,03	0,03	0,2	0	1,3	1,5	13	0
SL08	0,1	1	0,01	0,01	0,1	0	1,2	1,3	8	0

\* Análise repetida e resultado confirmado.

Foram determinados também os parâmetros “V” que corresponde à saturação de bases, sendo função de “S” e “T”, respectivamente bases trocáveis e capacidade de troca catiônica.

Em relação às bases trocáveis, parâmetro “S”, que é a soma de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , pode-se notar que para o conjunto das 33 amostras, os resultados variaram de 0,1 a 0,8  $\text{cmol}_c/\text{Kg}$ , exceto para amostra MV 08, cujo resultado das bases trocáveis é 3,0  $\text{cmol}_c/\text{Kg}$ . Quanto menor o valor do parâmetro “S” mais alterado é o material, com isso a análise desses resultados indica que os solos estudados passaram por processos intensos de intemperização e pode-se sugerir que a amostra MV 08 é a menos alterada, entre as amostras analisadas.

Para a capacidade de troca catiônica, valor “T” ou “CTC”, que representa a atividade da argila, a EMBRAPA (1999) indica que as argilas de atividade alta (Ta) apresentam valores para “T” igual ou superior a 27  $\text{cmol}_c/\text{Kg}$  e atividade baixa (Tb) quando apresentam valor inferior a esse. Assim observa-se que as amostras estudadas, na sua totalidade, atividade baixa.

O parâmetro “V” indica quanto o solo é saturado por bases. Para os resultados apresentados, pode-se concluir que só dois dos materiais, MV 07 (V=53%) e MV 08 (V=63%) apresentam valores superiores a 50%, conseqüentemente sendo classificados como “eutróficos” e, as outras 31 amostras com valores inferiores a 50% são classificados como “distróficos”, segundo EMBRAPA (1999).

### **IV. 3 – Mineralogia**

Foram realizadas análises mineralógicas por Difração de Raios-X, na fração argila, isto é, da fração formada por grãos de diâmetro inferior a 0,002mm.

Essas análises foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios-X no setor de Geologia de Engenharia do Departamento de Geologia IGEO – UFRJ. Os resultados dessas análises são apresentados na tabela IV. 8.

Tabela IV. 8 - Resultados das análises mineralógicas por Difração de Raios-X.

Amostra	Mineralogia			
	Argilominerais		Óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio	
	Caulinita	Ilita	Gibbsita	Goetitha
ZM01	+++	-	+	+
ZM02	+++	-	+	+
ZM03	+++	-	+	+
ZM04	+++	-	-	+
ZM05	+++	-	traços	+
ZM06	+++	-	-	+
ZM07	+++	-	+	+
ZM08	+++	-	+	+
ZM09	+++	-	+	+
ZM10	+++	-	+	+
ZM11	+++	-	traços	+
ZM12	+++	-	+++	+
ZM13	+++	-	+	+
ZM14	+++	-	+	+
ZM15	+++	-	-	traços
ZM16	+++	-	+	+
MV01	+++	-	++	+
MV02	+++	-	++	+
MV03	+++	-	++	+
MV04	+++	-	++	+
MV05	+++	-	++	+
MV06	+++	-	++	+
MV07	++	-	+++	+
MV08	++	-	+++	+
MV09	+++	+	+	+
SL01	+++	-	+	+
SL02	+++	-	+	+
SL03	+++	-	++	+
SL04	+++	traços	+++	-
SL05	+++	-	+	traços
SL06	+++	-	+	+
SL07	+++	-	++	+
SL08	+++	-	+	traços

+++ predominante

++ presença secundária

+ presente em menores proporções

traços: quantidades ínfimas

-: ausente/não detectada

Observa-se uma predominância do argilomineral caulinita em todas as 33 amostras, e a ausência do argilomineral illita em quase a totalidade dessas amostras. Esses resultados conferem com os tipos de formações dos solos, que sofreram um processo de intemperização muito intenso. O material mais intemperizado tem a tendência do predomínio do argilomineral caulinita. Observando a hierarquia de solubilidade dos elementos químicos, o titânio, ferro, alumínio e sílica, respectivamente do menos solúvel para o mais solúvel, pode-se notar que quanto mais lixiviado (intemperizado) o material, menor a presença dos argilominerais do grupo 2:1 (illita), que possui maior quantidade de sílica, e maior a quantidade dos argilominerais do grupo 1:1 (caulinita).

Nota-se que com a predominância do argilomineral 1:1, caulinita, todas as amostras não apresentam expansão considerável em contato com a água, pois a estrutura da caulinita não permite a entrada de água entre suas lamelas, dessa forma não se espera grandes variações volumétricas quando umidecidas, conseqüentemente esse material, rico em caulinita pode ser considerado de baixa transformação volumétrica.

Em relação aos óxidos e hidróxidos de alumínio, nota-se que uma quantidade expressiva de gibbsita para as amostras da Zona Metalúrgica e Campos das Vertentes (amostras MV) e para as amostras ZM 12, SL 03, SL 04 e SL 07. Observa-se das 33 amostras analisadas apenas as ZM 04, ZM 06 e ZM 15 não apresentaram gibbsita e a ZM 05 e ZM 11 em quantidades ínfimas desse material.

Em relação aos óxidos e hidróxidos de ferro, a goetitha se mostra também presente nas amostras em geral, porém em menores proporções. Nas amostras ZM 15, SL 05 e SL 08 a goetitha apresenta quantidades ínfimas e na amostra SL 04 esse material não é detectado.

Como visto anteriormente no Capítulo 02, os óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro possuem propriedades cimentantes, desempenhando papel importante na formação de agregados, com isso, os solos mais cimentados dos estudados são os da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes (amostras MV) e as ZM 12, SL 03, SL 04e SL 07. Enquanto isso, as amostras de solos menos cimentadas são ZM 04, ZM 05, ZM 06, ZM 11 e ZM 15, sendo esta última com menos formação de agregados das 33 amostras de solos estudados.

## IV. 4 – Geotécnico

### IV. 4. 1 – Classificações Geotécnicas Convencionais

Um dos objetivos principais de se caracterizar um solo está associado ao enquadramento em uma classe de comportamento geotécnico. Esta classe pode servir como parâmetro de comportamento para o material estudado e pode representar ou ainda que se possa “estimar” o seu comportamento no campo e na obra, ou simplesmente facilitar a compreensão em relação aos materiais em geral.

Para a classificação geotécnica são usados alguns sistemas tradicionalmente conhecidos no meio técnico da Engenharia Civil, em que se utilizam resultados de ensaios de laboratório para a obtenção de índices a serem considerados na identificação de determinada classe.

Foram realizados por MARANGON (2004), os ensaios de granulometria completa utilizando os seguintes métodos: para a fração considerada grossa, ou seja, partículas com diâmetro maiores que 0,074 mm utilizou-se o método de ensaio ME 80/94 Solos – análise granulométrica por peneiramento e para a fração considerada fina, ou seja, partículas com diâmetro menores que 0,074 mm utilizou-se o método de ensaio ME 51-94 ambos os métodos pertencentes ao Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER). Para a determinação dos Limites de Atterbeg, o valor do limite de liquidez pode ser obtido através do método de ensaio do DNER, ME 122/94, enquanto o limite de plasticidade determina-se através da metodologia ME 82/94 do citado Órgão.

São mostradas as curvas granulométricas obtidas, nas figuras IV. 4 e IV. 5, para as amostras ZM, na figura IV. 6 para as amostras MV e IV. 7 para as amostras SL.

A tabela IV. 9, apresenta os resultados de ensaio para as amostras ZM e IV. 10, para as amostras SL e MV. Foi verificada a relação silte/argila, que é um indicador de maturidade do solo. Quanto maior esta relação mais imaturo é o material. Esta relação para as amostras ZM estão no intervalo entre 0,28 a 0,03, sendo a amostra ZM 16 menos imatura. Para as amostras MV e SL, essa relação varia entre 0,10 e 0,47, exceto a MV 05 que representa igual proporção silte/argila.

Observa-se que os solos estudados apresentam predominância da fração granulométrica argila entre 50 e 78%, silte entre 2,5 e 27% seguida da fração areia entre 11,4 e 41,2%, sendo a fração pedregulho com quantidades ínfimas. Dos 33 solos coletados, 31 são argilosos e, apenas 2 têm a granulometria na fração areia, o MV 05 e SL 01. Nota-se que MV 05 possui 44% de areia contra 30% de silte e argila, podendo classifica-lo como areno-silto-argiloso e o SL 01 é mais arenoso, contendo 62% de areia, 6,5% de silte e 33,5% de argila, podendo classifica-lo como areno-argiloso. O solo mais argiloso das 33 amostras é o ZM 16 com 78% de argila.

Verificou-se para o conjunto de amostras ZM e SL apresentam uma certa uniformidade nos resultados de granulometria. As oito primeiras amostras ZM há uma aproximação granulométrica muito grande, com as frações de argila variando em um intervalo muito pequeno (57% a 64,5%). Essa uniformidade observada nas curvas granulométricas das amostras ZM e SL se dá pela presença de litologias semelhantes. As amostras ZM e SL são derivadas basicamente de gnaisses e granitóides. Quanto as amostras MV, há uma variabilidade maior no traçado das curvas granulométricas, devido a diversidade de litologias, como rochas ígneas, metamórficas e sedimentares.

As classificações das amostras de solo nos sistemas tradicionais do TRB (Transportation Research Board) também conhecida como HRB (Highway Research Board) e do sistema de classificação USCS (Unified Soil Classification System), referido com sistema unificado de classificação de solos (SUCS), publicada pela ASTM (1990), estão inseridas nas tabelas IV. 9 e IV. 10, que incluem os valores para o índice de grupo (IG).

Tabela IV. 9 - Resultados dos ensaios de caracterização tradicional dos solos – granulometria, densidade dos grãos, limites de Atterberg, Índice de grupo e classificações pelos sistemas USCS e TRB, para as amostras ZM.

Amostra	Granulometria (% Passante)					$\gamma_g$	Ped. (%)	Areia (%)	Silte (%)	Arg. (%)	Sil/Arg	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IG	Classificação	
	3/8	4	10	40	200											USCS	TRB
ZM01	100,0	99,8	99,0	93,4	72,9	2,711	0,2	29,0	11,0	61,0	0,18	62,0	29,5	32,5	19	CH	A - 7 - 6
ZM02	100,0	99,6	99,3	95,6	74,4	2,704	0,4	27,1	8,5	64,5	0,13	76,0	33,0	43,0	20	CH	A - 7 - 6
ZM03	100,0	100,0	99,6	90,5	69,4	2,663	0,0	33,5	5,5	62,5	0,09	74,3	31,3	43,0	18	CH	A - 7 - 6
ZM04	100,0	100,0	99,8	97,0	77,4	2,767	0,0	26,0	12,0	64,0	0,19	79,0	30,4	48,6	20	CH	A - 7 - 6
ZM05	100,0	99,7	98,4	87,7	71,3	2,767	0,3	29,7	10,5	60,5	0,17	73,5	36,5	37,0	19	MH/CH	A - 7 - 5
ZM06	100,0	100,0	99,7	95,5	76,7	2,729	0,0	27,0	16,0	59,0	0,27	62,1	33,1	29,0	20	MH	A - 7 - 5
ZM07	100,0	99,7	96,9	82,5	66,5	2,725	0,3	33,7	9,0	57,0	0,16	68,5	32,9	35,6	18	MH	A - 7 - 5
ZM08	100,0	100,0	99,5	87,4	70,3	2,713	0,0	30,5	6,0	64,0	0,09	66,0	28,9	37,1	19	CH	A - 7 - 6
ZM09	99,8	99,5	97,8	87,9	74,0	2,764	0,5	26,5	7,8	66,0	0,12	74,2	31,9	42,3	20	CH	A - 7 - 6
ZM10	99,6	98,4	97,4	93,8	68,6	2,730	1,6	31,9	10,0	58,0	0,17	73,8	27,5	46,3	18	CH	A - 7 - 6
ZM11	99,7	98,7	96,6	85,5	66,4	2,729	1,3	32,7	5,5	61,0	0,09	90,0	32,7	57,3	17	CH	A - 7 - 5
ZM12	99,7	99,4	98,7	86,2	63,2	2,728	0,6	37,4	8,5	54,5	0,16	69,8	25,4	44,4	16	CH	A - 7 - 6
ZM13	99,8	99,3	98,6	96,2	79,6	2,824	0,7	28,3	16,8	59,0	0,28	81,0	32,9	48,1	20	CH	A - 7 - 5
ZM14	99,8	99,0	98,3	95,4	83,3	2,795	1,0	18,0	10,5	72,0	0,15	69,0	33,5	35,5	20	MH	A - 7 - 5
ZM15	100,0	99,7	99,1	92,3	71,4	2,729	0,3	28,7	8,0	64,0	0,13	80,0	46,6	46,4	19	CH	A - 7 - 5
ZM16	99,9	99,7	99,0	93,5	80,7	2,770	0,3	18,9	2,5	78,0	0,03	66,5	28,5	38,0	20	CH	A - 7 - 6

Ped. – Pedregulho

Arg. – Argila

Sil/Arg – Relação entre silte e argila

$\gamma_g$  – densidade dos grãos

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

IP – Índice de plasticidade

IG – Índice de grupo

Tabela IV. 10 - Resultados dos ensaios de caracterização tradicional dos solos – granulometria, densidade dos grãos, limites de Atterberg, Índice de grupo e classificações pelos sistemas USCS e TRB, para as amostras MV e SL.

Amostra	Granulometria (% Passante)					$\gamma_g$	Ped. (%)	Areia (%)	Silte (%)	Arg. (%)	Sil/Arg	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IG	Classificação	
	3/8	4	10	40	200											USCS	TRB
MV01	99,4	99,2	98,5	93,8	61,2	2,691	0,8	41,2	5,5	52,5	0,10	73,8	27,5	46,3	16	CH	A - 7 - 6
MV02	99,8	99,7	99,4	98,3	84,2	2,749	0,3	17,7	17,5	66,5	0,26	64,2	32,9	31,3	20	MH	A - 7 - 5
MV03	100,0	99,2	97,6	95,8	90,9	2,734	0,8	8,2	18,0	74,0	0,24	78,0	33,4	44,6	20	CH	A - 7 - 5
MV04	100,0	99,9	98,4	95,2	85,7	2,893	0,1	17,4	27,0	57,0	0,47	55,1	29,4	27,5	18	CH	A - 7 - 6
MV05	99,9	99,4	94,6	85,0	63,0	3,251	0,6	44,4	30,0	30,0	1,00	34,8	22,3	12,5	7	CL	A - 4
MV06	99,7	99,3	98,9	95,0	69,6	2,687	0,7	34,3	17,0	50,0	0,34	57,0	31,1	25,9	16	MH	A - 7 - 5
MV07	99,1	97,7	94,7	80,8	69,4	2,701	2,3	30,2	16,5	52,5	0,31	49,3	28,3	21,0	13	MH	A - 6
MV08	100,0	99,9	99,4	97,6	89,7	2,860	0,1	11,4	23,5	66,5	0,35	64,5	33,9	30,6	20	MH	A - 7 - 5
MV09	100,0	99,8	98,7	95,3	82,2	2,768	0,2	21,8	21,5	59,0	0,36	50,5	31,0	19,5	18	MH	A - 7 - 5
SL01	100,0	100,0	99,8	99,1	45,0	2,767	0,0	62,0	6,5	33,5	0,19	32,8	20,0	12,8	3	SC	A - 2 - 6
SL02	99,9	98,9	95,6	85,1	73,9	2,740	1,1	25,4	10,0	64,0	0,16	72,0	37,5	34,5	20	MH	A - 7 - 5
SL03	100,0	100,0	100,0	93,0	78,5	2,732	0,0	22,0	8,0	70,0	0,11	50,2	34,0	16,2	13	MH	A - 6
SL04	100,0	100,0	99,3	95,5	84,8	2,710	0,0	16,5	13,0	71,0	0,18	65,0	31,2	33,8	20	CH	A - 7 - 5
SL05	100,0	99,8	98,8	90,6	70,2	2,658	0,2	32,8	9,5	59,0	0,16	70,2	33,3	36,9	19	MH	A - 7 - 5
SL06	99,9	99,7	98,5	96,3	77,4	2,689	0,3	26,7	20,0	56,0	0,36	50,8	23,4	27,2	17	CH	A - 7 - 5
SL07	100,0	99,7	98,3	93,5	70,9	2,696	0,3	32,2	14,0	55,5	0,25	58,2	30,9	27,3	17	MH	A - 7 - 5
SL08	100,0	99,4	97,0	89,5	64,2	2,699	0,6	38,9	11,0	51,5	0,21	49,0	28,6	20,4	11	CL	A - 5

Ped. – Pedregulho

Arg. – Argila

Sil/Arg – Relação entre silte e argila

$\gamma_g$  – densidade dos grãos

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

IP – Índice de plasticidade

IG – Índice de grupo

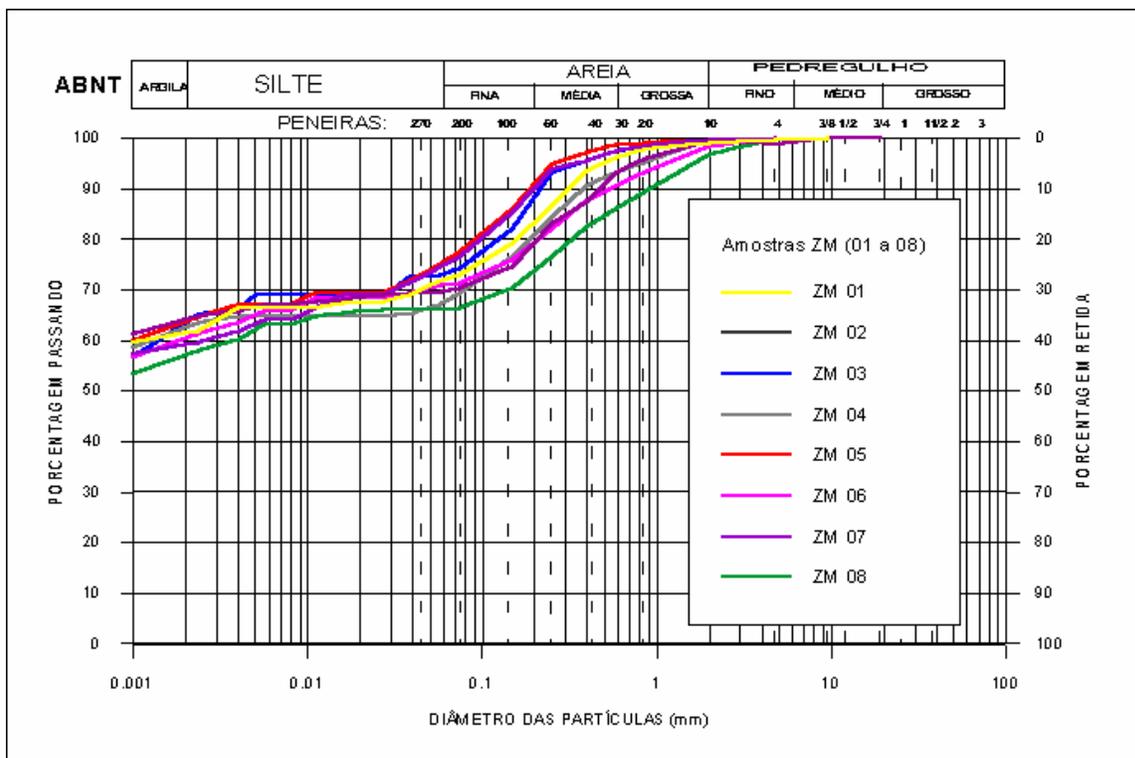


Figura IV. 4 – Curvas granulométricas das amostras ZM de 01 a 08.

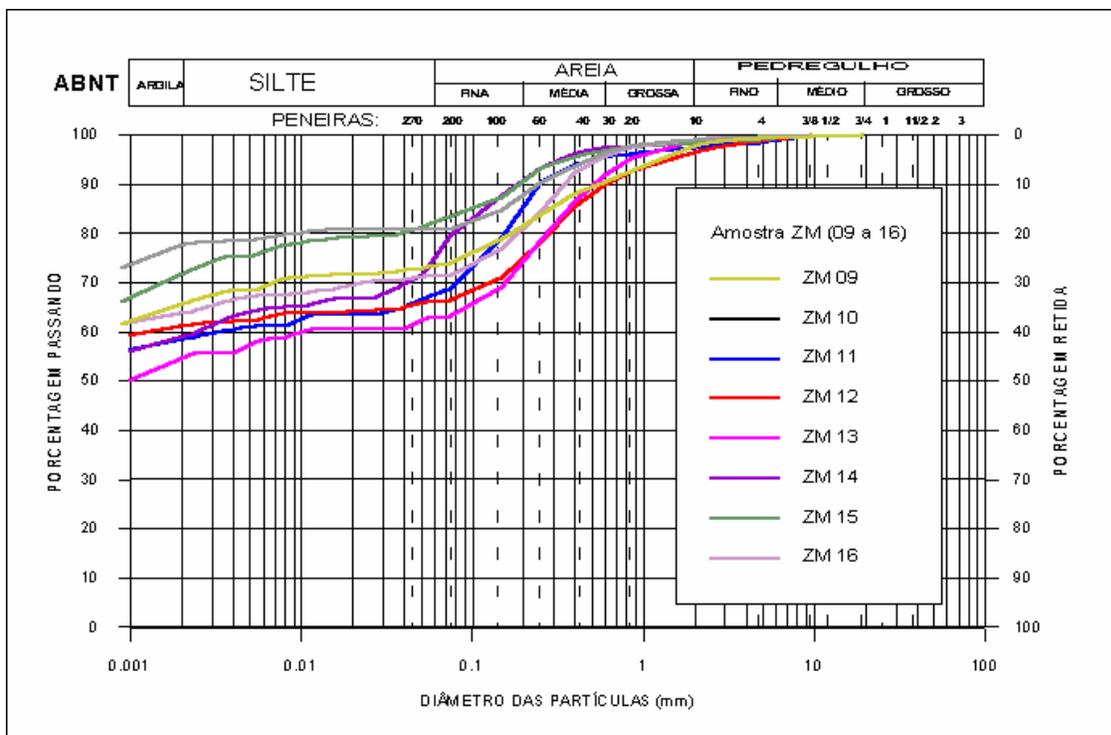


Figura IV. 5 – Curvas granulométricas das amostras ZM de 09 a 16.

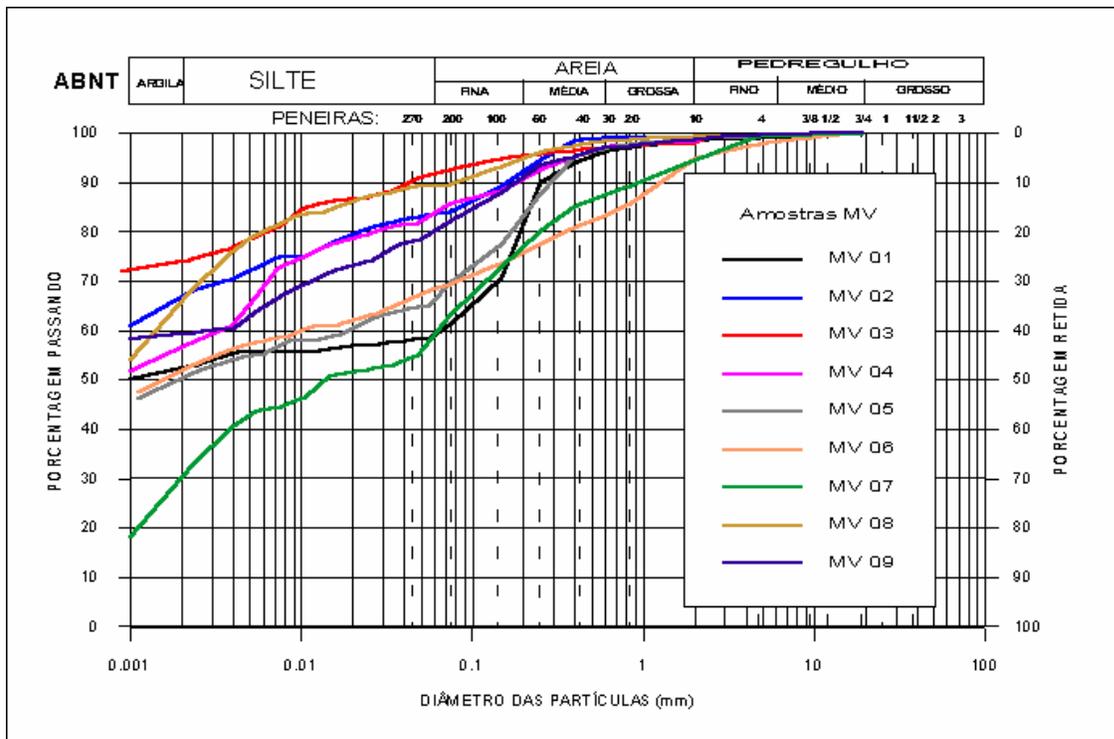


Figura IV. 6 – Curvas granulométricas das amostras MV.

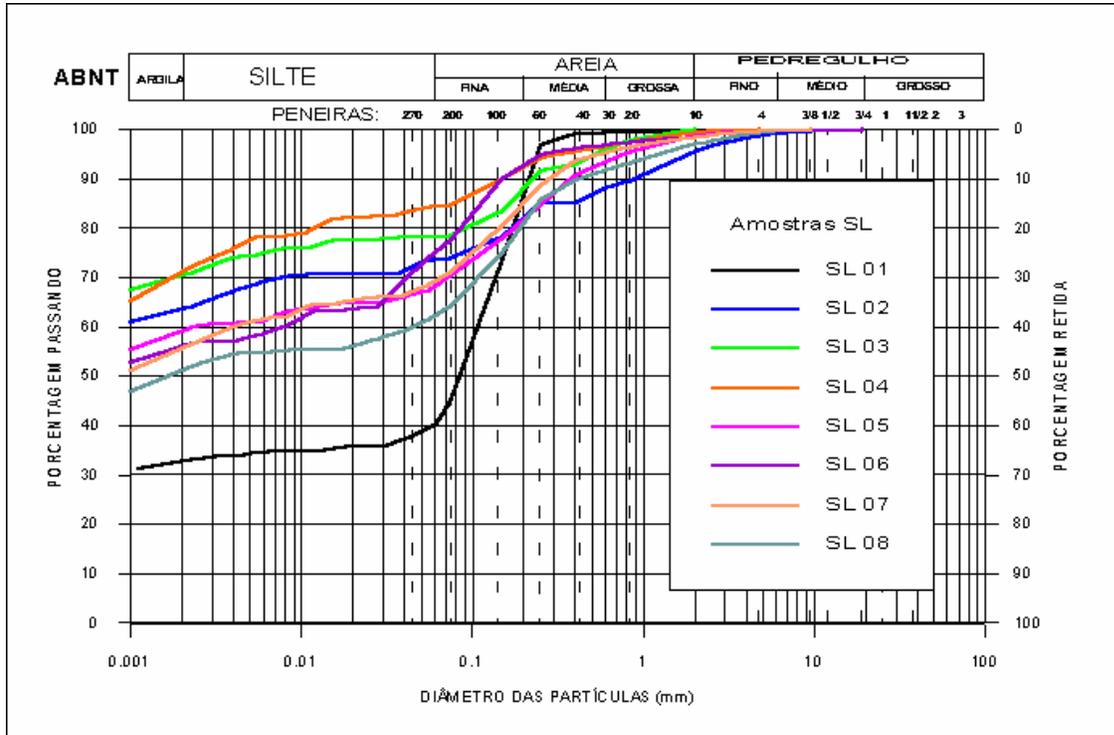


Figura IV. 7 – Curvas granulométricas das amostras SL.

Pode-se notar que pelo sistema TRB as amostras de solos ZM se enquadram nas classes A-7-5 (7 amostras) e A-7-6 (9 amostras), ou seja, são argilosos, sendo coerente o resultado com o ensaio de granulometria.

As amostras MV se enquadram nas classes A-7-5 (5 amostras), A-7-6 (2 amostras), A-6 (MV 07) e A-4 (MV 05). Os resultados também se mostram coerente com o ensaio granulométrico.

As amostras SL apresentam-se nas classes A-2-6 (SL 01), A-7-5 (5 amostras), A-6 (SL 03) e A-5 (SL 08). Todas as amostras apresentaram resultados bastante satisfatórios, exceto a amostra SL 08, que segundo a classificação TRB é um solo siltoso e no ensaio granulométrico o resultado foi de um solo argilo-arenoso. Nota-se que as amostras SL que resultaram em uma granulometria mais grossa são amostras que derivaram de rochas sedimentares, por exemplo, a amostra SL 01 cuja classe é A-2-6, o material de origem são arenitos e conglomerados e a amostra SL 08 cuja classe é A-5, o material de origem são seqüências metassedimentares.

Em relação ao sistema de classificação unificado, USCS, obteve-se um número expressivo de resultados para a classificação “MH” – silte com alta plasticidade. Essa classificação não se mostrou adequada para parte das amostras utilizadas, que não tem o silte como fração granulométrica predominante. Várias amostras se enquadraram na classe “CH” – argila com alta plasticidade. Para a amostra SL 01, obteve-se a classificação “SC” – areia-argilosa e estranhamente MV05 foi classificado como “CL” – argila com pouca plasticidade. Essa classificação pode ser melhor observada na figura IV. 8 que mostra o Gráfico de Plasticidade de Casagrande (ASTM, 1990) onde estão distribuídas as 33 amostras de solos.

Em relação às classificações geotécnicas convencionais, a classificação TRB foi a que teve melhor coerência de resultados e surpreendentemente a classificação USCS teve a maioria dos resultados bastante inadequados ou incoerentes.

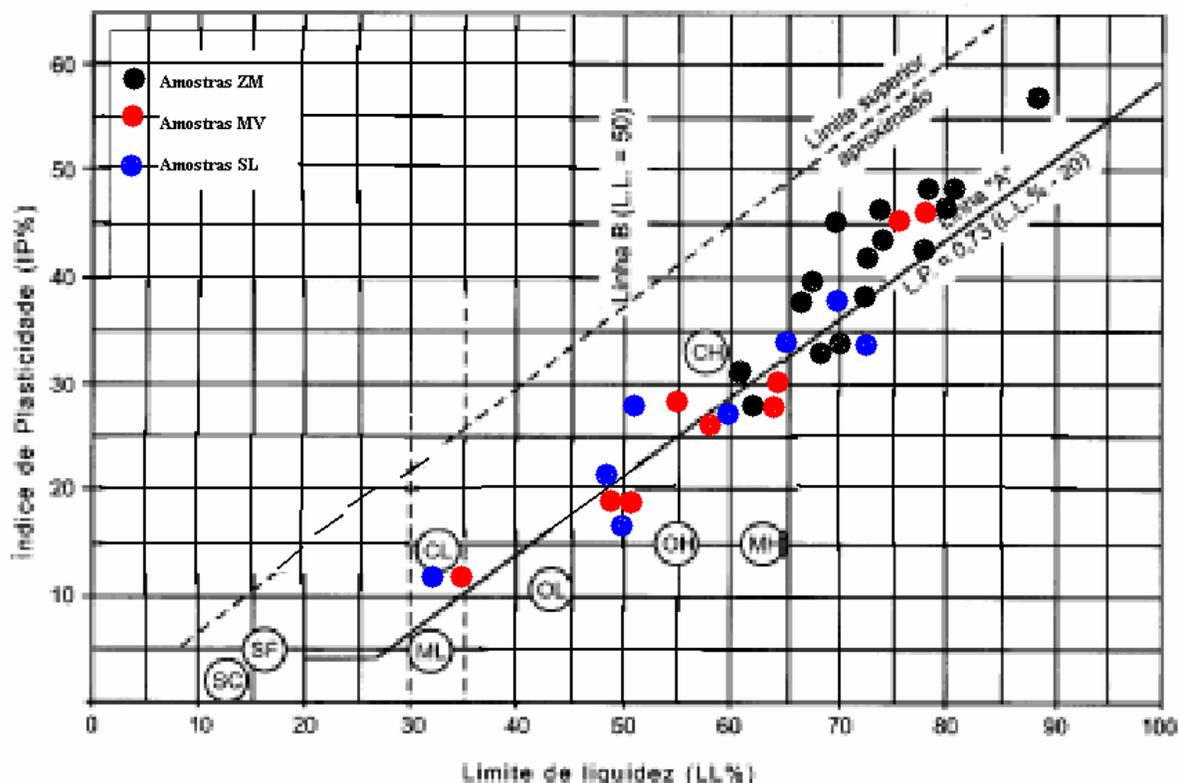


Figura IV. 8: Gráfico de Plasticidade de Casagrande (ASTM, 1990) onde estão distribuídas as 33 amostras de solos.

#### IV. 4. 2– Classificação Geotécnica Não-Convencional

Foram realizados ensaios de compactação em moldes miniatura e de perda de massa por imersão (NOGAMI e VILLIBOR, 1995) para a classificação das amostras no sistema MCT de classificação dos solos.

Na tabela IV. 11 são apresentados os parâmetros de classificação utilizados pelo sistema MCT ( $c'$ ,  $d'$ ,  $P_i$ ,  $e'$ ) e os valores obtidos para teor de umidade ótimo ( $W_{ót}$ ) e de Massa Específica Aparente Seca Máxima ( $MEAS_{máx}$ ), para 10 golpes do MCT. Estes valores foram obtidos através de uma curva interpolada entre as curvas de 8 e 12 golpes.

Tabela IV. 11 – Valores dos parâmetros e classes obtidas pela Metodologia MCT de classificação dos solos para as amostras ZM, MV e SL.

Amostra	c'	d'	Pi	e'	Classe (MCT)	Wót*	MEASmáx*
ZM01	2,16	69,9	0	0,66	LG'	25,1	15,2
ZM02	2,11	24,8	0	0,93	LG'	30,0	14,3
ZM03	2,36	20,7	34	1,09	LG'	27,0	15,0
ZM04	2,23	47,6	0	0,75	LG'	27,8	15,3
ZM05	2,07	32,0	0	0,85	LG'	27,2	14,6
ZM06	1,76	73,5	102	1,09	LG'	25,9	15,2
ZM07	2,00	50,8	48	0,96	LG'	27,0	14,6
ZM08	2,23	36,7	91	1,13	NG'	27,0	14,9
ZM09	2,11	36,4	40	0,98	LG'	27,7	14,5
ZM10	2,23	40,0	25	0,91	LG'	26,5	15,2
ZM11	2,29	38,1	0	0,81	LG'	28,0	15,0
ZM12	1,94	86,0	52	0,91	LG'	20,9	16,4
ZM13	2,42	44,0	86	1,10	LG'	28,8	15,2
ZM14	2,29	45,2	26	0,90	LG'	28,6	15,0
ZM15	2,23	33,4	0	0,84	LG'	30,8	14,4
ZM16	2,42	62,9	98	1,09	LG'	27,0	15,5
MV01	1,94	39,0	35	0,95	LG'	25,8	15,5
MV02	1,94	31,1	18	0,94	LG'	31,0	13,6
MV03	2,42	72,9	32	0,84	LG'	32,4	13,8
MV04	2,06	49,1	82	1,07	LG'	29,8	15,0
MV05	1,01	35,4	0	0,83	LA'	19,0	17,5
MV06	2,11	27,0	0	0,90	LG'	28,0	14,6
MV07	2,36	55,6	103	1,12	LG'	26,2	15,1
MV08	1,94	44,7	110	1,16	NG'	28,6	14,9
MV09	1,99	45,1	105	1,14	NG'	30,2	14,1
SL01	1,45	73,3	0	0,65	LA'	14,5	18,3
SL02	1,93	33,3	0	0,84	LG'	29,0	14,3
SL03	2,17	58,6	35	0,88	LG'	27,5	14,5
SL04	2,23	38,4	0	0,80	LG'	29,8	13,9
SL05	2,17	48,7	5	0,77	LG'	28,5	14,6
SL06	2,17	33,7	0	0,84	LG'	24,6	15,1
SL07	1,94	34,5	0	0,83	LG'	27,0	14,6
SL08	2,05	34,1	0	0,84	LG'	24,1	15,5

\* Energia correspondente a 10 golpes

A figura IV. 9 mostra o gráfico para a classificação MCT com a identificação dos pontos determinados pelos pares de coordenadas  $c'$  x  $e'$ , para as amostras ZM, MV e SL.

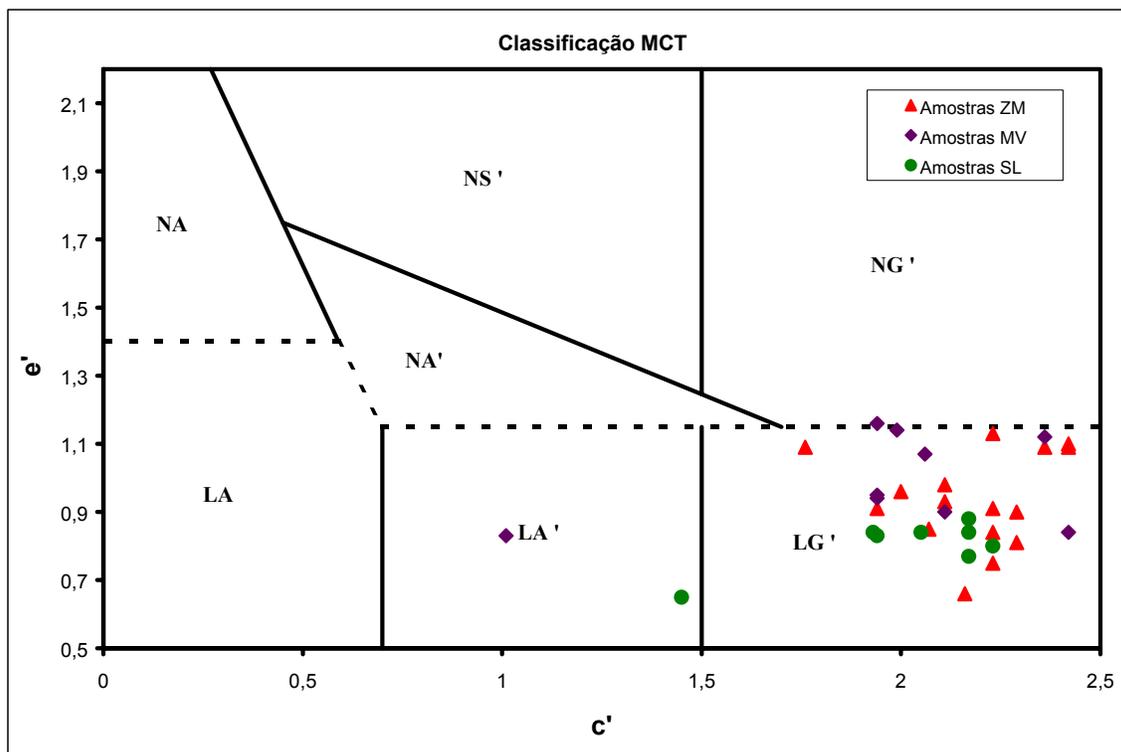


Figura IV. 9 – Gráfico de Classificação MCT dos Solos para as amostras ZM, MV e SL.

Das 33 amostras pesquisadas (figura IV. 9) observa-se que são predominantemente argilosos de comportamento laterítico, apenas duas amostras de solos apresentaram comportamento diferente do conjunto inicial como esperado, cuja classificação foi LA', laterítico arenoso, MV 05 e SL 01, sendo seus respectivos materiais de origem o itabirito e rochas sedimentares, como já visto anteriormente, solos derivados desses materiais possuem a granulometria mais grosseira.

Segundo MARANGON (2004), estas duas amostras foram incluídas no programa de coleta pelo fato da primeira pertencer à classe dos Latossolos Ferríferos, o que despertou interesse no estudo desta variação pedológica, e a segunda por, de certa forma, representar um material de formação geológica da bacia do Rio Paraná, coletado junto à divisa do estado de São Paulo, tão estudado e utilizado em obras de pavimentação naquele estado, com resultados muito satisfatórios.

Algumas amostras se aproximaram da fronteira estabelecida para os de comportamento Não-Laterítico, podendo-se identificar nesta situação nove amostras, sendo

três amostras (ZM08, MV08 e MV09) classificadas como NG' (comportamento argiloso Não Laterítico).

## **CAPÍTULO V – CORRELAÇÕES ENTRE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, MINERALÓGICAS, GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS.**

Foram apresentados nos capítulos 3 e 4, respectivamente a descrição do meio físico onde foram coletadas as amostras de solos e a caracterização química, mineralógica, geológica, geotécnica e pedológica das amostras de solos coletadas para o estudo.

Em relação a descrição do meio físico, ou seja, a descrição geoambiental da área pode-se observar que a região de coleta das 33 amostras de solos pertence ao clima tropical / intertropical com temperatura média de 23°C e a precipitação anual entre 1200 a 1500 mm. Conclui-se que estes dois fatores nos mostram uma região quente e úmida, onde a precipitação é maior que a evapotranspiração. Essas características geoambientais da região propiciam, correlacionadas a outros fatores como relevo, material de origem, organismos e tempo, a formação de solos muito espessos e maduros pedologicamente, ou seja, com horizontes bem definidos e característicos, como por exemplo, o horizonte B latossólico (B<sub>w</sub>).

Essa condição pedogenética tão evoluída se dá pelas características regionais dos pontos de coleta dos solos. Pode-se notar que a precipitação anual é bastante alta, facilitando a realização dos processos pedogenéticos: adição, perda (remoção) e transformação. Entre os vários processos de alteração do material, a hidrólise e a oxidação (intemperismo químico) são, sem dúvida, os mais importantes. Essa importância se revela, principalmente, em regiões de clima tropical / intertropical, como é o caso da região dos pontos de coleta dos solos.

Com a apresentação dos resultados das análises químicas, mineralógicas, geológicas, geotécnicas e pedológicas para as 33 amostras de solos pode-se fazer algumas análises relacionadas às características apresentadas. São apresentadas no presente capítulo, algumas correlações observadas entre algumas das características, como por exemplo, a correlação entre a pedologia e química, química e mineralogia, química e geologia, entre outras.

## V. 1 – Correlações entre a Química e Mineralogia

- Para o conjunto das 33 amostras de solos o valor de “CTC”, que representa a atividade da argila, forneceu valores muito inferiores a 27  $\text{cmol}_c/\text{Kg}$ , indicando que o conjunto de amostras é de atividade baixa. Esta característica apresenta relação direta com o argilomineral predominante nos solos estudados, a caulinita que possui como principais propriedades a peculiaridade de não se tornar expansiva quando umidecidas e portanto não apresentar grandes variações volumétricas.
- Em relação ao pH do conjunto de amostras, pode-se notar que este varia de moderadamente a fortemente ácido, respectivamente para as amostras MV e ZM. Quanto mais ácido o ambiente, mais haverá o argilomineral caulinita, pois os elementos alcalinos como o cálcio, magnésio, sódio e potássio foram lixiviados, e são esses os elementos que tornarão o ambiente alcalino.
- Quanto menor o valor do parâmetro “Ki” para um solo de um determinado horizonte, tanto mais adiantado o estágio de intemperização dos constituintes minerais e o valor de  $K_i = 2,0$ , equivale a composição da caulinita. Todos os valores de  $K_i$  resultam menores que 2,0, apresentando as amostras ZM 06 (1,86) e ZM 15 (1,71) os maiores valores para  $K_i$ .
- Quanto maior o valor de  $K_i$  ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) menor a quantidade de hidróxido de alumínio (gibbsita). Pode-se observar que das 33 amostras analisadas apenas as amostras ZM 06 e ZM 15 não apresentaram gibbsita, correspondendo estas amostras exatamente a que apresentaram os maiores valores de  $K_i$ , como já foi destacado. As amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes possuem os menores valores para o índice  $K_i$ , uma vez que a gibbsita está presente em maiores proporções.
- A amostra MV 05 contém maior proporção de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) para o conjunto das 33 amostras, 40,60% e, quantidades ínfimas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 0,93%, com isso os valores do índice de intemperismo  $K_i$  e  $K_r$ , que estão em função desses valores, apresentam-se com os menores valores.

Quanto menor o valor do parâmetro “S” (soma das bases trocáveis =  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) mais lixiviado ou alterado é o material. Para todas as 33 amostras analisadas o valor de “S” apresentou-se muito baixo, correspondendo um grau avançado de alteração e, fazendo

sentido com os baixos valores de  $K_i$ , já mencionados. Quanto menor o valor do parâmetro “S” maior o valor de  $K_i$  e, isso se confirma para as amostras MV 08 ( $S = 3,0 \text{ cmol}_c/\text{Kg}$  e  $K_i = 1,47$ ) e ZM 06 ( $S = 1,5 \text{ cmol}_c/\text{Kg}$  e  $K_i = 1,40$ ).

## V. 2 – Correlações entre a Química e Geologia

- As amostras de solos da Zona da Mata possuem uma certa uniformidade, sem muitas variações, nos resultados de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ataque sulfúrico). Pode-se notar que isso ocorre devido à natureza do material de origem dos solos. Praticamente toda a região da Zona da Mata é formada por rochas metamórficas gnáissicas e gnáissicas charnockíticas, apenas as amostras ZM 05 e ZM 07, o material de origem é diferente. Essa uniformidade de resultados não pode ser observada para as amostras MV e SL, devido a variedade litológica dessas duas regiões, possuindo de rochas sedimentares (arenitos e conglomerados), ígneas (gabro) até metamórficas (itabirito).
- A amostra MV 05 é um latossolo ferrífero, com a maior porcentagem de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 40,60% e a menor quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 0,93%, apresentando relação direta com o material de origem que é o itabirito, uma rocha metamórfica com porcentagem grande de ferro e quantidades ínfimas de sílica. Essa grande proporção de ferro e pequena de sílica, influencia diretamente nos índices de intemperização, sendo que para as 33 amostras, os menores valores de  $K_i$  e  $K_r$  é da amostra MV 05. Neste caso os valores do “grau de intemperização” não podem indicar muito bem essa condição de alteração, uma vez que a baixa porcentagem de sílica que está diretamente relacionada com estes índices pode estar associada à natureza da formação geológica da área de ocorrência deste solo.
- Para a amostra MV 07 o material de origem influencia diretamente nos índices de intemperismo,  $K_i$  e  $K_r$ , pois a litologia do local é um metacalcáreo, que é constituído basicamente do mineral calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), não contribuindo para a formação do solo de composição de sílica. Os valores de  $K_i$  e  $K_r$ , são respectivamente, 0,27 e 0,22, muito baixos devido a essa influência.

- Outro exemplo claro cujo material de origem influência nos índices de intemperismo é a amostra MV 09 em que o mapa geológico indicou a presença do Complexo Barbacena com litologia local de gabro, que é uma rocha ígnea que apresenta basicamente os minerais plagioclásios (%anortita > %albita) e piroxênios, sendo este último mineral em maiores proporções.

### V. 3 – Correlações entre a Química e Pedologia

Para a classificação dos latossolos nesse trabalho foram obtidos particularmente os teores de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o coeficiente de alteração química do solo “Ki”, o valor de saturação de bases (V), entre outros, conforme apresentado por OLIVEIRA et al. (1992). A tabela V. 1 mostra, para a nomenclatura tradicional, os parâmetros de percentagens de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e o índice de intemperismo Ki, que identifica cada sub-classe. Dessa forma foi possível enquadrar as amostras estudadas nos diferentes tipos de latossolos.

- O latossolo vermelho-amarelo é classificado desta forma quando a quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estiver entre 7 – 11% e o valor de Ki entre 1,5 – 2,2. Dessa forma 14 amostras foram enquadradas nesta classe de latossolos que são as: ZM 01, 02, 03, 07, 08, 10, 11, 12, 13; MV 01, 06 e SL 05, 07, 08.
- O latossolo vermelho-escuro é classificado desta maneira quando a quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estiver entre 8 – 18% e o valor de Ki entre 1,5 – 2,2. Dessa forma 5 amostras foram enquadradas nesta classe de latossolos que são as: ZM 05, 06, 15; MV 07 e SL 01.
- O latossolo bruno é classificado desta maneira quando a quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  for maior que 15% e o valor de Ki entre 0,2 – 2,2. Dessa forma 5 amostras foram enquadradas nesta classe de latossolos que são as: ZM 09, 14, 16; MV 02 e SL 02.
- O latossolo roxo é designado desta forma quando a quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estiver entre 18 – 40% e o valor de Ki entre 0,2 – 2,0. Dessa forma 3 amostras foram enquadradas nesta classe de latossolos que são as: MV 03, 04 e SL 03.

Em relação aos solos classificados como podzólicos, quando a quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  for inferior a 11%, o podzólico é classificado como vermelho-amarelo (ZM 04 e MV 09) e

quando a quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estiver entre 11 – 15% o podzólico é vermelho escuro (MV 08, SL 04 e SL 06).

Tabela V. 1: Percentagens de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e o índice de intemperismo  $K_i$  para a identificação das subclasses, segundo a nomenclatura tradicional (OLIVEIRA et al., 1992).

<b>SOLO (Quantidade)</b>	<b><math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>K_i</math></b>
Latossolo Vermelho-Amarelo (14)	7 – 11%	< 1,5
Latossolo Vermelho-Escuro (5)	8 – 18%	1,5 – 2,2
Latossolo Bruno (5)	> 15%	0,2 – 2,2
Latossolo Roxo (3)	18 – 40%	0,2 – 2,0
Latossolo Ferrífero (1)	> 36%	-
Podzólico Vermelho-Amarelo (2)	< 11%	-
Podzólico Vermelho-Escuro (3)	< 15%	-

#### **V. 4 – Correlações entre a Pedologia e Geologia**

Verifica-se uma dificuldade muito grande em correlacionar a geologia e a pedologia para os solos desta pesquisa, uma vez que estes são solos muito maduros, ou seja, passaram por um processo de intemperização muito intenso seja físico ou químico (hidrólise e oxidação), sendo estes últimos os mais intensos. A presença de minerais primários no horizonte B ( $B_T$  ou  $B_W$ ) estudado é inexistente, sendo este horizonte constituído por minerais secundários como os argilominerais do grupo da caulinita e os óxidos e hidróxidos de ferro (goetita) e alumínio (gibbsita).

A única correlação notada é para a amostra MV 05 que é classificada como um latossolo ferrífero, sendo sua quantidade de ferro superior a 36%, cujo material de origem é a rocha metamórfica que contém na sua composição química total mais de 40% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Pode-se fazer essa correlação, pois o ferro ( $\text{Fe}^{+3}$ ) é um elemento químico pouco solúvel em água, mesmo após um processo de lixiviação intensa, com isso houve a acumulação e preservação desse elemento no solo.

#### **V. 5 – Correlações entre a Geotecnia e Mineralogia**

As classificações geotécnicas convencionais (HRB e SUCS) não obtiveram resultados satisfatórios em relação aos solos estudados e isso se dá devido a certas

limitações dessas classificações que podem ser divididas em dois tipos, segundo SALOMÃO e ANTUNES, 1998:

- relativas à dispersão dos resultados,
- relativas à correlação entre as propriedades-índice: granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade.

Na Classificação Geotécnica SUCS, por exemplo, que se baseia nos ensaios de granulometria de Limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade), para quase a totalidade das amostras deram resultados de alta plasticidade, não condizendo com o argilomineral (caulinita) predominante presente nas amostras. Muitas amostras classificaram-se como siltosas e no ensaio granulométrico essas amostras mostrou maior porcentagem de argila. Destaca-se que esta classificação condena a possibilidade de utilização desses materiais para pavimentação.

Na Classificação Geotécnica Não-Convencional, segundo a metodologia MCT, que se baseia em ensaios de compactação e perda de massa por imersão, os resultados são satisfatórios, pois das 33 amostras estudadas, apenas 3 amostras (ZM 08, MV 08 e MV 09) não apresentaram comportamento laterítico. A amostra MV 09 possui caulinita como argilomineral predominante, mas possui também a illita, gibbsita e goetitha presente em menores proporções. O restante das 30 amostras que apresentam comportamento laterítico possui caulinita como argilomineral predominante sendo coerente com o termo “comportamento laterítico” (material com alta taxa de lixiviação e com predominância de caulinita).

Não há muito que se discutir nesse item (geotecnia x mineralogia), uma vez que as amostras de solos têm basicamente a mesma mineralogia, tendo a predominância do argilomineral caulinita, não trazendo informações relevantes para o assunto.

## CAPÍTULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi estudar e correlacionar as características químicas, mineralógicas, geológicas, geotécnicas e pedológicas dos solos argilosos de comportamento laterítico de uma região significativa do estado de Minas Gerais.

Como principais conclusões deste estudo apresenta-se:

1. As características geoambientais da região dos pontos de coleta dos solos são:
  - clima: a área de pesquisa se caracteriza por um clima tropical úmido, com variações de temperatura entre 19 e 24°C e precipitação anual entre 1200 e 1500mm.
  - vegetação: as 33 amostras se distribuem em áreas de Floresta Atlântica e Cerrado e Campo Cerrado.
  - geologia: a região da Zona da Mata se caracteriza por conter rochas gnáissicas charnockíticas e as regiões da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes e Sul de Minas se caracterizam pela diversificação litológica.
  - pedologia: A Zona da Mata e Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes há predominância dos latossolos e podzólicos vermelho-amarelos e para região Sul de Minas os latossolos vermelho-escuros.
  - geomorfologia: A Zona da Mata está situada na Unidade Serranias da Zona da Mata Mineira, a região Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes está situada na Unidade Planalto de campo das Vertentes e a região Sul de Minas está localizada nas unidades geomorfológicas, Região da Mantiqueira Meridional e Planaltos do Alto Rio Doce.
2. A geologia das amostras da Zona da Mata se caracterizam por gnaisse, exceto para as amostras ZM 05 e ZM 07 cuja litologia é o granitóide. Para as amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes e Sul de Minas, diferentemente da região da Zona da Mata, a geologia é bastante diversificada contendo rochas sedimentares, metamórficas e ígneas.
3. Em relação à pedologia, nota-se que a região percorrida para a coleta das amostras de solos é rica em latossolos, principalmente em latossolos vermelho-amarelos, sendo 14 amostras identificadas. Das 33 amostras de solos, apenas 5 classificaram-se como

podzólicos, sendo 2 amostras podzólico vermelho-amarelo e 3 amostras vermelho-escuro.

4. A identificação das nomenclaturas tradicional e a nova, proposta pela EMBRAPA (1999), para as variações pedológicas associadas aos latossolos e podzólicos, não apresentaram maiores dificuldades, uma vez que se dispunha de vários parâmetros para caracterização das amostras de solo;
5. Os resultados do complexo sortivo caracterizaram os solos estudados como distróficos, sendo 2 amostras a MV 07 e MV 08 com  $V > 50\%$ , eutróficos. Todas 33 amostras são de atividade de argila baixa ( $T_b < 27 \text{ cmol}_c/\text{Kg}$ ) e possuem valores baixos para o parâmetro “S” (soma das bases trocáveis), indicando estado avançado de alteração.
6. Com os valores obtidos dos “índices de intemperização”,  $K_i$  e  $K_r$ , e o valor do parâmetro “S”, soma das bases trocáveis, nota-se que o conjunto das 33 amostras de solos encontram-se em estado avançado de intemperização.
7. Todos os valores de  $K_i$  e  $K_r$  resultam menores que 2,0, sendo que para a região da Zona da Mata o  $K_i$  mostra valores menores que 1,86, tendo as amostras ZM 06 e ZM 15 os maiores valores, conseqüentemente sendo essas amostras as menos intemperizadas. Para a região da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes foram observados os menores valores para o  $K_i$ , sendo a amostra MV 07 a mais intemperizada das 33 amostras. A região de Sul de Minas apresenta valores de  $K_i$  entre 1,40 e 0,84 e  $K_r$  entre 0,67 e 1,19.
8. O pH do conjunto de amostras varia de moderadamente a fortemente ácido, respectivamente para as amostras MV e ZM, condizente com o processo de latolização.
9. Quanto à constituição mineralógica determinada para a fração argila, identificou-se predominantemente a presença do argilomineral caulinita para todas as amostras, exceto para as amostras MV 07 e MV 08, cujo mineral predominante é o hidróxido de alumínio (gibbsita) e o argilomineral caulinita com presença secundária. Nota-se a ausência do argilomineral 2:1 (ilita) para as 33 amostras, exceto para a MV 09 que possui este argilomineral em pequenas proporções. A gibbsita foi identificada em

maior quantidade para as amostras coletadas na região Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes, assim como em algumas amostras do Sul de Minas.

10. Os solos estudados apresentaram predominância na fração granulométrica argila, apenas para as amostras MV05 e SL 01 a fração granulométrica predominante é areia, sendo esta última mais arenosa. Estas amostras foram incluídas no programa de coleta pelo fato da primeira pertencer à classe dos Latossolos Ferríferos, o que despertou interesse no estudo desta variação pedológica, e a segunda por, de certa forma, representar um material de formação geológica da bacia do Rio Paraná, coletado junto à divisa do estado de São Paulo, tão estudado e utilizado em obras de pavimentação naquele estado, com resultados muito satisfatórios.
11. Quanto a granulometria, verificou-se para o conjunto de amostras da Zona da Mata e Sul de Minas uniformidade de resultados, principalmente entre as amostras da Zona da Mata e para a região da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes os resultados granulométricos apresentaram-se bastante diferenciados.
12. No Sistema Unificado de Classificação de Solos, as amostras se enquadraram nas classes “MH” – silte com alta plasticidade e “CH” – argila com alta plasticidade, o que não se mostrou adequado para parte das amostras utilizadas, que não tem silte como fração predominante. No sistema TRB as amostras se enquadraram predominantemente nas classes A-7-5 e A-7-6, ou seja, solos argilosos, exceto para as amostras MV 05 cuja classe é A-4, solos siltosos e SL 01 cuja classe é A-2-6, solos areno- siltosos ou areno-argilosos.
13. No que se refere à Classificação MCT dos solos, pode-se notar que os 33 solos pesquisados apresentaram-se predominantemente de comportamento laterítico argiloso, tendo 9 amostras se aproximado da fronteira estabelecida para o comportamento não laterítico, sendo 3 classificadas como NG’. Duas amostras apresentaram comportamento laterítico arenoso (LA’).
14. As amostras MV 05, MV 07 e MV 09 mostram que os parâmetros de intemperismo  $K_i$  e  $K_r$  não podem indicar muito bem a condição de alteração do material, uma vez que a baixa percentagem de sílica obtida para as amostras está diretamente relacionada à natureza da formação geológica da área de ocorrência destes solos. Isto

pode sugerir que os valores de  $K_i$  e  $K_r$  podem não somente expressar o grau de intemperismo destes solos e sim a gênese.

15. A nomenclatura da amostra MV 05, que é um latossolo ferrífero, está diretamente relacionada com o material de origem do solo, que é um itabirito, uma rocha metamórfica rica em  $Fe_2O_3$ .
16. De forma geral, os solos da Zona da Mata, assim como os coletados no Sul de Minas, estes em menor evidência, apresentaram uma certa uniformidade para os resultados no que se refere à geologia, pedologia, química, mineralogia e características de ordem geotécnica.
17. As amostras da Zona Metalúrgica e Campo das Vertentes, que apresentam algumas condições diferentes das outras duas regiões estudadas, apresentaram resultados bem diversificados para as características estudadas como: pedologia, química, mineralogia e geotecnia.

## **CONCLUSÕES e SUGESTÕES**

Constatou-se que as classificações geotécnicas convencionais, HRB e SUCS, caracterizaram os solos coletados como insatisfatórios para uso em pavimentos. A classificação não-convencional, MCT, mostrou que esses materiais possuem comportamento laterítico, dessa forma, podendo ser utilizado em alguns pavimentos típicos, ou seja, em pavimentos alternativos em condições de baixo tráfego.

Dessa forma, conclui-se que as classificações geotécnicas, convencionais e não-convencionais, apresentam uma certa discrepância nas classificações de solos.

Os estudos químicos, mineralógicos, pedológicos mostram que os solos estudados são extremamente lixiviados, enquadra-se no processo de monossilicização com certa interfície da alitização e encontram-se na forma dos solos da latolização. Sendo assim, conclui-se que esses solos apresentam baixa atividade e inexpressiva variação volumétrica. Dessa forma, pode-se prever que esses materiais merecem ser estudados para fins de pavimentação.

Com base nessas observações pode-se observar que no caso dos solos estudados a classificação MCT é a mais apropriada para os estados de solos para fins de pavimentos.

As classificações pedológicas e as análises mineralógicas podem ser consideradas como bons indicativos para estudos de pavimentos.

Sugere-se dar continuidade a esta pesquisa priorizando essas correlações de características com outras unidades de solos pedológicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, F. C. S., 1993, *Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais: Avaliação e Adequação*. Dissertação de Mestrado ESALQ/USP. Piracicaba/SP
- ASTM - AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1990, “Annual book of ASTM standards”. Section 4: Construction, v. 04.08: Soil and rock: dimension stone: geosynthetics. Philadelphia.
- BRINDLEY, G. W. E BROWN, G., 1980, Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification.
- BUCKMAN, H. O. E BRADY, N. C., 1960, *Nature and properties of soil*. 6. ed. New York: McMillan. 567p.
- CASAGRANDE, A., 1948, Classification and identification of soils. *Amer. Soc. Civil Eng.*, v.113, 235 L, p. 901 – 991.
- CHAVES, F. J., 2000, *Caracterização Geotécnica de Solos da Formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação em Obras Rodoviárias*. Dissertação de Mestrado. PEC. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.
- COMIG, 2002, *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais*. Mídia CD-Room. Companhia Mineradora de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.
- DER, 2001, *Mapa Rodoviário do Estado de Minas Gerais*. Mídia CDRoom. Departamento Estadual de Estradas e Rodagem de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.
- DNER/MT, 1994, “Métodos de Ensaio”. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem/MT, Rio de Janeiro.
- DNER, 1994a, ME 228/94 - Solos: Compactação em Equipamento Miniatura; ME 256/94 - Solos Compactados em Equipamento Miniatura: Determinação da Perda de Massa por Imersão e ME 258/94 - Solos Compactados em Equipamento Miniatura - Mini-MCV. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro/RJ.
- DNER, 1996, *Manual de Pavimentação*. 2<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Ministério dos Transportes.

- DNPM, 1983, Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. Vol. 32 - Folhas 23/24 - Rio de Janeiro-Vitória: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra. Departamento Nacional de Produção Mineral. Rio de Janeiro. 566p. (Levantamento de Recursos Naturais,17).
- EMBRAPA, 1980b, *Estudo Expedido de Solos da Região Sul de Minas, partes do Alto São Francisco e Campos das Vertentes para fins de classificação, correlação e legenda preliminar*. BT 72. S. N. L. C. S. Empresa Brasileira de Agropecuária. Rio de Janeiro/RJ.
- EMBRAPA, 1999, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. CNPS. Serviço de Produção de Informação. Empresa Brasileira de Agropecuária. Brasília/DF.
- IBGE, 2002, [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) , em 11/07/02.
- IGA/CETEC, 1994, *Mapa Geopolítico de Minas Gerais*. Instituto de Geociências Aplicadas/Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.
- MARANGON, M., 2004, *Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais utilizando Solos Lateríticos locais a partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência*. Dissertação de Doutorado. COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR D. F. , 1980, “Caracterização e Classificação Geral de Solos para Pavimentação: Limitações dos Métodos Tradicionais, Apresentação de uma Nova Sistemática”. In: *15ª Reunião Anual de Pavimentação*. Anais. ABPv. Belo Horizonte/MG.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR D. F. , 1981, “Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias”. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*. COPPE/UFRJ. CNPq. ABMS. Rio de Janeiro/RJ.
- NOGAMI, J. S. et al, 1985, *Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils – Progress Report*. Committee on Tropical Soils of the ISSMFE. Theme 1, Topic 1.1. Preliminary Remarks. ABMS.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR D. F. , 1995, *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Editora Villibor. São Paulo/SP.

- OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T. e CAMARGO, M. N. , 1992, *Classes Gerais de Solos do Brasil Guia Auxiliar para seu Reconhecimento*. FUNEP. Jaboticabal/SP.
- PASTORE, E. L. e FONTES R. M., 1998, *Solos*. In: Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE. São Paulo/SP.
- PARSONS, A. W. , 1976, *The Rapid Measurement of the Moisture Condition of Earthwork Material*. LR 750. Road Research Laboratory. Crowthorne. UK.
- POLIVANOV, H., 1984, *Correlações entre Parâmetros Químicos-Mineralógicos e Geotécnicos de Latossolos*. Dissertação de Mestrado. IGEO. Instituto de Geologia. UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.
- POLIVANOV, H. , 2000, *Pedologia Aplicada. Curso Oferecido ao Programa de Pós-Graduação em Geologia*. IGEO/UFRJ. 2000/1. Notas de Aula.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. e CORRÊA, G. F. , 1999, *Pedologia: Base para Distinção de Ambientes*. NUPET/UFV. Viçosa/MG.
- SALOMÃO, F. X. T. e ANTUNES, F. S., 1998, *Solos*. In: Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE. São Paulo/SP.
- SEA, 1980, Atlas de Zoneamento Agroclimático do Estado de Minas Gerais. Secretaria de Estado de Agricultura. Belo Horizonte/MG.