ELIANA FERNANDES DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES
SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS
APLICADAS AOS SOLOS TROPICAIS**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil:
Transportes

Orientador: Prof. Assoc. ALEXANDRE BENETTI PARREIRA

São Carlos

2006

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre Benetti Parreira pela orientação e pelo apoio na realização deste trabalho.

À CAPES, agência financiadora, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Departamento de Transportes, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Aos técnicos do laboratório de estradas de EESC, Gigante, Paulo e João pelo auxílio e presteza.

Ao Prof. Dr. Orencio Monje Vilar e ao Sr. José Luis pela atenção e pela disponibilidade do laboratório de solos do Departamento de Geotecnia.

À Prof^a. Dra. Liedi Bariani Bernucci e ao Sr. Edson Moura pela atenção e pela permissão para a utilização do laboratório de estradas da Escola Politécnica da USP.

Aos pesquisadores Marcelo Takeda e Hélio Marcos Viana que muito cooperaram para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do Departamento de Transportes pelo convívio construtivo, em especial a Shirley, Vivian, Antonio, Rogério, Rodrigo, Leonardo, Idalíria e João pela compreensão e companheirismo.

Aos meus pais, Manuel e Helena, pelo incentivo, apoio e carinho.

Ao pessoal de "Maringá" pela força, em especial aos meus irmãos Giseli e Rogério.

Ao Tobias, presença constante em todos os momentos de concentração.

Ao meu esposo Cláudio, por todo o carinho, apoio, incentivo e pela presença imprescindível no decorrer deste trabalho, Obrigada.

A Deus por fazer com que todas estas graças operassem em minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 IMPORTÂNCIA DAS CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS	6
2.2 CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS TRADICIONAIS	7
2.2.1 SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (USCS)	7
2.2.2 CLASSIFICAÇÃO HRB (HIGHWAY RESEARCH BOARD)	11
2.3 CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DOS SOLOS (DNER, 1996)	15
2.4 SOLOS TROPICAIS E SUAS PECULIARIDADES	19
2.5 ALGUMAS LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO DAS CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS TRADICIONAIS NA IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS TROPICIAIS	22
2.6 CLASSIFICAÇÕES DESENVOLVIDAS PARA SOLOS TROPICAIS	24
2.6.1 O SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO MCT	24
2.6.2 O MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS	28
2.6.2.1 O MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS (NOGAMI & VILLIBOR, 1994B)	28
2.6.2.2 O MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS (GODOY & BERNUCCI, 2002)	29
2.6.3 O ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA (FABBRI, 1994)	31
2.7 PERMEABILIDADE DOS SOLOS	33
2.7.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PERMEABILIDADE DOS SOLOS	34
2.7.1.1 FLUIDO FILTRANTE	35
2.7.1.2 SOLO	37

3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	41
3.2	ESCOLHA DOS SOLOS	41
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	44
3.4	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	45
3.5	CLASSIFICAÇÃO MCT	45
3.6	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	45
3.7	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	46
3.8	ENSAIOS DE SUCÇÃO	47
3.9	MÉTODO DAS PASTILHAS (NOGAMI & VILLIBOR, 1994B)	47
3.10	MÉTODO DAS PASTILHAS (GODOY & BERNUCCI, 2002)	49
3.11	O ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO (FABBRI, 1994)	51
3.12	PERMEABILIDADE DOS SOLOS	53
3.12.1	COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	53
3.12.2	ENSAIO DE PERMEABILIDADE	54
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	56
4.2	RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO MCT	57
4.3	ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	61
4.4	ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	67
4.5	ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO	70
4.6	MÉTODO DAS PASTILHAS (NOGAMI & VILLIBOR, 1994B)	75
4.7	MÉTODO DAS PASTILHAS (GODOY & BERNUCCI, 2002)	80
4.8	CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DOS SOLOS	84
4.9	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	88
4.10	ANÁLISE DA SUCÇÃO DOS SOLOS	90
5	CONCLUSÕES	92
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	92
5.2	CONCLUSÕES	92
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO A		100
ANEXO B		101
ANEXO C		102
ANEXO D		103
ANEXO E		104
ANEXO F		105
ANEXO G		106
ANEXO H		107

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - GRÁFICO DE PLASTICIDADE (ASTM, 1990) _____	11
FIGURA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DE SOLOS GRANULARES (DNER, 1996) _____	17
FIGURA 2.3 - GRÁFICO DE CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DOS SOLOS FINOS (DNER, 1996) _____	19
FIGURA 2.4 - FOTOGRAFIAS MICROSCÓPICAS DE UM SOLO LATERÍTICO (TAKEDA, 2005) _____	20
FIGURA 2.5 - DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS LATERÍTICOS EM TERMOS MUNDIAIS (CHARMAN, 1988) ____	21
FIGURA 2.6 - DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS LATERÍTICOS NO BRASIL (BERNUCCI, 1995) _____	22
FIGURA 2.7 - GRÁFICO DE CLASSIFICAÇÃO MCT (NOGAMI & VILLIBOR, 1994) _____	26
FIGURA 2.8 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO MCT-M (VERTAMATTI, 1988) _____	27
FIGURA 2.9 - GRÁFICO DE CLASSIFICAÇÃO MCT PELO MÉTODO DAS PASTILHAS (NOGAMI, 1996) _____	29
FIGURA 2.10 - ÁBACO PARA CARACTERIZAÇÃO DO GRAU DE ATIVIDADE DA FRAÇÃO ARGILA DOS SOLOS (FABBRI, 1994) _____	33
FIGURA 2.11 - INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE VAZIOS NO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (LAMBE & WHITMAN, 1969) _____	38
FIGURA 3.1 - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS LOCAIS DE COLETA DAS 91 AMOSTRAS DE SOLOS NO ESTADO DE SÃO PAULO (TAKEDA, 2005) _____	42
FIGURA 3.2 - MINIPENETRÔMETRO PARA A DETERMINAÇÃO DAS LEITURAS DE PENETRAÇÃO E DETALHE DA AGULHA E ANÊSI UTILIZADOS PARA A MOLDAGEM DAS PASTILHAS _____	48
FIGURA 3.3 - CONTRAÇÃO E EXPANSÃO DAS PASTILHAS APÓS SECAGEM E ABSORÇÃO DE ÁGUA RESPECTIVAMENTE, DESTACANDO O COMPORTAMENTO DE 3 SOLOS DISTINTOS ____	49
FIGURA 3.4 - MINIPENETRÔMETRO UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DAS MEDIDAS DE UMIDADE DE MOLDAGEM E DE PENETRAÇÃO E DETALHE DO CONJUNTO DE CONES QUE COMPÕEM O EQUIPAMENTO _____	50
FIGURA 3.5 - A) EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DO CONE DE 60G ACOPLADO AO MINIPENETRÔMETRO PARA A DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE MOLDAGEM DE UMA AMOSTRA DE SOLO. B) DETALHE DO CONE _____	50

FIGURA 3.6 - EXEMPLO DE CONTRAÇÃO E EXPANSÃO DE DOIS SOLOS QUE APRESENTARAM COMPORTAMENTOS DISTINTOS_____	51
FIGURA 3.7 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE AZUL DE METILENO _____	52
FIGURA 3.8 - EXEMPLO DO PONTO DE VIRAGEM DE UMA AMOSTRA DE SOLO_____	53
FIGURA 3.9 - MODELO DO ARRANJO DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE _____	55
FIGURA 3.10 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE_	55
FIGURA 4.1 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO MCT COM INDICAÇÃO DOS SETENTA E TRÊS SOLOS COLETADOS _____	57
FIGURA 4.2 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO MCT COM INDICAÇÃO DOS TRINTA E OITO SOLOS UTILIZADOS NESTA PESQUISA _____	58
FIGURA 4.3 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO MCT COM INDICAÇÃO DOS TRINTA E OITO SOLOS COM SUA NOVA DESIGNAÇÃO _____	59
FIGURA 4.4 - GRÁFICO DE CLASSIFICAÇÃO MCT-M COM INDICAÇÃO DOS TRINTA E OITO SOLOS ESTUDADOS _____	60
FIGURA 4.5 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE SOLOS QUE APRESENTAM COMPORTAMENTO LATERÍTICO _____	63
FIGURA 4.6 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE SOLOS QUE APRESENTAM COMPORTAMENTO NÃO LATERÍTICO _____	64
FIGURA 4.7 - SOBREPOSIÇÃO DOS GRÁFICOS DE CLASSIFICAÇÃO MCT E MCT-M DESTACANDO A AMOSTRA QUE APRESENTOU DIVERGÊNCIA ENTRE AS INDICAÇÕES DE MEV E A CLASSIFICAÇÃO MCT _____	66
FIGURA 4.8 - MICROFOTOGRAFIA DA AMOSTRA 23N, AUMENTO DE 3000 E 10000x _____	67
FIGURA 4.9 - ÁBACO PARA CARACTERIZAÇÃO DA FRAÇÃO ARGILA DOS SOLOS _____	74
FIGURA 4.10 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DAS PASTILHAS (NOGAMI & VILIBOR, 1994B) COM A DISTRIBUIÇÃO DAS 38 AMOSTRAS ESTUDADAS _____	77
FIGURA 4.11 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DAS PASTILHAS DESTACANDO AS AMOSTRAS QUE APRESENTARAM DIVERGÊNCIAS COM A MCT _____	79
FIGURA 4.12 - GRÁFICO DE CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE PARA SOLOS FINOS COM AS CURVAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS _____	87
FIGURA 4.13 - EXEMPLO DA NÃO RELAÇÃO ENTRE K E O TEOR DE ARGILA DOS MATERIAIS ESTUDADOS _____	90
FIGURA 4.14 - EFEITO DA GRANULOMETRIA NA SUÇÃO _____	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS SEGUNDO A USCS (ASTM, 1990) _____	9
TABELA 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS SEGUNDO A HRB (DNER, 1996) _____	13
TABELA 2.3 - CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DOS SOLOS FINOS PELO MÉTODO INDIRETO (DNER, 1996) _____	19
TABELA 2.4 - GUIA IDENTIFICATÓRIO DE SOLOS TROPICAIS (GODOY & BERNUCCI, 2002) _____	30
TABELA 2.5 - GRAU DE PERMEABILIDADE DOS SOLOS SEGUNDO SEUS VALORES DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (LAMBE & WHITMAN, 1969) _____	35
TABELA 3.1 - SOLOS ESTUDADOS NESTA PESQUISA E SEU COMPORTAMENTO (LATERÍTICO / NÃO LATERÍTICO) SEGUNDO A MCT _____	44
TABELA 4.1 - INDICAÇÃO DA NOMENCLATURA DOS 38 SOLOS SELECIONADOS (TAKEDA, 2005) _____	58
TABELA 4.2 - DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS NAS CLASSES MCT _____	59
TABELA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS NAS CLASSES MCT-M E MCT _____	61
TABELA 4.4 - RESULTADOS DAS ANÁLISES REALIZADAS A PARTIR DE IMAGENS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE MEV _____	65
TABELA 4.5 - CONCORDÂNCIAS E DISCORDÂNCIAS OBSERVADAS NA COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MEV E A METODOLOGIA MCT _____	65
TABELA 4.6 - MINERAIS ENCONTRADOS NAS AMOSTRAS DE SOLOS SELECIONADAS E A CARACTERÍSTICA DETERMINADA PELA CONSTITUIÇÃO DOS SOLOS _____	69
TABELA 4.7 - RELAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DOS ENSAIOS DE DRX, MCT E MEV _____	70
TABELA 4.8 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE AZUL DE METILENO COM INDICAÇÃO DA ATIVIDADE DOS ARGILOMINERAIS E SEU COMPORTAMENTO _____	71
TABELA 4.9 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE AZUL DE METILENO, MEV, DRX E MCT _____	73
TABELA 4.10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PASTILHAS SEGUNDO O MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR (1994B) _____	76
TABELA 4.11 - CONCORDÂNCIA ENTRE OS RESULTADOS DAS PASTILHAS E A MCT _____	78
TABELA 4.12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PASTILHAS SEGUNDO O MÉTODO DE GODOY & BERNUCCI (2002) _____	82
TABELA 4.13 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CLASSIFICAÇÕES SEGUNDO O MÉTODO DAS PASTILHAS DE GODOY & BERNUCCI (2002) E A MCT _____	84

TABELA 4.14 - CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DOS SOLOS	85
TABELA 4.15 - RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO MCT E DA CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE	85
TABELA 4.16 - PARÂMETROS DE RESILIÊNCIA (TAKEDA, 2005)	87
TABELA 4.17 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DOS SOLOS ESTUDADOS E SEUS RESPECTIVOS LOGARITMOS	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Coeficiente de Atividade
CBR	Índice de Suporte Califórnia
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios-x
HRB	<i>Highway Research Board</i>
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MCV	<i>Moisture Condition Value</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
VA	Valor de Azul

LISTA DE SÍMBOLOS

IG	Índice de grupo
IP	Índice de Plasticidade
K	Coeficiente de Permeabilidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
M_R	Módulo de Resiliência
W_o	Umidade ótima
$\gamma_{dm\acute{a}x.}$	Massa Específica Seca Máxima

RESUMO

SANTOS, ELIANA FERNANDES DOS (2006). *Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais*. São Carlos, 2006. – Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Neste trabalho apresenta-se um estudo comparativo de sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. Para 38 solos do interior paulista foram realizados ensaios de classificação/identificação pelo Método das Pastilhas segundo os procedimentos de Nogami e Villibor (1994b) e Godoy e Bernucci (2002) e ensaios de Azul de Metileno (Fabbri, 1994). Além disso, foram executados ensaios de permeabilidade buscando-se relações entre esta variável e o comportamento (laterítico/ não laterítico) dos solos e suas características físicas. Também foram analisados resultados de ensaios de sucção na umidade ótima, obtidos por Takeda (2005). Inicialmente foram analisados resultados dos ensaios de Difração de Raios-X, Microscopia Eletrônica de Varredura e da Classificação MCT, todos obtidos por Takeda (2005), onde foi constatada uma coincidência entre a gênese dos solos e seu comportamento (laterítico/ não laterítico). A partir desta constatação, foram confrontados os resultados obtidos através do método das pastilhas, segundo os dois procedimentos destacados acima, e dos ensaios de Azul de Metileno com a Classificação MCT. Nesta etapa, foi verificada uma concordância de 81,6% entre o método das pastilhas de Nogami e Villibor (1994b) e a MCT. Os resultados dos Ensaio de Azul de Metileno (Fabbri, 1994) concordaram com a MCT em 92,1%. Com relação ao Método das Pastilhas de Godoy e Bernucci (2002), observou-se que este procedimento necessita de revisões. Os coeficientes de permeabilidade não revelaram uma relação clara com o comportamento laterítico ou não laterítico dos materiais. Também não foi observada uma relação entre este coeficiente e características físicas dos solos, quando tomadas isoladamente. Os valores de sucção mostraram que os solos com maiores teores de argila apresentam maiores valores de sucção. Também se observou que para iguais teores de argila, solos de comportamento laterítico apresentaram sucções menores que os solos de comportamento não laterítico.

Palavras-chave: classificação do solo; solos tropicais, laterítico.

ABSTRACT

SANTOS, ELIANA FERNANDES DOS (2006). *Comparative study of different tropical soils geotechnical classification systems*. São Carlos, 2006. – Master's Dissertation. EESC, USP.

This work presents a comparative study of different tropical soils geotechnical classification systems. Classification/identification tests of Tablet Method as proposed by Nogami and Villibor (1994b) and Godoy and Bernucci (2002) and Methylene Blue Adsorption Tests (Fabbri, 1994) were done for 38 soil samples of São Paulo State countryside, in Brazil. Furthermore, Hydraulic Conductivity tests were performed in intent of search relations between this variable and the soil behavior (lateritic/non lateritic), and its physical characteristics. Suctions results (Takeda, 2005) on optimum water content, also were analyzed. Initially XRD and SEM test's results, and MCT classification's results, obtained from Takeda (2005), were analyzed, where a coincidence between soil genesis and its behavior (lateritic/non lateritic) was observed. At this point, the Methylene Blue Adsorption Test and Tablet Method's results were compared with the ones obtained from MCT classification. At this time, Tablet Method as proposed by Nogami e Villibor (1994b) and MCT classification presented a 81.6 % of agreement rate. Methylene Blue Adsorption showed a agreement rate of 92.1% with the MCT classification. The Tablet Method proposed by Godoy e Bernucci (2002) seemed to need some revision. The hydraulic conductivity values didn't show any clear relationship with the soil's lateritic/non lateritic behavior. A relation between the hydraulic conductivity and the physical characteristics wasn't observed, when these last ones was correlated, one by one, with the hydraulic conductivity. The Suction Values showed that the most clay content leads to higher suctions values. Lateritic Soils with less clay content showed lower suctions values then Non Lateritic Soils with the same clay content.

Key words: soil classification; tropical soil, lateritic.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

É imprescindível conhecer as propriedades dos materiais geotécnicos envolvidos na implantação de uma estrada, no tocante ao sub-solo de fundação e aos materiais de empréstimo que serão utilizados na construção de aterros e de camadas do pavimento. Portanto, esses materiais devem ter suas propriedades estudadas e avaliadas em relação à resistência, deformabilidade e permeabilidade, tanto no seu estado natural quanto em seu estado compactado.

As rodovias desenvolvem-se ao longo de grandes distâncias e, muitas vezes atravessam regiões que apresentam diferentes constituições geotécnicas. Logo, toda essa variabilidade, acaba dificultando a utilização de ensaios laboratoriais para a determinação das propriedades dos solos constituintes de cada perfil. Assim, defronta-se com a necessidade de obter-se os parâmetros necessários à identificação dos solos e seu comportamento a partir de ensaios mais simples, quando comparados aos ensaios convencionais utilizados na avaliação da resistência, deformabilidade e permeabilidade.

Com este intuito, foram criadas as classificações geotécnicas, que permitem agrupar os diferentes materiais segundo categorias que têm características comuns relacionadas ao comportamento geotécnico.

Dentre as classificações geotécnicas mais difundidas, destacam-se o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (USCS – *Unified Soil Classification System*) e a classificação para fins rodoviários HRB (*Highway Research Board*). Estas classificações, desenvolvidas em países de clima temperado e baseada na distribuição granulométrica e nos limites de

Atterberg (LL e LP), são denominadas classificações tradicionais. Porém, estas classificações apresentam limitações quando utilizadas para a previsão de propriedades dos solos tropicais.

Algumas destas limitações ocorrem principalmente devido às diferenças existentes entre a natureza da fração de argila e de areia de solos de regiões tropicais e de regiões temperadas. Estas limitações podem ser observadas na falta de correlação existente entre os resultados de ensaios tradicionais de classificação de alguns solos tropicais e o seu comportamento geotécnico (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Segundo NOGAMI & VILLIBOR (1981), os métodos tradicionais de classificação de solos desenvolvidos no exterior não têm sido satisfatórios quando aplicados aos solos tropicais, pois, com freqüência as recomendações neles baseados não coincidem com o comportamento de muitos de nossos solos nas rodovias.

Devido às limitações e deficiências existentes na utilização das classificações tradicionais para solos tropicais e com o objetivo de diferenciar este tipo de solo dos demais, no início da década de 80, Nogami e Villibor desenvolveram uma classificação denominada MCT (Miniatura, Compactada, Tropical), específica para solos tropicais. Esta classificação não se baseia nas propriedades índices como as classificações tradicionais.

A MCT é considerada uma sistemática de caracterização e classificação de solos tropicais. Essa classificação é baseada em ensaios de laboratório, como compactação e imersão em água, a partir de corpos de prova compactados e de dimensões reduzidas tais, que representam, de certa forma, as situações a que os solos são submetidos quando compactados e utilizados em obras viárias.

A metodologia MCT permite classificar os solos quanto ao seu comportamento, quando compactado, como solo laterítico ou solo não laterítico. Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos lateríticos, no sentido pedológico, são caracterizados por serem uma variação de solos superficiais pedogenéticos, típicos de partes bem drenadas de regiões tropicais úmidas.

Os solos de comportamento laterítico, quando compactados em condições específicas previamente determinadas, adquirem altas resistências e uma excelente capacidade de suporte apresentando pequena perda dessa capacidade quando imersos em água (GODOY, 1997). Estes solos podem possuir variedades plásticas contrácteis, porém, são pouco expansivos.

Portanto, a distinção deste tipo de solo é de fundamental interesse no meio geotécnico, uma vez que os solos de comportamento laterítico constituem uma preciosa fonte de matéria prima em obras de terra e pavimentação, podendo ser utilizados em aterros, proteção de taludes contra erosão, estruturas de pavimentos como reforços de subleito, sub-bases e bases (BERNUCCI & GODOY, 2002).

Com a finalidade de estudar e aprimorar técnicas adequadas, expeditas e aplicáveis à identificação e caracterização de solos tropicais, Nogami e Cozzolino (1985), propuseram inicialmente, dentro da classificação MCT, um procedimento expedito designado de "Ensaio Expedito das Pastilhas".

Conforme Bernucci (1995), o Método das Pastilhas baseia-se nas características de contração, expansão e resistência após a reabsorção de água de pastilhas de solo moldadas, permitindo assim identificar os grupos da classificação MCT com maior rapidez.

Esse método tem sofrido modificações no decorrer dos últimos anos, destacando-se entre os trabalhos realizados Nogami e Villibor (1994b) e Godoy e Bernucci (2002), possibilitando assim, uma hierarquização preliminar dos solos no que se refere à aplicação nas obras de pavimentação.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a análise comparativa de diferentes métodos de classificação de solos tropicais aplicados a solos do interior paulista. Complementarmente, serão confrontadas características físicas e propriedades mecânicas de solos lateríticos e não lateríticos.

Esta pesquisa é parte de um projeto mais amplo, do qual ainda fazem parte dois trabalhos de doutorado e um trabalho de mestrado em andamento na Escola de Engenharia de São Carlos. Nestes trabalhos já foram realizados

ensaios de classificação pela metodologia MCT e pelas classificações tradicionais USCS e HRB, ensaios de caracterização, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios x, ensaios de sucção e ensaios de compressão simples e triaxiais convencionais e cíclicos.

A pesquisa está dividida em duas etapas, sendo que na primeira etapa, 38 solos do interior do estado de São Paulo, foram caracterizados através do ensaio de adsorção de azul de metileno (Fabbri, 1994), e também através do Método Expedito das Pastilhas segundo dois procedimentos: Nogami e Villibor (1994b) e Godoy e Bernucci (2002). Também será realizada a identificação dos solos através da classificação resiliente pelo método do DNER. O objetivo desta primeira etapa será verificar a compatibilidade entre os diferentes procedimentos de classificação/ identificação dos solos.

Na segunda etapa do trabalho serão realizados ensaios de permeabilidade à carga variável dos solos classificados anteriormente, com a finalidade de complementar o estudo de suas características e verificar uma possível relação entre algumas características físicas dos solos e seu comportamento (laterítico ou não laterítico). Nesta etapa também serão analisados resultados de sucção, buscando-se relações entre esta variável e a gênese e as características dos materiais estudados.

1.3 Organização do trabalho

Este texto foi elaborado em forma de dissertação de mestrado, estando dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo é a presente introdução e os demais foram organizados da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, destacando-se os aspectos mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. São abordadas as classificações de solos mais utilizadas na área da engenharia de pavimentação além dos principais problemas encontrados pelos profissionais da área da engenharia quanto à utilização das classificações tradicionais em solos tropicais. Ressalta-se neste capítulo a importância das classificações geotécnicas e da utilização dos solos lateríticos como material de construção em bases, sub-bases e subleitos de pavimentos.

O capítulo 3 descreve os critérios de escolha, a origem e a caracterização dos materiais estudados. Neste capítulo também é relatado o método experimental utilizado na pesquisa.

No quarto capítulo são apresentados e confrontados os resultados dos ensaios de classificação aplicados aos solos tropicais. Neste capítulo também são analisadas e discutidas características físicas e propriedades mecânicas destes solos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões desta pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros, considerando-se os aspectos relevantes verificados durante o desenvolvimento do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância das Classificações Geotécnicas

Freqüentemente, os solos têm sido utilizados como material de construção de rodovias constituindo algumas de suas camadas (base, sub base e reforço do subleito), além de constituírem aterros, barragens e estruturas de contenção. No entanto, para que isto seja possível, é essencial que o engenheiro conheça as propriedades geotécnicas dos solos envolvidos na construção de obras de terra e pavimentação.

Na elaboração de um projeto de pavimento, é necessário que o projetista recorra a uma série de ensaios que possam caracterizar os solos, de forma que identifique suas características de comportamento geotécnico. Porém, dependendo da quantidade e da complexidade dos ensaios a serem realizados, a obra pode vir a se tornar excessivamente onerosa. Desta forma, uma maneira de resolver o problema, seria recorrer a uma classificação, que possa ser realizada através de ensaios menos complexos que forneçam os parâmetros necessários à previsão do comportamento do solo que irá compor o futuro pavimento.

Segundo Sória (1985), para que uma classificação de solos seja apropriada à engenharia, ela deve agrupar solos de comportamentos semelhantes para que quando se tenha um grande número de amostras, sejam ensaiadas apenas algumas que representem todos os solos que possuam o mesmo índice classificatório. A classificação também deve permitir que, através da classe do solo, o engenheiro possa correlacionar comportamento do material em questão com o de outros solos já conhecidos podendo, desta maneira, prever o comportamento do solo na obra.

Os cálculos de um projeto de engenharia envolvendo solos serão baseados nas propriedades específicas da classe a que pertence o solo. Da perfeição com que for realizada tanto a identificação como a classificação do material dependerá todo o processo do trabalho posterior. Assim, antes de tudo, quando o engenheiro enfrenta um problema de solos, procederá a sua identificação e conseqüente classificação (VARGAS, 1977).

Em resumo, pode se dizer que as classificações geotécnicas são muito importantes, pois agrupam solos de comportamento similar, permitem prever ou estimar o comportamento dos solos, e facilitam a comunicação entre engenheiros e técnicos.

2.2 Classificações Geotécnicas Tradicionais

As classificações denominadas tradicionais, desenvolvidas em países de clima temperado, são essencialmente baseadas nas propriedades índices (limites de Atterberg) e na composição granulométrica dos solos.

As classificações mais difundidas no Brasil são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (Unified Soil Classification System - USCS), descrito pela norma americana D2488-69 (ASTM, 1980), e a classificação para finalidades rodoviárias da AASHTO, a Highway Research Board (HRB), descrito pela norma, também americana, D3282-73 (ASTM, 1973).

2.2.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS)

Essa classificação apresentada por Arthur Casagrande, na década de 40, visava classificar os solos com o propósito de utilizá-los na construção de aeroportos. Foi depois adotada pelo U.S. Corps of Engineers que lhe deu o nome e a divulgou.

O Sistema Unificado de Classificação de Solos – USCS possui como parâmetros para a determinação da classificação dos solos a granulometria e os limites de Atterberg (LL e IP), além da presença de matéria orgânica. Os solos são reunidos em quinze grupos distintos representados por duas letras, sendo que a primeira é relativa a granulometria e a segunda à plasticidade.

A USCS apresenta uma tabela de classificação (**Tabela 2.1**) onde se identificam três principais divisões de solos: solos de granulometria grossa, solos de granulometria fina e solos altamente orgânicos.

Conforme esta classificação, solos de granulometria grossa, ou seja, com mais de 50% em massa de solo retido na peneira n^o 200 são representados pelos grupos:

Grupos GW e SW: Estes grupos compreendem solos pedregulhosos e arenosos bem graduados que contém menos de 5% de finos não plásticos passantes na peneira n^o 200. Os finos encontrados neste material não interferem nas características de resistência da fração grosseira e nas características de livre drenagem desta fração;

Grupos GP e SP: Estes grupos compreendem solos pedregulhosos e arenosos mal graduados que contém menos de 5% de finos não plásticos passantes na peneira n^o 200. Estes solos podem ser constituídos de pedregulhos uniformes, areias uniformes ou misturas não uniformes de material muito grosseiro e areia muito fina com vazios de tamanhos intermediários;

Grupo GM e SM: Normalmente estes grupos incluem pedregulhos ou areias que contém mais de 12% de finos com pouca ou nenhuma plasticidade. A graduação não é relevante e tanto materiais bem ou mal graduados podem estar incluídos nestes grupos;

Grupos GC e SC: Estes grupos compreendem solos pedregulhosos ou arenosos com mais de 12% de finos que exibem tanto baixa quanto alta plasticidade. A graduação não é relevante, porém sua fração fina normalmente é constituída por argilas que exercem maior influência sobre o comportamento do solo.

Tabela 2.1 - Classificação de solos segundo a U.S.C.S. (ASTM, 1990)

Critérios para Estabelecer Símbolos de Grupos e Nomes de Grupos Usando Ensaio de Laboratório ^A				Classificação do Solo	
				Grupo	Nome do Grupo ^B
Solos de granulometria grossa mais de 50 % do solo retido na peneira nº 200	Pedregulhos mais que 50% da fração grossa	Pedregulhos limpos	$Cu \geq 4$ e $1 \leq Cc \leq 3$ ^E	GW	Pedregulho bem graduado ^F
		Menos que 5 % de finos ^C	$Cu < 4$ e/ou $1 > Cc > 3$ ^E	GP	Pedregulho mal graduado ^F
		Pedregulhos com finos	Finos classificam-se como ML ou MH	GM	Pedregulho siltoso ^{F, G, H}
		Mais que 12 % de finos ^C	Finos classificam-se como CL ou CH	GC	Pedregulho argiloso ^{F, G, H}
	Areias	Areias limpas	$Cu \geq 6$ e $1 \leq Cc \leq 3$ ^E	SW	Areia bem graduada
	50 % ou mais da fração grossa	Menos de 5 % de finos ^D	$Cu < 6$ e/ou $1 > Cc > 3$ ^E	SP	Areia mal graduada
		Areias com finos	Finos classificam-se como ML ou MH	SM	Areia siltosa ^{G, H, I}
	passa na peneira nº 4	Mais de 12 % de finos ^D	Finos classificam-se como CL ou CH	SC	Areia argilosa ^{G, H, I}
Solos de granulometria fina 50 % do solo ou mais passa na peneira nº 200	Siltes e argilas	Inorgânicos	$IP > 7$ e sobre ou acima da linha "A"	CL	Argila pouco plástica ^{K, L, M}
	Limite de liquidez menor que 50		$IP < 4$ e abaixo da linha "A"	ML	Silte
		Orgânicos	$\frac{LL - \text{seco em estufa}}{LL - \text{não seco em estufa}} < 0,75$	OL	Argila orgânica ^{K, L, M} Silte orgânico ^{K, L, M, O}
	Limite de liquidez maior ou igual a 50	Inorgânicos	IP sobre ou acima da linha "A"	CH	Argila muito plástica ^{K, L, M}
			IP abaixo da linha "A"	MH	Silte elástico ^{K, L, M}
		Orgânicos	$\frac{LL - \text{seco em estufa}}{LL - \text{não seco em estufa}} < 0,75$	OH	Argila orgânica ^{K, L, M, P} Silte orgânico ^{K, L, M, Q}
Solos altamente orgânicos	Principalmente matéria orgânica, escura na cor e com odor orgânico			PT	Turfa

Os solos de granulometria fina (50% ou mais de massa de solo passa pela peneira n° 200) estão reunidos nos seguintes grupos:

Grupos ML e MH: Estes grupos incluem materiais predominantemente siltosos e solos micáceos. Solos deste grupo são siltes arenosos, siltes argilosos ou siltes inorgânicos com relativa baixa plasticidade;

Grupos CL e CH: Os grupos CL e CH abrangem argilas inorgânicas com baixo e alto limites de liquidez respectivamente;

Grupos OL e OH: Os solos deste grupo são caracterizados pela presença de matéria orgânica, incluindo siltes e argilas orgânicas;

Os solos que apresentam alto teor de matéria orgânica são representados pelo **Grupo Pt**. Estes solos são facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e freqüentemente pela textura fibrosa. São muito compressíveis e possuem características indesejáveis para a construção civil. Turfas, húmus e solos pantanosos com altas texturas orgânicas são típicos deste grupo.

Os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), são utilizados na classificação dos solos de granulometria grossa e suas equações encontram-se relacionadas abaixo:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.2)$$

onde:

D_{10} : diâmetro das partículas do solo em relação a 10% do material que passa;

D_{30} : diâmetro das partículas do solo em relação a 30% do material que passa;

D_{60} : diâmetro das partículas do solo em relação a 60% do material que passa.

Para a fração de solo menor que 0,42 mm, são determinados os limites de Atterberg, servindo essencialmente para classificar a fração fina do solo através da carta de plasticidade ($LL \times IP$).

A **Figura 2.1** apresenta a carta de plasticidade onde no eixo das abscissas verifica-se o valor do Limite de Liquidez e no eixo das ordenadas o valor do Índice de Plasticidade do solo a ser analisado.

Figura 2.1 - Gráfico de Plasticidade (ASTM, 1990)

Como se pode observar, o gráfico de plasticidade é subdividido em regiões pelas linhas "A", "B" e "U". A linha "A" separa, para o universo dos solos inorgânicos, o siltes das argilas, exceto na região onde os solos são classificados com letras dobradas (CL - ML). Os siltes são representados abaixo da linha "A" e as argilas acima desta linha.

Os solos de alta e baixa compressibilidade são separados pela linha "B", localizados à direita e à esquerda, respectivamente.

A linha "U", determinada empiricamente para ser o limite superior aproximado para solos naturais, é uma boa verificação quanto à existência de dados errados, e quaisquer resultados de ensaios que recaiam acima ou à esquerda dessa linha devem ser verificados.

2.2.2 Classificação HRB (Highway Research Board)

Um sistema de classificação bastante utilizado no meio rodoviário é o do Highway Research Board (HRB), aprovado em 1945, constituído a partir de um

aperfeiçoamento do antigo sistema do Bureau Public Roads Administration, proposto em 1929 (DNER, 1996).

Nesta classificação os solos eram divididos em oito grupos (A-1 a A-8), de acordo com sua granulometria. Entre 1943 e 1945, esta classificação sofreu revisão pelo Highway Research Board, onde alguns grupos foram subdivididos e foi introduzido o Índice de Grupo.

O Índice de Grupo (IG) é um número inteiro com intervalo de variação entre 0 e 20 que é função da porcentagem de material que passa na peneira nº 200 e das propriedades índices (LL e IP), podendo ser obtido através da equação:

$$IG = (F-35) \cdot [0,2 + 0,005 \cdot (LL - 40)] + 0,01 \cdot (F - 15) \cdot (IP - 10) \quad (2.3)$$

onde:

F: porcentagem de solo que passa na peneira nº 200, expressa em número inteiro;

LL: limite de liquidez (%);

IP: índice de plasticidade (%).

Desta forma, este número auxilia no dimensionamento das camadas do pavimento uma vez que estabelece a ordenação dos solos dentro de um grupo, conforme suas aptidões, sendo pior o solo que apresentar maior valor do índice de grupo, como por exemplo, o solo A-4 (IG igual a 7) é considerado melhor do que o solo A-4 (IG igual a 8).

A **Tabela 2.2** apresenta a classificação HRB, onde os solos são inicialmente classificados em materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200), e em materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200). Os solos são subdivididos em sete grupos e oito subgrupos:

Grupo A-1: O material típico deste grupo é uma mistura bem graduada de fragmentos de rocha e pedregulho, areia grossa, areia média e areia fina com ou sem material fino, não plástico ou pouco plástico;

Tabela 2.2 - Classificação dos solos segundo a HRB (Manual do DNER, 1996)

Classificação		Materiais Granulares						Materiais Silto - Argilosos			
Geral		35 % (ou menos) passando pela peneira N.º200						Mais de 35 % passando pela peneira N.º200			
Classificação em grupos		A - 1	A - 3	A - 2			A - 4	A - 5	A - 6	A - 7	
										A - 7 - 5	
										A - 7 - 6	
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passante:											
Peneira N.º 10	50 máx.										
Peneira N.º 40	30 máx.	30 máx.	51 mín.								
Peneira N.º 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira N.º40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	N.P.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais Constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia			Pedregulhos ou areias siltosos ou argilosos				Solos Siltosos		Solos Argilosos	
Comportamento como Subleito	Excelente a bom						Sofrível a mau				

*O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Subgrupo A-1-A: Este subgrupo inclui materiais constituídos predominantemente de fragmentos de rocha ou pedregulho com ou sem material fino bem graduado (menos de 50% de material passante na peneira n°10, menos de 30% passante na peneira n°40 e menos de 15% passante na peneira n°200, com $IP < 6$);

Subgrupo A-1-B: Este subgrupo inclui materiais com predomínio de areia grossa a média, com ou sem material fino bem graduado (menos de 30% de material passante na peneira n°40, e menos de 25% passante na peneira n°200);

Grupo A-3: O material típico deste grupo são areias finas de praia ou de deserto, com ausência de material siltoso ou argiloso, ou com pequena quantidade de silte não plástico. Também incluem areia fina fluvial mal graduada, com pouca areia grossa e pedregulho (menos de 50% de material passante na peneira n°40 e menos de 10% passante na peneira n°200, material não plástico);

Grupo A-2: Este grupo inclui uma grande variedade de materiais granulares, com graduação irregular e pouco material fino que não se enquadram nas classes A-1 e A-3 devido a maior porcentagem de material passante na peneira de n°40 e a presença de plasticidade;

Subgrupos A-2-4 e A-2-5: Os materiais pertencentes a este subgrupo são granulares cuja fração passante na peneira n°40 apresenta características dos solos dos grupos A-4 (A-2-4) e A-5 (A-2-5). Este subgrupo também inclui pedregulhos com porcentagem de silte e valores de IP acima dos limites do grupo A-1 e areia fina com porcentagem de silte não plástico acima dos limites do grupo A-3;

Subgrupos A-2-6 e A-2-7: Nestes subgrupos estão materiais semelhantes aos solos do subgrupos A-2-4 e A-2-5, exceto em relação a fração de material passante na peneira n°40 composta por argila plástica, possuindo características dos solos dos grupos A-6 (A-2-6) e A-7 (A-2-7);

Grupo A-4: Este grupo reúne solos siltosos não plásticos ou moderadamente plásticos, com porcentagem passante na peneira n°200, maior que 35%;

Grupo A-5: O material típico deste grupo é similar ao descrito no grupo A-4, com material diatomáceo ou micáceo, podendo ser altamente elástico, tal como indicado por seu limite de liquidez;

Grupo A-6: Este grupo apresenta solos argilosos plásticos com porcentagem passante na peneira nº200 maior que 35%. Materiais deste grupo estão sujeitos a grandes variações volumétricas entre os estados seco e úmido;

Grupo A-7: Este grupo reúne materiais semelhantes aos solos do grupo A-6, porém mais elásticos, com alto limite de liquidez e com grandes variações volumétricas;

Subgrupo A-7-5: Inclui solos com moderado índice de plasticidade em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elásticos e sujeitos a elevadas mudanças de volume;

Subgrupo A-7-6: Inclui materiais que possuem alto índice de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas variações de volume.

O procedimento de classificação é bastante simples, bastando executar ensaios de granulometria, limites de liquidez e de plasticidade e calculando o IG. De posse destes resultados, consulta-se a tabela de classificação HRB, sempre da esquerda para a direita, obtendo-se assim o grupo a que pertence o solo ensaiado.

Os grupos A-1, A-3 e A-2, são classificados como materiais granulares considerados de comportamento excelente a bom como subleito, com o aumento do valor índice de grupo. Os grupos A-4 e A-5 representam os solos siltosos e os grupos A-6 e A-7, os solos argilosos, sendo que estes grupos possuem, segundo esta classificação, um comportamento como material de subleito que varia de regular a mau com o acréscimo do índice de grupo.

2.3 Classificação Resiliente dos Solos (DNER, 1996)

Na década de 70, Medina & Preussler estudaram características físicas e mecânicas de vinte solos obtidos de subleitos e sub-bases de pavimentos de estradas brasileiras. Nestes estudos, foram obtidos nos ensaios triaxiais dinâmicos os parâmetros de resiliência das equações de correlação do módulo

resiliente com a tensão confinante σ (solos arenosos) e a tensão desvio σ_d (solos argilosos).

Dos 20 solos ensaiados, 14 eram arenosos, sendo que 9 enquadravam-se na faixa granulométrica A e 5 na faixa granulométrica B. Neste estudo verificou-se que os solos arenosos finos e uniformes da faixa B possuíam módulos de resiliência (M_R), bem maiores que os da faixa A, de melhor graduação. Também se observou que, para estes solos, a natureza dos finos tinha efeito significativo no valor do M_R da faixa B, mas não influenciava no M_R dos solos da faixa A.

Nos solos argilosos e siltosos estudados (6 no total), verificou-se que o M_R sofreu influência da fração argila dos finos. Quanto menor a fração argila e, portanto maior a de silte nos finos, observou-se que o M_R era menos sensível à variação da tensão-desvio.

Medina e Preussler (1980), também correlacionaram o M_R com o valor de CBR dos materiais e propuseram uma tentativa de classificação dos solos quanto às propriedades resilientes, onde agruparam solos arenosos e argilosos em categorias às quais correspondem determinados modelos matemáticos de comportamento resiliente. Os solos também foram agrupados conforme sua granulometria, plasticidade e valor de CBR.

O Manual de Pavimentação do DNER (1996), apresenta uma classificação resiliente de solos baseada nos estudos de Medina & Preussler. Esta classificação qualifica os solos quanto ao comportamento mecânico, em termos de deformabilidade elástica.

A Classificação Resiliente fundamenta-se no conhecimento do módulo de resiliência dos solos (M_R), determinado pelo DNER-ME 131/97, expresso por modelos de comportamento elástico não linear.

Para os fins de classificação, os solos granulares são aqueles que apresentam menos que 35% de peso em material passando na peneira nº200. A **Figura 2.2** apresenta três grupos de solos (Grupo A, B e C), que retratam o comportamento dos solos granulares, definido pelo modelo:

$$M_R = K_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2} \quad (2.4)$$

sendo k_1 e k_2 os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões de confinamento (σ_3), e M_R o módulo de resiliência correspondente.

Figura 2.2 - Classificação resiliente de solos granulares (Manual DNER, 1996)

Os solos pertencentes ao **Grupo A** apresentam grau de resiliência elevado, constituindo subleitos de má qualidade quando utilizado em estruturas de pavimentos, não devendo, portanto, ser empregado para este fim.

Os solos incluídos no **Grupo B** possuem grau de resiliência intermediário, podendo ser empregados em estruturas de pavimentos como base, sub-base e reforço do subleito, ficando seu comportamento dependente das seguintes condições conforme seu parâmetro de resiliência:

$K_2 \leq 0,50$, solos de bom comportamento para serem utilizados em estruturas de pavimento;

$K_2 > 0,50$, solos com comportamento dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito.

O **Grupo C** reúne solos com baixo grau de resiliência, podendo ser utilizado em todas as camadas do pavimento, resultando em estruturas com baixas deflexões.

Os solos finos são aqueles que apresentam mais de 35% em peso de material que passa pela peneira n°200 (0,075mm). A **Figura 2.3** mostra os grupos de solos finos separados segundo seu comportamento em solos do Tipo I, Tipo II e Tipo III, conforme descrito abaixo:

Solo Tipo I: solo de bom comportamento quanto a resiliência para a utilização como subleito e reforço do subleito, podendo ser usado também como camada de sub-base;

Solo Tipo II: solo de comportamento regular quanto a resiliência para ser utilizado como subleito e reforço de subleito;

Solo Tipo III: solo de comportamento ruim quanto a resiliência. É vedado seu emprego em camadas de pavimentos. Para utilização em subleito requer cuidados e estudos especiais.

Os módulos de resiliência considerados representativos dos três tipos de solos finos, podem ser estimados através das equações (2.5), (2.6) e (2.7). Estes valores foram estabelecidos por Preussler & Pinto (1982), sendo atualmente apresentado no Manual do DNER (1996):

Solos Tipo I e Tipo II:

$$M_R = k_2 + k_3 * (k_1 - \sigma_d) \text{ para } \sigma_d < k_1 \quad (2.5)$$

$$M_R = k_2 + k_4 * (\sigma_d - k_1) \text{ para } \sigma_d > k_1 \quad (2.6)$$

Solos Tipo III:

$$M_R = 530 \text{ Kg/cm}^2 \quad (2.7)$$

sendo k_1 , k_2 , k_3 e k_4 , os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões-desvio σ_d , e M_R o módulo de resiliência correspondente.

Figura 2.3 - Gráfico de classificação resiliente dos solos finos (DNER, 1996)

Conforme o Manual de Pavimentação do DNER (1996), na impossibilidade de se determinar o M_R para estes solos, é possível estimar a classificação indiretamente a partir da percentagem de silte, $S\%$, e do CBR (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Classificação resiliente dos solos finos pelo método indireto (DNER, 1996)

CBR	S %		
	≤ 35	35 a 65	≥ 65
≤ 5	tipo III	tipo III	tipo III
6 a 9	tipo II	tipo II	tipo III
> 10	tipo I	tipo II	tipo III

2.4 Solos Tropicais e suas Peculiaridades

Os solos tropicais ocorrem em locais que apresentam características climáticas tropicais e úmidas. Geralmente, países onde ocorre este tipo de solo estão localizados entre trópicos, mas vale a pena ressaltar que isto não representa uma regra, pois o solo tropical deverá possuir propriedades

de processos geológicos e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas. (Nogami e Villibor, 1995; Committee on Tropical Soils of ISSMEF, 1985).

Os solos tropicais podem revelar comportamentos distintos relacionados com seu comportamento mecânico e hidráulico devido ao processo de "laterização". O processo de laterização ou latolização ocorre em regiões tropicais úmidas onde os cátions básicos são lixiviados, com conseqüente concentração residual de óxidos de ferro e de alumínio.

Devido ao processo de laterização, a fração argila dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilo-minerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. A combinação desses componentes é responsável pela formação de agregações estáveis em presença de água, graças ao recobrimento dos argilo-minerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados que, além de reduzirem a capacidade de adsorção de água pelos argilo-minerais, atuam como agentes cimentantes naturais entre as partículas. Na fração areia e silte, são encontrados principalmente quartzo, agregações lateríticas e, em menor escala, minerais pesados.

A **Figura 2.4** mostra um exemplo, em escala microscópica, de um solo laterítico analisado por Takeda (2005) onde os grãos mais finos encontram-se agregados e o solo apresenta um aspecto cimentado.

Figura 2.4 - Fotografias microscópicas de um solo laterítico - aumento e 3000 e 10000x respectivamente (Takeda, 2005)

Estima-se que os solos lateríticos ocupem cerca de 8,1% da superfície dos continentes. No Brasil, os solos lateríticos encontram-se distribuídos em quase todo território, o que pode ser observado na **Figura 2.6**.

Figura 2.6 - Distribuição dos solos lateríticos no Brasil (Medina e Motta, 1989)

2.5 Algumas Limitações da Aplicação das Classificações Geotécnicas Tradicionais na Identificação e Caracterização dos Solos Tropicais

As classificações mais utilizadas no Brasil são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS - Unified Soil Classification System), e a classificação para finalidades rodoviárias da AASHTO, a HRB (Highway Research Board).

No entanto, a aplicação das classificações tradicionais aos solos tropicais se torna restrita devido às peculiaridades destes solos. Neste contexto, destaca-se o fato de a hierarquização dos solos utilizados em pavimentação baseada nas classificações geotécnicas tradicionais não corresponderem ao real desempenho dos mesmos nas obras.

De acordo com a classificação HRB, solos que possuem baixos valores de LL e IP e baixa porcentagem de finos, ou seja, baixo índice de grupo (IG), possuem um desempenho superior aos demais solos com maior valor do IG. Assim, de acordo com esta classificação solos arenosos, areno-siltosos e areno-argilosos, apresentam um comportamento excelente como material de construção em obras de pavimentação. Em contrapartida, os solos siltosos e argilosos (com alto IG) são considerados inferiores quando comparados aos demais solos.

Segundo FORTES *et al.* (2002), solos classificados no grupo A-7-5, segundo a classificação HRB, quando adequadamente compactados, podem se comportar como um ótimo subleito (caso laterítico). Outro exemplo pode ser verificado a partir de solos do grupo A-4 (lateríticos) que vêm sendo utilizados com sucesso em bases de pavimentos.

No que diz respeito ao gráfico de plasticidade, utilizado na classificação da fração fina do solo pela classificação unificada, há uma série de deficiências quando se trata de classificar solos tropicais.

Tais deficiências são expostas por Nogami e Villibor (1994a), entre as quais:

- Os valores das propriedades índices nos solos lateríticos variam com a destruição dos torrões ou agregados, e não se fixou qual o critério mais apropriado: se a destruição total ou parcial dos agregados. Desta forma, um solo laterítico, como o latossolo roxo, por exemplo, pode variar significativamente os valores das propriedades índices conforme o grau de destruição dos agregados, comprometendo a classificação deste solo, já que esta depende dos valores de LL e IP;
- Através do gráfico de plasticidade não pode se distinguir os solos que apresentam comportamento laterítico dos não lateríticos. Portanto os mesmos valores de LL e IP podem agrupar solos de comportamento completamente distintos;
- A presença de mica e de macrocristais de caulinita e/ou haloisita, freqüente em solos saprolíticos, modifica os valores de LL, interferindo na classificação deste tipo de solo.

2.6 Classificações Desenvolvidas para Solos Tropicais

Diante das incompatibilidades verificadas ao longo dos anos entre os resultados obtidos pelas classificações tradicionais em solos de países de clima tropical e seu comportamento geotécnico em campo, veio a necessidade de se obter uma classificação especialmente desenvolvida para os solos tropicais.

Para a identificação dos solos tropicais existem alguns métodos, como exposto por Nogami e Villibor (1996). Entre eles destacam-se a metodologia MCT, o procedimento das pastilhas e o ensaio de adsorção de azul de metileno.

No entanto, a classificação MCT, vem sendo, dentre todas, a de maior aceitação e uso no meio técnico rodoviário brasileiro. Graças à classificação MCT, solos tradicionalmente considerados impróprios para a utilização em obras de pavimentação, puderam ter suas propriedades geotécnicas reavaliadas e desta forma serem utilizados com sucesso como material de base, sub base e subleito de muitos pavimentos brasileiros.

2.6.1 O Sistema de Classificação MCT

Com a finalidade de melhorar a identificação e caracterização dos solos tropicais, no início da década de 80, Nogami e Villibor propuseram uma nova sistemática de classificação denominada M (Miniatura), C (Compactada), T(Tropical).

O método, que utiliza corpos de prova compactados de dimensões reduzidas de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, permite avaliar propriedades fundamentais dos solos como contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração d'água, coesão, capacidade de suporte e famílias de curvas de compactação.

Nesta classificação, Nogami & Villibor (1981) propuseram dois grupos de solos que podem apresentar comportamento laterítico (L) ou comportamento não laterítico (N) subdivididos em sete grupos, conforme relacionado em Nogami e Villibor (1995):

- **Areias lateríticas (LA):** Neste grupo estão inclusas as areias com poucos finos de comportamento laterítico, típicas do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente como areias quartzosas e regosolos;
- **Solos arenosos lateríticos (LA'):** Solos tipicamente arenosos, e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos arenosos e solos podzólicos ou podzolizados arenosos (textura média). Estes solos, além da presença dos matizes vermelho e amarelo, dão cortes firmes (pouco ou não erodíveis), nitidamente trincados, quando expostos às intempéries;
- **Solos argilosos lateríticos (LG'):** Este grupo é formado por argilas e argilas arenosas, que constituem o horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente por latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas. Quando apresentam percentagem de areia elevada, tem um comportamento semelhante aos solos do grupo LA';
- **Areias não lateríticas (NA):** Os solos pertencentes a este grupo são as areias, siltes e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. Praticamente não possuem finos argilosos coesivos siltes caoliníticos;
- **Solos arenosos não-lateríticos (NA'):** Compostos granulometricamente por misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades similares) com finos passando na peneira de 0,075mm, de comportamento não laterítico. Geneticamente os tipos mais representativos são solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo tais como os granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros;
- **Solos siltosos não lateríticos (NS'):** Este grupo compreende os solos saprolíticos silto-arenosos peculiares, resultantes do intemperismo tropical nas rochas eruptivas e metamórficas, de constituição predominantemente feldspática-micácea-quartzosa. As variedades mais ricas em areia quartzosa podem ter características mecânicas e hidráulicas que se aproximam dos solos do grupo NA';
- **Solos argilosos não lateríticos (NG'):** Este grupo compreende os solos saprolíticos argilosos, provenientes de rochas sedimentares argilosas

(folhelhos, argilitos, siltitos), ou cristalinas pobres em quartzo e ricas em anfibólios, piroxênios e feldspatos cálcicos. Classificam-se neste grupo os solos superficiais pedogenéticos não lateríticos, como os vertissolos bem como muitos solos transportados.

Através do ábaco de classificação (**Figura 2.7**), podemos observar a distribuição destes solos conforme os valores do coeficiente c' e do índice e' .

O coeficiente c' , associado à argilosidade do solo, corresponde às abcissas do ábaco da classificação MCT e o índice e' , que reflete o caráter laterítico do solo, corresponde às ordenadas.

Para a determinação do coeficiente c' e do índice e' , são necessárias as execuções dos ensaios de Mini-MCV (DNER-ME 258/94) e Perda de Massa por Imersão (DNER-ME 256/94).

Figura 2.7 - Gráfico da classificação MCT (Nogami e Villibor, 1981)

A **Tabela A.1** do Anexo A, proposta por Nogami e Villibor (1995), apresenta algumas propriedades e utilização dos grupos de solos da MCT.

Segundo Barroso (2002), o método MCT é aplicado somente aos solos que apresentam, no mínimo, 95% de material passante na peneira de abertura nominal igual a 2 mm, tendo em vista as dimensões reduzidas do cilindro de compactação Mini-MCV.

Vertamatti (1988) propôs a utilização de um equipamento semelhante ao MCV, desenvolvido por Parsons (1976), para o estudo das características dos solos granulares. Este autor estudou os chamados solos plintíticos da Amazônia, que podem passar totalmente ou ter uma parcela retida na peneira de abertura igual a 2 mm. Foi apresentada uma proposta de modificação da classificação MCT, incluindo no ábaco de classificação, o grupo de solos transicionais (T), conforme mostra a **Figura 2.8**.

O ábaco apresentado por Vertamatti (1988) foi denominado de MCT-M (M de modificado). No ábaco podemos observar que os solos transicionais ocupam uma faixa intermediária entre os solos que apresentam comportamento laterítico e não laterítico.

Conforme discorrido em Barroso (2002), para a determinação do parâmetro P_i , Vertamatti (1988) sugere que a massa desprendida seja multiplicada por uma constante adicional em função da forma de desagregação do solo: $0,25 \times P_i$ (queda do bloco maciça); $0,50 \times P_i$ (queda parcial do bloco ou queda quando o bloco apresenta fissuras); $0,75 \times P_i$ (queda fragmentada).

Figura 2.8 - Ábaco de classificação MCT-M (Vertamatti, 1988)

2.6.2 O Método Expedito das Pastilhas

Nas últimas décadas, a classificação para solos tropicais vem sendo estudada e aprimorada a fim de simplificar os ensaios necessários à classificação e fornecer resultados coerentes com o real comportamento geotécnico dos solos nas obras de pavimentação. Assim, em decorrência da classificação MCT, foi desenvolvido um novo método de classificação denominado *Método Expedito das Pastilhas*.

Segundo Nogami e Villibor (1994b), o Método Expedito das Pastilhas foi proposto com a finalidade de simplificar os procedimentos dos ensaios de classificação de solos tropicais, utilizando menor quantidade de amostra, equipamento mais simples, mão de obra com menor treinamento, de modo que possa ser utilizada para fins gerais e preliminares.

Neste método são avaliadas principalmente as propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade dos solos, através de observações e medidas realizadas em pastilhas de solos moldadas.

2.6.2.1 O Método Expedito das Pastilhas (Nogami & Villibor, 1994b)

Este procedimento permite determinar os grupos da classificação geotécnica MCT, especialmente desenvolvida para os solos tropicais, de uma maneira expedita (NOGAMI & VILLIBOR, 1994b).

O ensaio consiste basicamente na moldagem de corpos de prova em forma de "*pastilhas*" em anéis de aço inox com dimensões de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura, e nas medidas de contração (C_t) e penetração (consistência) das pastilhas.

A classificação do solo é determinada a partir do Gráfico de Classificação do Método das Pastilhas, apresentado na **Figura 2.9**.

O gráfico apresenta classes de solos de acordo com a classificação MCT. O símbolo "—" separa duas opções de tipo de solos diferentes de maneira equivalente, e o símbolo "/" separa opções de solos de maneira decrescente.

Figura 2.9 - Gráfico de Classificação MCT pelo Método das Pastilhas (Nogami *et al.*, 1996)

Na parte superior do gráfico situam-se os valores do coeficiente c' , que é calculado através das equações (2.8) e (2.9):

$$c' = (\log_{10} Ct + 1) / 0,904 \quad (2.8)$$

para valores de contração Ct entre 0,1 e 0,5 mm e,

$$c' = (\log_{10} Ct + 0,7) / 0,5 \quad (2.9)$$

para valores de contração Ct maiores ou iguais a 0,6 mm.

Desta forma, é possível determinar a classe do solo a partir dos valores da penetração e da contração diametral ou coeficiente c' .

2.6.2.2 O Método Expedito das Pastilhas (Godoy & Bernucci, 2002)

Godoy e Bernucci (2002) propuseram modificações no método das pastilhas apresentado por Nogami e Villibor (1994). Dentre as alterações destaca-se a mudança nas dimensões das pastilhas utilizadas nos ensaios, que neste caso possuem 35 mm de diâmetro e 10 mm de altura.

Outra importante modificação realizada neste método, é a utilização de um minipenetrômetro para obtenção das medidas de penetração, o que resulta numa menor interferência do operador nos resultados.

Conforme ilustra a **Figura 3.4**, apresentada no Capítulo 3, o minipenetrômetro, é composto por um cone com abertura de 60° e pesos de 10 e 30g (utilizados nas medidas de penetração), e um cone com igual abertura ao anterior, porém com 60g (utilizado para a determinação da consistência de moldagem das pastilhas).

O ensaio consiste na moldagem de corpos de prova em anéis de aço inox com a fração de solo que passa na peneira de malha 0,42mm e nas medidas de contração por perda de umidade, inchamento por contato com a água, penetração dos cones de 10 e 30 gramas e índice de reabsorção.

Segundo os autores deste método, a principal proposta do ensaio é a quantificação do fenômeno de *irreversibilidade adquirida*, total ou parcial, dos solos lateríticos, realizada de uma maneira expedita.

A classificação é realizada através do Guia Identificatório de solos tropicais apresentada na **Tabela 2.4**.

TABELA 2.4 - Guia identificatório de solos tropicais (Godoy & Bernucci, 2002)

Classes de Solos	Características dos Solos	Contração (%)	Inchamento (%)	Penetração (mm) Cone de 10g	Penetração (mm) Cone de 30 g	Índice de Reabsorção
LATERÍTICOS	TÍPICOS	>2	< 1	0	0	negativo
	ARGILOSOS	≥ 6	≤ 10,5	≤ 4	≤ 6	< 0,6
	ARENOSOS	2 a 6	≤ 10,5	≤ 4	≤ 6	< 0,6
	AREIAS	≤ 2	≤ 10,5	≤ 4	≤ 6	< 0,6
TRANSICIONAIS	ARGILOSOS	≥ 6	5,5 a 13	3 a 5	6 a 8	0,3 a 0,9
	ARENOSOS	2 a 6	5,5 a 13	3 a 5	6 a 8	0,3 a 0,9
	AREIAS	≤ 2	5,5 a 13	3 a 5	6 a 8	0,3 a 0,9
NÃO LATERÍTICOS	ARGILOSOS	≥ 6	> 8	≥ 4	≥ 8	> 0,4
	SILTOSOS	2 a 4	9 a 15	≥ 6	≥ 11	0,4 a 0,7
	ARENOSOS	2 a 6	> 8	≥ 4	≥ 8	> 0,4
	AREIAS	≤ 2	> 5	≥ 4	≥ 8	> 0,4

2.6.3 O Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha (Fabbri, 1994)

Os argilominerais presentes nos solos são responsáveis, em grande parte, por seu comportamento. O azul de metileno é um corante orgânico cuja molécula quando em contato com um argilomineral em meio aquoso, forma uma camada mono-molecular quase que completa sobre a sua superfície (FABBRI & SÓRIA, 1991).

O ensaio de adsorção de azul de metileno permite avaliar a superfície específica total (SE) e a capacidade de troca catiônica (CTC) dos argilominerais presentes nos solos, uma vez que a SE é inversamente proporcional ao diâmetro equivalente e que a contribuição das frações granulométricas de dimensões superiores às da argila, em termos de SE, é muito pequena (FABBRI & SÓRIA, 1994).

Desta forma, quanto maior a superfície de um argilomineral (interna e externa), maior a quantidade de azul de metileno adsorvida.

O ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha consiste, resumidamente, na titulação de uma suspensão de solo mais água com uma solução de azul de metileno padronizada, em meio intensamente agitado. Após a adição de uma certa quantidade de corante, retira-se uma gota da solução (corante + água + solo), que é pingada sobre uma folha de papel filtro. Esta operação é repetida até que a mancha formada pela difusão da gota no papel apresente uma aura azul clara ou esverdeada, significando que há excesso de corante na solução, designado como ponto de viragem (FABBRI, 1994).

De posse do volume de azul de metileno adicionado à suspensão, do teor de umidade da fração ensaiada e da porcentagem de solo que passa na peneira #200, é possível calcular o volume de azul (VA) consumido por 1 g de amostra integral de solo seco.

Deste modo, o valor de azul (VA), corresponde à quantidade consumida por 1 g de amostra de solo, cuja unidade é expressa em ml de solução padrão por grama de solo (FABBRI & SÓRIA, 1994).

Fabbri e Sória (1991) propuseram o coeficiente de atividade (CA), expresso pela relação entre a quantidade de azul de metileno consumido, em peso, por um grama de amostra de solo integral (VA) e a porcentagem P_F que o solo contém da fração $< 0,005$ mm, conforme exposto na **Equação (2.10)**.

$$CA = 100 \times \left(\frac{V_A}{P_F} \right) \quad (2.10)$$

sendo:

VA: Volume de azul consumido por 1 grama de solo seco (ml);

P_F : Porcentagem que o solo contém da fração $< 0,005$ mm.

De acordo com o CA, Fabbri definiu três graus de atividade para os grupos de argilominerais, a saber: Muito ativos ($CA > 80$), Ativos ($11 < CA < 80$) e Pouco Ativos ($CA < 11$). Este autor confrontou o ensaio de azul de metileno com a classificação MCT, obtendo uma correlação em torno de 82%, concluindo que solos com $CA < 11$ tem tendência de apresentar comportamento laterítico e os solos com $CA > 11$ comportamento não laterítico (COSTA & GANDOLFI, 1998).

Desta forma, este coeficiente é menor para solos de comportamento laterítico do que para solos de comportamento não laterítico, visto que os primeiros têm menor capacidade de adsorção do corante do que os últimos (FABBRI, 1994).

Fabbri (1994), propôs um ábaco para a avaliação do grau de atividade da fração fina presente no solo apresentado na **Figura 2.10**. Neste ábaco, o coeficiente de atividade (CA) é dado pela tangente do ângulo formado entre o eixo das abscissas e a reta que passa pela origem dos eixos cartesianos e pelo ponto cuja abscissa assume o valor da porcentagem de partículas com dimensões inferiores a 0,005 mm e cuja ordenada expressa o valor de azul (BARROSO & FABBRI, 1996).

Conforme Barroso e Fabbri (1996), estudos realizados no Brasil como os de Casanova (1986), Fabbri e Sória (1991), Pejon (1992) e Fabbri (1994), comprovam que o ensaio de adsorção de azul de metileno surge como uma alternativa eficiente, rápida e econômica para o processo de caracterização dos solos.

Figura 2.10 -Ábaco para caracterização do grau de atividade da fração argila dos solos (Fabbri, 1994)

2.7 Permeabilidade dos Solos

O solo é constituído de uma fase sólida e de uma fase fluida (água e/ou ar). A fase fluida ocupa vazios deixados pelas partículas sólidas que compõem o esqueleto do solo. Em se tratando de água, podemos dizer, que ela pode estar presente no solo sob as mais variadas formas. Nos solos grossos, onde as forças de superfície são inexpressivas, essa água se encontra livre entre as partículas sólidas, podendo estar sob equilíbrio hidrostático ou podendo fluir sob a ação da gravidade, desde que haja carga hidráulica. Para os solos finos, a situação se torna mais complexa, uma vez que passam a atuar forças de superfície de grande intensidade. Assim, nestes solos, existe uma camada de água adsorvida, a qual pode estar sujeita a pressões muito altas, devido às forças de atração existentes entre as partículas. Essa água próxima as partículas pode se encontrar solidificada, mesmo à temperatura ambiente. O restante de água existente nesses solos finos se encontra livre, podendo fluir por entre as partículas, desde que haja um potencial hidráulico para tal. (BUENO & VILAR, 1998).

A permeabilidade de um solo está relacionada à maior ou menor facilidade que a água possui para fluir pela por toda sua estrutura, ou seja,

permeabilidade é a propriedade do solo de permitir o fluxo de água por entre seus vazios.

A avaliação da permeabilidade é realizada através do *coeficiente de permeabilidade*. O coeficiente de permeabilidade é a velocidade de descarga de um fluido que atravessa uma seção unitária de solo, quando sujeita a um gradiente unitário, portanto, o valor da permeabilidade depende das características do fluido e do solo, além de outros fatores que serão comentados no item 2.7.1.

Para a determinação deste parâmetro, existem métodos diretos e métodos indiretos. Nos métodos diretos, o coeficiente de permeabilidade é determinado através de ensaios de campo e de laboratório. Nos métodos indiretos, o coeficiente de permeabilidade é determinado através de correlações empíricas.

Em relação aos ensaios de laboratório, para se obter o coeficiente de permeabilidade dos solos granulares (permeabilidade alta), utiliza-se o Permeâmetro de Carga Constante (NBR 13292/1995, "Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante") e para solos de graduação mais fina (permeabilidade baixa), é utilizado o Permeâmetro de Carga Variável (NBR 14545/2000, "Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável").

2.7.1 Fatores que Influenciam na Permeabilidade dos Solos

A permeabilidade é um dos parâmetros de maior variação em materiais inconsolidados, variando de 10^{+2} cm/s para materiais de altíssima condutividade hidráulica como pedregulhos, até 10^{-12} cm/s, para os de baixíssima condutividade, geralmente solos com grande quantidade de argilo minerais de alta atividade. Em um mesmo solo, este parâmetro pode apresentar variações de algumas ordens de grandeza como resultado de mudanças na sua estrutura, viscosidade do fluido, índice de vazios, teor de umidade, grau de saturação, entre outros fatores (DOURADO, 2003).

A **Tabela 2.5** mostra a classificação dos solos segundo os valores de seus coeficientes de permeabilidade.

Tabela 2.5 - Grau de permeabilidade dos solos segundo seus valores de coeficiente de permeabilidade K (Lambe & Whitman, 1969)

Grau de permeabilidade	Valor de K (cm/s)
Elevado	Superior a 10^{-1}
Médio	10^{-1} a 10^{-3}
Baixo	10^{-3} a 10^{-5}
Muito baixo	10^{-5} a 10^{-7}
Praticamente impermeável	Menos que 10^{-7}

2.7.1.1 Fluido Filtrante

Uma equação que reflete a influência do fluido e das características do solo sobre a permeabilidade foi deduzida por Taylor (1948), a partir da Lei de Poiseuille. Essa equação baseia-se em considerar o fluxo através de meios porosos análogo ao que se produz através de um sistema de tubos capilares.

$$k = D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} C \quad (2.11)$$

Onde:

k : coeficiente de permeabilidade de Darcy;

D_s : diâmetro efetivo das partículas;

γ : peso específico do fluido;

μ : viscosidade do fluido;

e : índice de vazios do solo;

C : fator de forma.

A equação (2.12) expressa a permeabilidade dos meios porosos e é conhecida como equação de Kozeny-Carman, uma vez que foi proposta por Kozen e melhorada por Carman.

$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} \quad (2.12)$$

Onde:

k : coeficiente de permeabilidade;

k_0 : fator que depende da forma dos grãos e da relação entre o comprimento da trajetória real e a espessura da camada atravessada;

S : superfície específica;

μ : viscosidade do fluido;

γ : peso específico do fluido;

e : índice de vazios do solo.

Como D_s é definido como diâmetro das partículas que tem uma superfície específica S , pode-se considerar a equação (2.11) como uma simplificação da equação de Kozeny-Carman.

Estas duas equações são de grande utilidade para o estudo sobre as variáveis que influem sobre a permeabilidade. Neste estudo se consideram inicialmente as características que se referem ao fluido e posteriormente aquelas que dizem respeito a composição do solo.

As equações (2.11) e (2.12) mostram que tanto a viscosidade quanto o peso específico do fluido tem influência sobre o valor da permeabilidade. Estas duas características podem ser eliminadas como variáveis definindo-se outra permeabilidade, a permeabilidade específica absoluta (K), da seguinte forma:

$$K = \frac{k\mu}{\gamma} \quad (2.13)$$

Como k tem unidade de velocidade, K está expressa em unidade de comprimento ao quadrado.

Entretanto a viscosidade e o peso específico não são as únicas variáveis do fluido que tem influência sobre a permeabilidade dos solos. Outras características do fluido podem ter um efeito importante sobre a permeabilidade de solos relativamente impermeáveis. Por exemplo, Michael & Lin (1954) mostram dados experimentais de permeabilidade de caulinita sujeita à percolação por vários tipos de fluídos (água, ciclohexano, acetona, metanol e dioxano) com variações de permeabilidade absoluta superiores a 100%. Estas variações podem ser explicadas pela variação da estrutura do solo com a utilização dos diferentes fluidos.

2.7.1.2 Solo

Entre as propriedades dos solos que influenciam a permeabilidade, destacam-se o tamanho das partículas, o índice de vazios, a composição, a estrutura e o grau de saturação.

As equações apresentadas a seguir, apenas consideram diretamente o tamanho das partículas e o índice de vazios. Isto revela que as outras características são tratadas indiretamente ou são ignoradas. Infelizmente, é difícil analisar a influência de uma destas variáveis isoladamente, uma vez que estas estão estritamente relacionadas. Por exemplo, a estrutura de um solo depende do tamanho das partículas, do índice de vazios e da composição deste solo.

A equação (2.14) sugere que a permeabilidade varia com o quadrado do diâmetro de partículas. Desta forma, é lógico supor que quanto menores sejam as partículas dos solos menores serão os vazios que constituem os canais de fluxo e portanto, menor será a permeabilidade. Neste caso, se torna mais razoável uma relação entre a permeabilidade e o tamanho das partículas nos siltes e areais do que nas argilas, uma vez que nestes primeiros as partículas são mais equidimensionais e as diferenças de estruturas não são tão pertinentes quanto no caso das argilas. Em seu estudo sobre areias, Hazen propôs:

$$k = 100 D_{10}^2 \quad (2.14)$$

onde:

k : coeficiente de permeabilidade (cm/s)

D_{10} : diâmetro das partículas que corresponde 10% da massa de solo (cm)

A maior influência sobre a permeabilidade deve-se às partículas mais finas do solo. A equação de Hazen, por exemplo, utiliza D_{10} como o diâmetro que relaciona o tamanho das partículas com a permeabilidade.

Lambe & Whitman (1969), apresentam dados experimentais, vide **Figura 2.11**, que mostram a existência de uma relação linear entre o índice de vazios (e), e o logaritmo do coeficiente de permeabilidade (k). Observa-se que para os

30 tipos de solos estudados, o valor do coeficiente de permeabilidade decresce com o decréscimo do índice de vazios.

A estrutura do solo é uma das características mais influentes sobre a permeabilidade, especialmente quando se trata de solos finos. Em amostras de solo com o mesmo índice de vazios, observa-se que a amostra em estado mais floculado tende a apresentar maior permeabilidade do que a que se encontra em estado mais disperso.

Quanto mais dispersas estiverem as partículas, ou seja quanto mais paralelamente estejam orientadas, mais tortuoso será o percurso do fluido no sentido normal às partículas. Isto pode explicar em parte a baixa permeabilidade existente em uma estrutura modificada mecanicamente.

Legenda de Identificação dos Solos

1 - "Caliche" Compactado	10 - Areia de Ottawa	19 - Argila Pouco Plástica
2 - "Caliche" Compactado	11 - Areia de Gaspee Point	20 - Areia de Union Falls
3 - Areia Siltosa	12 - Areia de Frankli Falls	21 - Silte de North Carolina
4 - Argila arenosa	13 - Areia de Scituate	22 - Areia de Dique
5 - Areia de Praia	14 - Areia de Plum Island	23 - Argila Azul de Boston - Sódica
6 - Argila Azul de Boston Compactada	15 - Areia de Fort Peck	24 - Caolinita Cálcica
7 - Argila "Buckshot de Visksburg"	16 - Silte de Boston	25 - Montmorilonita Sódica
8 - Argila Arenosa	17 - Silte de Boston	26 a 30 - Areia (Filtro de Barragem)
9 - Silte de Boston	18 - Loss	

Figura 2.11 -Influência do índice de vazios no coeficiente de permeabilidade (Lambe e Whitman, 1969)

Em um solo flocculado, existem canais maiores para o fluxo. Como o fluxo através de um canal maior será muito maior do que através de vários canais menores de mesma seção total que o maior, se ressalta que quanto maiores sejam os canais para um determinado volume de poros maior será a permeabilidade.

Lambe e Whitman (1969) estudaram a variação do coeficiente de permeabilidade ao longo da curva de compactação. Os autores analisaram a permeabilidade de um solo argilo-siltoso da Jamaica. Neste estudo verificou-se que o valor do coeficiente de permeabilidade obtido para teores de umidade abaixo da umidade ótima diminuiu bruscamente. Em contrapartida, para teores de umidade acima da umidade ótima, os valores do coeficiente de permeabilidade permaneceram na mesma ordem de grandeza.

Segundo os autores, este resultado pode estar relacionado à disposição das partículas de solo nos diferentes pontos da curva de compactação. Enquanto no ramo seco da curva de compactação as partículas de solo apresentam-se flocculadas e, no ramo úmido da curva as partículas do solo apresentam-se dispostas paralelamente.

O grau de saturação de um solo tem uma influência importante sobre a sua permeabilidade. A área total para o fluxo decresce com a diminuição do número de poros saturados por água, pois o ar passa a obstruir a trajetória do fluido.

Em se tratando de solos lateríticos, Nogami e Villibor (1995), relata que estes materiais com suas estruturas naturais caracterizam-se por ter elevada permeabilidade, conseqüente ao grande desenvolvimento de agregados argilosos, bastante resistentes, mesmo após imersão total em água. Isso acontece mesmo nas variedades com granulometria de argila ou argilosos.

No caso de solos lateríticos compactados, a resistência relativamente grande dos agregados argilosos naturais, ou resultantes da própria manipulação do solo no laboratório (por exemplo, secagem e destorroamento) e no campo, reflete-se na permeabilidade. Assim, a variação da permeabilidade ao longo da curva de compactação é bastante acentuada. A consideração da permeabilidade apenas nas condições ótimas de compactação pode não

explicar muitos problemas de movimentação d' água em obras viárias. As argilas lateríticas podem apresentar permeabilidade elevada no ramo seco da curva de compactação e as areias pouco argilosas podem tornar-se praticamente impermeáveis nas condições ótimas de compactação (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Outros fatores que influenciam a permeabilidade dos solos foram estudados por Macambira (2002). A autora analisou alguns pontos correspondentes às características originais dos solos, como a porcentagem de argila, o índice de plasticidade e o c' da classificação MCT e observou que a permeabilidade dos solos também sofre influência destes fatores.

Em relação a granulometria dos solos estudados pela autora, o valor da condutividade hidráulica apresentou uma tendência ao decréscimo com o aumento da porcentagem de argila. Macambira (2002) também observou que a condutividade hidráulica decresce com o aumento do IP. O coeficiente c' da classificação MCT, que está relacionado ao grau de argilosidade do solo, apesar de uma certa dispersão, apresentou uma leve tendência de aumento com a diminuição da condutividade hidráulica (MACAMBIRA, 2002).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

A investigação experimental foi conduzida de forma a possibilitar a classificação de solos de rodovias do interior paulista através do método expedito das pastilhas e pelo ensaio de adsorção de azul de metileno, sendo que os resultados destes ensaios foram posteriormente comparados com os obtidos pela Metodologia MCT e indicações inferidas a partir de ensaios de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-x. Posteriormente, também foi realizada a Classificação Resiliente para algumas amostras, e seus resultados confrontados com a MCT.

Numa segunda etapa, foram realizados ensaios de permeabilidade a fim de complementar o estudo das características físicas destes solos, procurando-se determinar a existência de relações entre os coeficientes de permeabilidade obtidos e a gênese dos solos estudados. Também foram analisados os resultados de ensaios de sucção buscando-se relações desta variável com as características e também com a gênese do solo.

Neste capítulo serão apresentados os critérios que nortearam a escolha dos materiais utilizados durante a pesquisa, bem como a metodologia utilizada para a realização dos ensaios destacados anteriormente.

3.2 Escolha dos Solos

Conforme apresentado no Capítulo 1, Introdução, a presente pesquisa integra um trabalho mais amplo que vem sendo desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos. Os solos escolhidos para as análises destacadas no item 3.1 foram selecionados entre os estudados por Takeda (2005).

Takeda (2005) coletou 91 amostras de solos pertencentes a taludes de rodovias do interior paulista, principalmente em regiões ao longo das rodovias SP-270, BR-116 e proximidades.

Segundo Takeda (2005), o critério de escolha dos locais de coleta, entre outros, foi a análise comparativa de categorias de solos determinadas em mapas pedológicos do Estado de São Paulo, buscando-se selecionar materiais que representassem um maior número possível de classes pedológicas, dando-se preferência aos solos classificados como PV, PVA, LV e LVA, respectivamente, argissolo vermelho, argissolo vermelho amarelo, latossolo vermelho e latossolo vermelho amarelo. As 91 amostras de solos receberam como código uma numeração conforme a ordem cronológica em que foram sendo coletadas.

A **Figura 3.1** ilustra a distribuição geográfica dos locais de coleta dos solos no mapa do Estado de São Paulo. Devido à proximidade de algumas regiões amostradas e à escala do mapa, alguns pontos destacados podem representar mais de um solo.

Figura 3.1 - Distribuição geográfica dos locais de coleta das 91 amostras de solo coletadas no Estado de São Paulo (Takeda, 2005)

Dentre as 91 amostras coletadas, 21 eram da região da cidade de São Carlos. Após uma análise preliminar 18 destas amostras foram descartadas e na continuidade do estudo foi considerado um total de 73 solos para a realização da pesquisa. Para estes solos, além de ensaios de caracterização foram realizados ensaios de compactação, difração de raios-x, microscopia eletrônica de varredura e classificação segundo a Metodologia MCT.

Takeda (2005), em sua tese de doutorado, deu preferência aos solos de granulometria fina, visto que estudou a influência da variação da umidade no comportamento mecânico de materiais pertencentes ao subleito de rodovias, uma vez que estes materiais são os mais sensíveis à ação da água.

Assim, dos 73 solos, o pesquisador escolheu 30 solos para o estudo do comportamento mecânico, sendo 16, portanto a maioria, com granulometria fina (mais de 50% de material que passa na peneira de malha 0,075 mm), 7 com granulometria intermediária, (porcentagem de material que passa na peneira de malha 0,075 mm entre 35 e 50%), e 7 com faixa granulometria grossa, (porcentagem que passa na peneira de malha 0,075 mm menor que 35%). Os limites para os grupos granulométricos em questão foram propostos pelo pesquisador.

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, dos 30 solos estudados por Takeda (2005), foram selecionados 29, sendo descartada uma das amostras devido à escassez do material. De forma a obter-se uma distribuição equitativa dos solos entre as classes MCT, foram acrescentadas mais 9 amostras utilizadas por Viana (2006) e também pertencentes ao grupo original das 73 amostras.

Outro critério de seleção das amostras foi que os solos formassem “pares granulométricos”, ou seja, possuísem curvas granulométricas muito parecidas e diferentes classificações MCT em relação ao comportamento laterítico ou não laterítico. A **Tabela 3.1** relaciona os 38 solos utilizados nesta pesquisa separados conforme seus “pares” granulométricos e seu comportamento laterítico/não laterítico.

A **Tabela 3.1** mostra 6 "pares" e 4 "trincas" de solos agrupados segundo o critério destacado, totalizando 24 materiais. As 14 amostras restantes não apresentaram correspondência entre suas curvas granulométricas.

Tabela 3.1 - Solos estudados nesta pesquisa e seu comportamento (laterítico ou não laterítico) segundo a MCT

Pares ou trincas de solos	Comportamento	Pares ou trincas de solos	Comportamento
11	Laterítico	21	Laterítico
17	Não Laterítico	77	Não laterítico
38	Laterítico	39	Não laterítico
53	Não Laterítico	67	Laterítico
55	Não Laterítico	76	Laterítico
60	Laterítico	85	Não laterítico
22	Não Laterítico	27	Não laterítico
25	Laterítico	30	Laterítico
34	Não Laterítico	57	Laterítico
48	Laterítico	65	Não laterítico
78	Não Laterítico	71	Laterítico
91	Laterítico	86	Não laterítico
28	Laterítico	62	Não laterítico
32	Não Laterítico	75	Não laterítico
33	Não Laterítico	80	Laterítico
36	Não Laterítico	81	Não laterítico
43	Não Laterítico	82	Laterítico
46	Laterítico	88	Laterítico
50	Laterítico	89	Não laterítico

A **Tabela B.1** do Anexo B relaciona os 38 solos utilizados nesta pesquisa e seus respectivos locais de coleta em termos de latitude e longitude, profundidade e posição em relação à linha de seixos.

3.3 Caracterização das Amostras

Os ensaios de caracterização das amostras foram todos realizados por Takeda (2005) e Viana (2006).

Inicialmente, as amostras foram submetidas a ensaios de granulometria conjunta conforme a norma NBR 7181 – “Solos – Análise Granulométrica”, para a determinação de suas curvas granulométricas. Posteriormente, foram realizados ensaios para a determinação dos limites de Atterberg, segundo as normas NBR 6459 – “Solo – Determinação do Limite de Liquidez” e NBR 7180

– “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade”. Desta forma, as amostras puderam ser classificadas conforme as classificações tradicionais USCS e HRB. Também foi determinada a massa específica dos sólidos (NBR 6508 – “Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da Massa Específica”).

Os resultados dos ensaios de granulometria conjunta dos solos utilizados nesta pesquisa são apresentados na **Tabela C.1** do Anexo C. Os limites de consistência e a classificação destes solos segundo a USCS e a HRB são apresentados na **Tabela D.1** do Anexo D.

3.4 Ensaios de Compactação

Além dos ensaios de caracterização, Takeda (2005) e Viana (2006), realizaram ensaios de compactação na energia normal para a determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima de cada amostra. Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma DER M 13-71 e seus resultados encontram-se na **Tabela E.1** do Anexo E.

3.5 Classificação MCT

As amostras também foram classificadas segundo a metodologia MCT por Takeda (2005). Para isto, foram realizados ensaios de Mini-MCV e de Perda de Massa por Imersão, conforme os procedimentos descritos pelas normas DNER - M 256-94 – “Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão” e DER – M 196-89 – “Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT”.

A classificação dos solos segundo a MCT e a distribuição das 38 amostras no gráfico MCT são apresentados no item 4.2 do Capítulo 4.

3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microfotografia tem sido uma ferramenta útil para identificar a presença de alguns argilosminerais e também da laterita na fração argila dos solos.

Takeda (2005) submeteu as 73 amostras de solos ao ensaio de microscopia eletrônica de varredura com a finalidade de se observar a microestrutura dos argilominerais presentes na fração fina dos solos. Dentre as 73 amostras utilizadas neste ensaio, estão os 38 solos estudados nesta pesquisa.

O aparelho utilizado nos ensaios de microscopia eletrônica foi o “*Digital Scanning Microscope – DSM 960 – Zeiss*” pertencente ao Instituto de Física de São Carlos/USP.

Para cada amostra ensaiada foram obtidas quatro microfotografias correspondentes aos aumentos de 10000, 5000, 3000 e 500 vezes. Porém segundo Takeda (2005), as imagens consideradas de melhor qualidade para a distinção entre os solos lateríticos e não lateríticos e para verificação dos argilosminerais presentes nestes solos foram as ampliações de 10000 e 3000 vezes.

As imagens das 38 amostras analisadas nesta pesquisa correspondentes as ampliações de 10000 e 3000 vezes encontram-se no Anexo F.

3.7 Difração de Raios-X (DRX)

Um recurso utilizado para a identificação dos argilominerais presentes na fração fina dos solos (porcentagem que passa na peneira n°200) é o ensaio de difração de raios-x.

Takeda (2005) e Viana (2006) realizaram ensaios de Difração de Raios-x para 38 amostras escolhidas para esta pesquisa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Difração de Raios-X do Instituto de Física de São Carlos/USP, utilizando-se o difratômetro automático (ânodo rotatório), RIGAKU ROTAFLEX, modelo RU-200B. O procedimento adotado observou varredura contínua de 5° a 70° e velocidade de 2°/minuto em amostras secas em estufas e usadas na forma de pó. Para maiores informações sobre os procedimentos adotados vide Takeda (2005).

3.8 Ensaios de Sucção

Takeda (2005) realizou ensaios de sucção para 30 amostras de solos sendo que dentre estes solos, 29 fazem parte desta pesquisa.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estradas da Escola de Engenharia de São Carlos e seus resultados encontram-se na **Tabela G.1** do Anexo G.

3.9 Método das Pastilhas (Nogami & Villibor, 1994b)

Os ensaios das pastilhas conforme o método de Nogami & Villibor (1994b) foram executados no Laboratório de Estradas da Escola de Engenharia de São Carlos.

Para a classificação dos solos segundo este método, as amostras são inicialmente destorroadas e passadas pela peneira 0,42 mm. Após o peneiramento, são separadas cerca de 30 gramas de cada amostra, sendo umedecidas com água destilada e espatuladas sobre uma placa de vidro esmerilhada por aproximadamente 8 minutos de maneira a obter-se uma pasta homogênea e com penetração de 1 mm medido através do minipenetrômetro (**Figura 3.2**).

Para cada uma das 38 amostras selecionadas, molda-se uma série de 3 corpos de prova em forma de pastilhas com dimensões de 20 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. Neste processo, utiliza-se papel filme sobre a bancada com o propósito de evitar que a pasta de solo possa aderir sobre a bancada, dificultando a moldagem dos corpos de prova.

A seguir, as pastilhas são secas por 12 horas em estufa à temperatura constante de 60°C. Quando o solo ensaiado é muito argiloso, após a moldagem, as pastilhas são colocadas para secar inicialmente ao ar livre para depois serem transferidas para a estufa. Este procedimento é realizado com a finalidade de evitar trincas durante o processo de secagem destes solos.

Após a secagem, retiram-se as pastilhas da estufa e com auxílio de um paquímetro são efetuadas as medidas de contração diametral. Em cada uma das pastilhas realizam-se 3 medidas de contração diametral, sempre girando a

pastilha a 60° entre uma medida e outra. Neste processo é aceitável uma variação de 0,2 mm entre as leituras. O valor da contração diametral (C_t) de cada pastilha é obtido através da média aritmética das três leituras realizadas.

Posteriormente, submete-se as pastilhas à reabsorção de água por um período de 2 horas. Para isto, as mesmas são colocadas sobre uma placa porosa saturada recoberta com papel filtro, também saturado, cuja superfície deve ser mantida sobre um nível de água constante. Transcorrido o tempo de reabsorção de água pelas pastilhas, são efetivadas as medidas de penetração através do minipenetrômetro.

Com o objetivo de tentar minimizar a influência do operador no processo de obtenção das medidas de penetração, adaptou-se o minipenetrômetro utilizado no procedimento original ao Penetrômetro Marshall para asfaltos, conforme ilustra a **Figura 3.2**.

Figura 3.2 - Minipenetrômetro para a determinação das leituras de penetração e detalhe da agulha e anéis utilizados para moldagem das pastilhas

Na **Figura 3.3** observa-se um exemplo de três amostras com diferentes contrações após a secagem em estufa e também as diferentes expansões destas amostras após a reabsorção de água.

Figura 3.3 - Contração e expansão das pastilhas após secagem e absorção de água respectivamente, destacando o comportamento de 3 solos distintos

3.10 Método das Pastilhas (Godoy & Bernucci, 2002)

Os ensaios de classificação dos solos pelo Método das Pastilhas, segundo o procedimento de Godoy & Bernucci (2002), foram executados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Assim como no procedimento de Nogami e Villibor (1994b), para os 38 solos são moldadas uma série de 3 corpos de prova em forma de pastilhas, porém com dimensões de 35mm de diâmetro e 10mm de espessura, ao invés de 20 x 5mm.

O procedimento de preparação da amostra (peneiramento e espatulação) é similar ao método apresentado no item 3.8, porém, difere na quantidade de amostra utilizada, que neste caso é de aproximadamente 100 gramas.

As determinações do ponto de moldagem das pastilhas e as medidas de penetração após a reabsorção de água são realizadas através do minipenetrômetro apresentado na **Figura 3.4**. O ponto de moldagem deve coincidir com penetração de 5mm do cone de 60g, determinada após o processo de espatulação da amostra, conforme ilustra a **Figura 3.5**.

O processo de secagem e a obtenção das medidas de contração são semelhantes aos procedimentos descritos no método de Nogami e Villibor (1994b), entretanto o tempo de secagem das pastilhas neste caso é de 5 horas e meia.

Figura 3.4 - Minipenetrômetro utilizado na determinação das medidas de umidade de moldagem e de penetração, e a direita o detalhe do conjunto de cones que compõe o equipamento

Figura 3.5 - A) Exemplo da utilização do cone de 60g acoplado ao minipenetrômetro para determinação do ponto de moldagem de uma amostra de solo; B) detalhe do cone.

Posteriormente, as pastilhas são depositadas sobre uma placa porosa recoberta com papel filtro, ambos saturados e sobre um nível de água constante. Em um dos corpos de prova retira-se o anel de aço inox e transcorrido o tempo de reabsorção de água realiza-se a medida de expansão da pastilha.

Após 3 horas de reabsorção de água e a realização das medidas de expansão, executa-se as medidas de penetração em cada uma das pastilhas com os cones de 10 e 30 gramas, respectivamente.

A **Figura 3.6** apresenta dois solos com comportamento distintos no tocante a contração e expansão.

Figura 3.6 - Exemplo de contração e expansão de dois solos que apresentaram comportamentos distintos

3.11 O Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno (Fabbri, 1994)

Os ensaios de adsorção de azul de metileno foram realizados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos.

Os 38 solos são preparados segundo o procedimento recomendado, sendo secos ao ar, destorroados, peneirados a seco na peneira de malha 0,075mm e acondicionados em sacos plásticos. Posteriormente determina-se os teores de umidade de cada amostra estudada.

A **Figura 3.7** mostra os equipamentos utilizados na execução do ensaio.

Após a preparação dos solos e da solução padrão de azul de metileno, pesa-se 1 grama de amostra colocando-a em um becker juntamente com 100 ml de água destilada.

O becker contendo a água e o solo é levado ao agitador magnético onde, através de uma bureta graduada contendo a solução padrão de azul de metileno, é adicionado 1ml da solução. Transcorrido o tempo de 1 minuto, sem

desligar o agitador, é capturada uma gota da suspensão contida no becker que é depositada sobre a superfície do papel filtro. Este procedimento é repetido a cada 1 minuto até o aparecimento de uma aura azul esverdeada ao redor de um núcleo escuro. Ocorrido este fato, aguarda-se por mais 1 minuto sem acrescentar a solução padrão de azul de metileno, e novamente captura-se uma gota da suspensão, que é depositada sobre o papel filtro. Após este procedimento, aguarda-se mais 5 minutos e verifica-se se a mancha permanece no papel filtro.

Figura 3.7 - Equipamento utilizado na execução do ensaio de azul de metileno

No caso de persistência da mancha anota-se o valor de volume da solução de azul introduzido na suspensão e o ensaio para a amostra em questão foi finalizado.

Quando a mancha não persiste, o procedimento deste ensaio é repetido até que ocorra o ponto de viragem indicando excesso do corante azul de metileno na solução água, solo e corante.

A **Figura 3.8** destaca duas situações, antes e após ocorrer o ponto de viragem de uma amostra de solo, onde a mancha sobre o papel filtro após o ponto de viragem apresenta uma aura azulada ou esverdeada ao redor do núcleo escuro da mancha.

Figura 3.8 - Exemplo do ponto de viragem de uma amostra de solo

3.12 Permeabilidade dos Solos

Os ensaios de permeabilidade compreendem duas etapas, sendo a primeira etapa a preparação das amostras e compactação dos corpos de prova, e a segunda etapa o ensaio propriamente dito.

A primeira etapa foi realizada no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos e a segunda etapa foi executada no Laboratório de Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos.

3.12.1 Compactação dos Corpos de Prova

As amostras utilizadas nestes ensaios são secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de malha 2,00 mm.

Os corpos de prova são compactados em cilindros metálicos de 50mm de diâmetro e 130 mm de altura utilizando-se o compactador miniatura conforme descrito na norma DNER – ME 258/94 "Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini -MCV".

A compactação das amostras se dá a um volume constante, de forma que o corpo de prova fique no centro do cilindro e possua dimensões iguais a 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Sendo assim, a massa de solo utilizada em cada amostra é variável e a altura do corpo de prova permanece constante.

Para cada amostra analisada são confeccionados três corpos de prova compactados dinamicamente na energia equivalente ao proctor normal.

Os corpos de prova são moldados na umidade ótima e massa específica seca máxima, aceitando-se um desvio máximo de $\pm 0,5$ % da umidade ótima e de ± 1 % no grau de compactação.

3.12.2 Ensaio de Permeabilidade

Este ensaio foi adaptado da metodologia MCT, onde o próprio cilindro utilizado nos ensaios do Mini-MCV, é empregado como um permeâmetro de parede rígida.

Conforme em Macambira (2002), a principal adaptação realizada é a forma de vedação do corpo de prova. Após a compactação do solo, fecha-se o cilindro nas duas extremidades, com rolhas perfuradas de borracha, colocando-se uma pequena camada de pedregulhos entre a rolha e o corpo de prova.

Com a finalidade de evitar o entupimento da saída de água pelos pedregulhos, as camadas deste material são intercaladas com membranas de geotêxtil. O esquema de montagem do corpo de prova para o ensaio de permeabilidade pode ser observado na **Figura 3.9**.

Os corpos de prova são acomodados horizontalmente em bandejas metálicas sendo então submetidos a um fluxo de água até a saturação. Considera-se que a saturação se dá no instante em que o fluxo de água passante pelo corpo de prova torna-se constante, o que é verificado através da observação de gotejamento na extremidade de saída de água.

De acordo com a norma: "Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável (NBR 14545)", solos que apresentem quantidade superior a 10 % em massa, de material que passa na peneira de malha igual a 0,075 mm devem ser ensaiados à carga variável. Logo, todos os solos estudados nesta pesquisa foram ensaiados à carga variável.

Figura 3.9 - Modelo do arranjo do corpo de prova utilizado nos ensaios de permeabilidade

O tempo entre as leituras efetuadas na coluna de água do permeâmetro é variável de amostra para amostra de tal maneira que, entre as leituras, seja possível obter uma diferença mínima de 1 mm.

A **Figura 3.10** apresenta o equipamento utilizado para a execução do ensaio de permeabilidade.

Figura 3.10 - Equipamento utilizado para realização dos ensaios de permeabilidade

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Os resultados apresentados neste capítulo dizem respeito aos ensaios de classificação realizados para a identificação do comportamento laterítico ou não laterítico de solos distribuídos em diferentes regiões do Estado de São Paulo. Complementarmente, também serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de permeabilidade e de sucção realizados para estes solos.

Como já descrito no Capítulo 3, o programa de ensaios desenvolvido neste trabalho de pesquisa foi dividido em duas etapas: Classificação dos Solos e Determinação do Coeficiente de Permeabilidade.

Em um primeiro momento, para as 38 amostras estudadas serão exibidos os resultados da classificação MCT segundo Nogami & Villibor (1981) e Vertamatti (1988). Em seguida, para estes mesmos solos, são expostos os resultados dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-x (DRX). Em seguida, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de Adsorção de Azul de Metileno e Método das Pastilhas segundo os procedimentos de Nogami & Villibor (1994b) e Godoy & Bernucci (2002). Nesta etapa, a Classificação MCT e os demais métodos de classificação de solos aplicados aos solos estudados serão confrontados e analisados a fim de verificar a compatibilidade entre os métodos de classificações de solos.

Posteriormente são relacionados os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade, buscando-se relações entre a gênese e as características físicas destes solos e seu coeficiente de permeabilidade.

Finalmente, são apresentados os resultados dos ensaios de sucção também se relacionando este parâmetro com a gênese e as características físicas dos materiais estudados.

4.2 Resultados da Classificação MCT

A **Figura 4.1**, destacada de Takeda (2005), mostra o ábaco de classificação MCT com a indicação da posição dos setenta e três solos pertencentes ao universo preliminar das amostras coletadas.

Figura 4.1 - Ábaco de classificação MCT com indicação dos setenta e três solos coletados

A **Figura 4.2** apresenta o mesmo ábaco de classificação MCT (Nogami & Villibor, 1981) apontando as regiões onde se encontram distribuídos, dentre os setenta e três solos observados na **Figura 4.1**, os trinta e oito solos selecionados para a presente pesquisa. As amostras são identificadas através da numeração correspondente à ordem de coleta.

Conforme Takeda (2005), com a finalidade de facilitar a interpretação e análise dos resultados, promoveu-se a renomeação das amostras conforme

apresentado na **Tabela 4.1**, onde são indicados os solos com a nova designação empregada.

Figura 4.2 - Ábaco de classificação MCT com a indicação dos trinta e oito solos utilizados nesta pesquisa

Tabela 4.1 - Indicação da nomenclatura dos 38 solos selecionados (Takeda, 2005)

Designação da Amostra			
Original	Nova	Original	Nova
76	1L	48	12La
85	1N	91	12Lb
11	2L	78	12N
17	2N	25	13L
89	3N	22	13Na
50	4L	34	13Nb
81	5N	67	14L
60	6L	39	14N
55	6N	71	15L
30	7La	65	15Na
57	7Lb	86	15Nb
27	7N	28	16L
46	8L	80	17L
88	9L	82	18L
21	10L	32	19N
77	10N	33	20N
38	11L	36	21N
53	11N	43	22N
		62	23N
		75	24N

Observando-se a **Tabela 4.1** verifica-se que as amostras que formam trincas ou pares granulométricos receberam o mesmo número acrescido da letra “L”, indicando o comportamento laterítico segundo a Classificação MCT, ou da letra “N”, indicando comportamento não laterítico conforme a MCT.

A **Figura 4.3** mostra o ábaco de classificação MCT com a distribuição dos trinta e oito solos estudados nesta pesquisa onde cada solo é nomeado conforme indicado na **Tabela 4.1**.

Figura 4.3 - Ábaco de classificação MCT com a indicação dos trinta e oito solos com sua nova designação

A **Tabela 4.2** expõe a quantidade de solos encontrados em cada classe MCT, separados segundo o comportamento laterítico ou não laterítico.

Tabela 4.2 - Distribuição dos solos nas classes MCT

LATERÍTICOS			NÃO LATERÍTICOS		
Classe MCT	Quantidade de solos	Porcentagem (%)	Classe MCT	Quantidade de solos	Porcentagem (%)
LA	2	5	NA	1	3
LA'	7	18	NA'	5	13
LG'	9	24	NG'	10	26
			NS'	4	11
Total	18	47	Total	20	53

Analisando-se a **Figura 4.3** e a **Tabela 4.2**, verifica-se que das trinta e oito amostras selecionadas, dezoito, ou seja, 47% do total, são identificadas como solos de comportamento laterítico, sendo que, dois (5% do total) são classificados como areias lateríticas (LA), sete (18% do total) são classificados como lateríticos arenosos (LA') e nove (24% do total) são classificados como lateríticos argilosos (LG').

Os demais solos, ou seja, 53% do total, são classificados como não lateríticos. Dentre estes, um (3% do total) é classificado como areia laterítica (NA), cinco (13% do total) são classificados como não lateríticos arenosos (NA'), dez (26% do total) são classificados como não lateríticos argilosos (NG') e quatro (11% do total) são classificados como não lateríticos siltosos (NS').

A **Figura 4.4** mostra os trinta e oito solos posicionados no gráfico de classificação MCT-M proposto por Vertamatti (1988).

Figura 4.4 - Gráfico de classificação MCT-M com a indicação dos trinta e oito solos estudados

Segundo Vertamatti e Araújo (2002), os solos lateríticos seriam solos tropicais muito bem desenvolvidos e com alta concentração de ferro e alumínio, enquanto os solos não lateríticos seriam solos pouco desenvolvidos, mantendo

características da rocha original. Os solos transicionais estariam em um estágio intermediário de evolução entre os lateríticos e os não lateríticos.

A **Tabela 4.3** indica a distribuição dos solos em cada uma das classes MCT-M e a porcentagem correspondente em relação ao total de solos estudados.

Tabela 4.3 - Distribuição dos solos nas classes MCT-M e MCT

Comportamento dos solos	Classe MCT-M	Quantidade de solos	Porcentagem (%)	Classe MCT	Quantidade de solos	Porcentagem (%)
Lateríticos	LA	2	5	LA	2	5
	LA'	4	11	LA'	7	18
	LA'G'	2	5	----	----	----
	LG'	0	0	LG'	9	24
	Total	8	21	Total	18	47
Transicionais	TA'	4	11	----	----	----
	TA'G'	6	16	----	----	----
	TG'	6	16	----	----	----
	Total	16	42	----	----	----
Não Lateríticos	NA	1	3	NA	1	3
	NS'	0	0	NS'	4	11
	NS'G'	7	18	NA'	5	13
	NG'	6	16	NG'	10	26
	Total	14	37	Total	20	53

Analisando-se a **Figura 4.4** e a **Tabela 4.3**, observa-se que dentre os dezoito solos classificados como lateríticos (LA, LA' E LG') pela MCT, apenas oito mantém o caráter laterítico segundo a classificação MCT-M. Da mesma forma, dentre os vinte solos não lateríticos (NA, NA' NS' e NG') classificados pela MCT, apenas quatorze mantém este caráter (não laterítico) conforme a MCT-M.

Os demais solos que complementam os dois grupos (lateríticos e não lateríticos) da MCT, respectivamente dez e seis, representam 42% da amostragem total e são classificados como transicionais conforme a classificação MCT-M.

4.3 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Conforme comentado no Capítulo 3, as setenta e três amostras coletadas por Takeda (2005) foram submetidas a ensaios de microscopia

eletrônica de varredura com a finalidade de identificar padrões de imagem que pudessem distinguir os solos segundo sua gênese laterítica ou não laterítica.

Como já discorrido no Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, os solos que apresentam comportamento laterítico caracterizam-se por possuírem a sua fração argila constituída pelo argilomineral caulinita. Estes solos ainda contêm na sua composição elevada porcentagem de óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio que recobrem a caulinita conferindo ao conjunto um aspecto “cimentado”. Segundo Nogami & Villibor (1995), no caso dos solos saprolíticos, os argilominerais e, eventualmente, outros minerais presentes não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de Fe e Al, como no caso dos solos lateríticos. Os contornos dos argilominerais que os constituem podem ser distinguidos com nitidez nas imagens obtidas na microscopia eletrônica por varredura.

Seguindo estas premissas, as imagens dos 38 solos estudados nesta pesquisa, foram analisadas buscando-se identificar padrões condizentes com os apresentados por Nogami & Villibor (1995), e que permitiriam identificar o caráter laterítico ou não laterítico dos solos. Ou seja, para os solos lateríticos espera-se encontrar imagens com um aspecto cimentado e para os solos não lateríticos, uma imagem distinta do aspecto cimentado dos solos lateríticos.

Identificados os aspectos destacados anteriormente, o resultado obtido é comparado com a indicação fornecida pela classificação MCT, podendo ou não confirmá-la.

Como já comentado no item 3.6 do Capítulo 3, as imagens dos 38 solos analisados encontram-se no Anexo F. As **Figuras 4.5 e 4.6** mostram respectivamente exemplos de solos que apresentam padrões típicos de materiais que passaram ou não pelo processo de laterização. Estas imagens foram destacadas do Anexo F.

A **Tabela 4.4** mostra os resultados das análises realizadas através da observação das imagens obtidas nos ensaios de MEV.

Analisando-se a **Tabela 4.4**, observa-se que segundo as microfotografias, 19 amostras apresentaram gênese laterítica e 19 apresentaram gênese não laterítica.

Padrões encontrados em solos lateríticos

Amostra 17L - LA

Amostra 09L - LA'

Amostra 08L - LA'

Amostra 15L - LG'

Amostra 07Lb LG'

Amostra 12Lb - LG'

Figura 4.5 - Imagens microscópicas de solos que apresentam comportamento laterítico (aumento de 3000x)

Padrões encontrados em solos não lateríticos

Amostra 10N - NG'

Amostra 19N - NG'

Amostra 01N - NA'

Amostra 05N - NA'

Amostra 24N NS'

Amostra 20N - NS'

Figura 4.6 - Imagens microscópicas de solos que apresentam comportamento não laterítico (aumento de 3000x)

Tabela 4.4 - Resultados das análises realizadas a partir da observação de imagens obtidas nos ensaios de MEV

Indicações das gêneses Amostra dos solos inferidas a partir dos ensaios de MEV		Indicações das gêneses Amostra dos solos inferidas a partir dos ensaios de MEV	
1L	Laterítico	12Lb	Laterítico
1N	Não Laterítico	12N	Não Laterítico
2L	Laterítico	13L	Laterítico
2N	Não Laterítico	13Na	Não Laterítico
3N	Não Laterítico	13Nb	Não Laterítico
4L	Laterítico	14L	Laterítico
5N	Não Laterítico	14N	Não Laterítico
6L	Laterítico	15L	Laterítico
6N	Não Laterítico	15Na	Não Laterítico
7La	Laterítico	15Nb	Não Laterítico
7Lb	Laterítico	16L	Laterítico
7N	Não Laterítico	17L	Laterítico
8L	Laterítico	18L	Laterítico
9L	Laterítico	19N	Não Laterítico
10L	Laterítico	20N	Não Laterítico
10N	Não Laterítico	21N	Não Laterítico
11L	Laterítico	22N	Não Laterítico
11N	Não Laterítico	23N	Laterítico
12La	Laterítico	24N	Não Laterítico

A **Tabela 4.5** mostra um resumo das relações entre as indicações fornecidas a partir dos ensaios de MEV e a classificação MCT para os solos estudados, apresentando o número de concordâncias e discordâncias observadas na comparação entre os dois ensaios e separadas em função da classe MCT.

Tabela 4.5 - Concordâncias e discordâncias observadas na comparação entre os resultados dos ensaios de MEV e a Metodologia MCT

LATERÍTICOS (MCT)				NÃO LATERÍTICOS (MCT)			
Classe MCT	Total de amostras	Concorda	Discorda	Classe MCT	Total de amostras	Concorda	Discorda
LA	2	2	0	NA	1	1	0
LA'	7	7	0	NA'	5	4	1
LG'	9	9	0	NG'	10	10	0
				NS'	4	4	0
Total	18	18	0	Total	20	19	1

Analisando-se a **Tabela 4.5** verifica-se que no caso de todos os solos classificados como lateríticos pela MCT, foram encontrados padrões de

imagem que indicam a presença de cimentação entre suas partículas, característica esta marcante dos solos lateríticos.

Ainda na **Tabela 4.5**, para os solos não lateríticos, observa-se a existência de discordância entre o comportamento indicado pela classificação MCT e os padrões de imagens obtidos. Do total de solos assim classificados, em 5% dos casos, ou seja, em apenas uma amostra, foram verificadas divergências entre os resultados.

A **Figura 4.7** mostra uma sobreposição dos gráficos das classificações MCT e MCT-M, destacando a posição do solo para o qual foi verificada divergência entre a análise dos resultados de MEV e a classificação MCT.

Analisando-se a **Figura 4.7**, observa-se que a amostra 23N, classificada como NA' pela MCT ($e' = 1,41$ e $c' = 0,69$), encontra-se em região muito próxima à linha de transição de comportamento da classificação MCT. Ainda em relação à amostra 23N, verifica-se que esta se encontra situada na faixa de solos transicionais do ábaco de classificação MCT-M.

Figura 4.7 - Sobreposição dos gráficos de classificação MCT e MCT-M destacando a amostra que apresentou divergência entre as indicações de MEV e a classificação MCT.

A **Figura 4.8** mostra as microfotografias da amostra 23N obtidas nos ensaios de MEV, onde se pode observar o aspecto cimentado que caracteriza a gênese relacionada à formação de solos lateríticos.

Figura 4.8 - Microfotografias da amostra 23N aumento de 3000 e 10000x respectivamente

É importante ressaltar que, mesmo quando possível, as imagens obtidas no ensaio de MEV não foram utilizadas na identificação dos tipos de argilominerais presentes nas amostras.

4.4 Ensaio de Difração de Raios-X (DRX)

Conforme apresentado no Capítulo 3, Takeda (2005) realizou ensaios de Difração de raios-x para trinta amostras de solos dentre as quais 29 fazem parte desta pesquisa. Este ensaio permite identificar os argilominerais que constituem a fração fina da amostra, separando-os segundo os grupos: caulinitas, ilitas ou smectitas.

Para os 29 solos analisados nesta etapa, a **Tabela 4.6** apresenta os grupos a que pertencem os argilominerais identificados, a presença ou não de óxidos e hidróxidos e a gênese do material inferida a partir da análise destes resultados.

Analisando-se a **Tabela 4.6** observa-se que nos solos que compõe o conjunto dos lateríticos apenas foram encontrados os grupos de argilominerais caulinita e gibisita. Para todas estas amostras identificou-se a presença de óxidos e/ou hidróxidos. Estas constatações corroboram com Nogami & Villibor

(1995), que afirmam que os solos lateríticos caracterizam-se por conter óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, e que o argilomineral geralmente presente é a caulinita, podendo ainda ser encontrado outros membros do grupo caulinita, como a haloisita e a nacrita.

Tabela 4.6 - Minerais encontrados nas amostras de solos selecionadas e a característica determinada pela constituição dos solos

Amostra	Minerais encontrados com a DRX		Característica inferida a partir da DRX
	Argilominerais (grupos)	Óxidos e/ou hidróxidos	
1L	Caulinita	Sim	Laterítico
1N	Ilita	Não	Não Laterítico
2L	Caulinita e gibsita	Sim	Laterítico
2N	Ilita e caulinita	Não	Não Laterítico
3N	Caulinita e ilita	Não	Não Laterítico
4L	Caulinita	Sim	Laterítico
5N	Caulinita e Ilita	Não	Não Laterítico
6L	Caulinita	Sim	Laterítico
6N	Ilita e caulinita	Não	Não Laterítico
7La	Caulinita	Sim	Laterítico
7Lb	Caulinita	Sim	Laterítico
7N	Caulinita	Não	Não Laterítico
8L	Caulinita	Sim	Laterítico
9L	Caulinita	Sim	Laterítico
10L	Caulinita e gibsita	Sim	Laterítico
10N	Ilita	Não	Não Laterítico
11L	Caulinita	Sim	Laterítico
11N	Ilita	Não	Não Laterítico
12La	Caulinita e gibsita	Sim	Laterítico
12Lb	Caulinita	Sim	Laterítico
12N	Ilita	Não	Não Laterítico
13L	Caulinita e gibsita	Sim	Laterítico
13Na	Caulinita e ilita	Não	Não Laterítico
13Nb	Ilita	Não	Não Laterítico
14L	Caulinita	Sim	Laterítico
14N	Caulinita	Não	Não Laterítico
15L	Caulinita e gibsita	Sim	Laterítico
15Na	Ilita e caulinita	Não	Não Laterítico
15Nb	Ilita	Não	Não Laterítico

Ainda na **Tabela 4.6** observa-se que para os solos que apresentaram comportamento não laterítico, identificou-se através da DRX, a presença de argilominerais mais ativos, como os do grupo das ilitas, isoladamente ou em

conjunto com argilominerais menos ativos como os do grupo das caulinitas. Para estes solos não foi constatada a presença de óxidos e/ou hidróxidos.

Neste caso, os resultados também corroboram com Nogami & Villibor (1995), segundo os quais os solos não lateríticos caracterizam-se pela possibilidade de ocorrerem argilominerais mais ativos do que os do grupo da caulinita, tais como os do grupo da smectita e illita.

Entretanto, estes solos também podem conter exclusivamente argilominerais do grupo da caulinita, ou predominância destes na sua constituição. Os argilominerais e, eventualmente, outros minerais presentes nestes solos, não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de ferro de alumínio, como ocorre nos solos lateríticos.

Destaca-se que na análise dos materiais que apresentaram argilominerais do grupo da caulinita, sem a identificação da presença de óxidos e hidróxidos, assumiu-se que os solos seriam não lateríticos.

A **Tabela 4.7** mostra um resumo das relações entre as características inferidas a partir da DRX, dos resultados obtidos pela classificação MCT e das indicações do comportamento dos solos fornecidas a partir dos ensaios de MEV.

Analisando-se a **Tabela 4.7**, observa-se que a comparação entre a gênese obtida a partir da análise dos resultados dos ensaios de DRX e o comportamento previsto pela classificação MCT e pelos ensaios de MEV mostra concordância entre os mesmos para 29 solos estudados nesta etapa. Destaca-se, entretanto, que a amostra 23N, para a qual foi observada discordância entre as indicações da MCT e MEV, não foi submetida aos ensaios de DRX.

Tabela 4.7 - Relações entre os resultados obtidos a partir dos ensaios de DRX, MCT e MEV

Amostra	Característica inferida a partir da DRX	Comportamento do solo segundo a MCT	Característica inferida a partir da MEV
1L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
1N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
2L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
2N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
3N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
4L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
5N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
6L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
6N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
7La	Laterítico	Laterítico	Laterítico
7Lb	Laterítico	Laterítico	Laterítico
7N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
8L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
9L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
10L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
10N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
11L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
11N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
12La	Laterítico	Laterítico	Laterítico
12Lb	Laterítico	Laterítico	Laterítico
12N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
13L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
13Na	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
13Nb	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
14L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
14N	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
15L	Laterítico	Laterítico	Laterítico
15Na	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico
15Nb	Não Laterítico	Não Laterítico	Não Laterítico

4.5 Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno proposto por Fabbri (1994) permite identificar o caráter laterítico dos solos tropicais. Conforme detalhado no Capítulo 2, são necessários dois parâmetros para a caracterização da fração fina dos solos por este método, a saber: o valor de azul (V_a), e a porcentagem de argila, definida na peneira 0,005mm.

A **Tabela 4.8** mostra os valores calculados de V_a , CA e a caracterização da atividade dos argilominerais bem como seu comportamento segundo o ensaio de adsorção de azul de metileno.

Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de azul de metileno com a indicação da atividade dos argilominerais e seu comportamento

Amostra	*V (ml)	Valor de azul (V_a)	Coefficiente de atividade (CA)	Atividade dos argilominerais	Característica dos solos segundo os ensaio de azul
1L	5,0	1,7	10,5	Pouco ativos	Laterítico
1N	12,0	4,1	24,9	Ativos	Não Laterítico
2L	4,0	1,3	5,1	Pouco ativos	Laterítico
2N	10,0	3,8	13,4	Ativos	Não Laterítico
3N	8,0	1,2	15,0	Ativos	Não Laterítico
4L	5,0	1,1	9,3	Pouco ativos	Laterítico
5N	6,0	2,0	11,7	Ativos	Não Laterítico
6L	5,0	2,0	9,3	Pouco ativos	Laterítico
6N	13,0	4,9	31,7	Ativos	Não Laterítico
7La	3,0	1,2	4,3	Pouco ativos	Laterítico
7Lb	9,0	4,2	17,1	Ativos	Não Laterítico
7N	8,0	4,1	14,5	Ativos	Não Laterítico
8L	4,0	1,5	6,6	Pouco ativos	Laterítico
9L	3,0	1,2	4,3	Pouco ativos	Laterítico
10L	4,0	2,8	6,0	Pouco ativos	Laterítico
10N	19,0	14,0	29,0	Ativos	Não Laterítico
11L	6,0	4,0	9,7	Pouco ativos	Laterítico
11N	20,0	14,7	30,1	Ativos	Não Laterítico
12La	5,0	4,0	6,9	Pouco ativos	Laterítico
12Lb	6,0	1,9	4,0	Pouco ativos	Laterítico
12N	19,0	15,4	34,3	Ativos	Não Laterítico
13L	4,0	3,6	9,3	Pouco ativos	Laterítico
13Na	9,0	9,2	21,2	Ativos	Não Laterítico
13Nb	10,0	9,4	25,8	Ativos	Não Laterítico
14L	7,0	7,4	9,3	Pouco ativos	Laterítico
14N	4,0	4,3	5,1	Pouco ativos	Laterítico
15L	3,0	2,9	5,0	Pouco ativos	Laterítico
15Na	6,0	5,7	10,5	Pouco ativos	Laterítico
15Nb	26,0	23,2	38,4	Ativos	Não Laterítico
16L	4,0	1,4	6,6	Pouco ativos	Laterítico
17L	5,0	1,4	9,2	Pouco ativos	Laterítico
18L	3,0	1,2	7,3	Pouco ativos	Laterítico
19N	7,0	5,8	15,9	Ativos	Não Laterítico
20N	5,5	3,2	16,9	Ativos	Não Laterítico
21N	6,0	4,3	61,8	Ativos	Não Laterítico
22N	15,0	4,5	47,3	Ativos	Não Laterítico
23N	5,0	2,1	15,4	Ativos	Não Laterítico
24N	13,0	6,7	35,6	Ativos	Não Laterítico

* V = volume de corante adicionado à suspensão

Analisando-se a **Tabela 4.8** observa-se que 19 amostras apresentaram Coeficiente de Atividade (CA) menor que 11, indicando a presença de argilominerais pouco ativos e consequentemente sendo caracterizado como laterítico.

Ainda na **Tabela 4.8**, verifica-se que para as demais 19 amostras o Coeficiente de Atividade (CA) encontra-se no intervalo entre 11 e 80, indicando a presença de argilominerais ativos e assim comportamento não laterítico.

Dentre as 38 amostras ensaiadas, não foram detectados solos com argilominerais muito ativos ($CA > 80$) como os do grupo das smectitas, resultado este compatível com as indicações obtidas a partir dos ensaios de difração de raios-x.

A **Tabela 4.9** apresenta o comportamento dos solos determinado pelos ensaios de azul de metileno, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-x e pela classificação MCT destacando as discordâncias encontradas entre os ensaios.

Analisando-se a **Tabela 4.9**, observa-se que em 4 amostras ocorreram incongruências entre os resultados.

No caso da amostra 23N, houve divergência entre os resultados do ensaio de azul e as indicações de imagens obtidas nos ensaios de MEV. Porém em relação a MCT houve concordância entre os resultados, embora no gráfico de classificação MCT-M esta amostra situa-se na faixa de solos transicionais. Como destacado anteriormente, para esta amostra não foi realizada a DRX.

Em relação às amostras 7Lb, 14N e 15Na, houve discordâncias entre as indicações obtidas pelos ensaios de azul de metileno e os demais ensaios.

A **Figura 4.9** ilustra o ábaco para caracterização da atividade da fração argila dos solos com a indicação da localização das 38 amostras ensaiadas, destacando as três amostras cujos resultados dos ensaios de azul de metileno discordaram totalmente dos resultados dos demais ensaios.

Tabela 4.9 - Comparação entre os resultados de azul de metileno, MEV, DRX e a classificação MCT

Amostra	Características inferidas aos solos			Classificação	Concordância entre os ensaios
	Azul de metileno	MEV	DRX	MCT	
1L	L	L	L	L	Total
1N	NL	NL	NL	NL	Total
2L	L	L	L	L	Total
2N	NL	NL	NL	NL	Total
3N	NL	NL	NL	NL	Total
4L	L	L	L	L	Total
5N	NL	NL	NL	NL	Total
6L	L	L	L	L	Total
6N	NL	NL	NL	NL	Total
7La	L	L	L	L	Total
7Lb	NL	L	L	L	Parcial
7N	NL	NL	L/NL	NL	Total
8L	L	L	L	L	Total
9L	L	L	L	L	Total
10L	L	L	L	L	Total
10N	NL	NL	NL	NL	Total
11L	L	L	L	L	Total
11N	NL	NL	NL	NL	Total
12La	L	L	L	L	Total
12Lb	L	L	L	L	Total
12N	NL	NL	NL	NL	Total
13L	L	L	L	L	Total
13Na	NL	NL	NL	NL	Total
13Nb	NL	NL	NL	NL	Total
14L	L	L	L	L	Total
14N	L	NL	L/NL	NL	Parcial
15L	L	L	L	L	Total
15Na	L	NL	NL	NL	Parcial
15Nb	NL	NL	NL	NL	Total
16L	L	L	*	L	Total
17L	L	L	*	L	Total
18L	L	L	*	L	Total
19N	NL	NL	*	NL	Total
20N	NL	NL	*	NL	Total
21N	NL	NL	*	NL	Total
22N	NL	NL	*	NL	Total
23N	NL	L	*	NL	Parcial
24N	NL	NL	*	NL	Total

(L – Laterítico; NL – Não Laterítico; * ensaios não realizados para estas amostras).

Figura 4.9 - Ábaco para caracterização da fração argila dos solos

Dentre as três discordâncias observadas, a referente à amostra 7Lb corresponde a um solo classificado como laterítico pela MCT e caracterizado como ativo (não laterítico) pelo ensaio de azul. Neste caso, o valor de e' igual a 1,11 coloca a amostra muito próxima da transição entre os solos de comportamento laterítico e não laterítico segundo a MCT, o que poderia levar à incongruência entre os resultados. Em relação a MCT-M este material encontra-se situado na faixa de solos transicionais do ábaco utilizado nesta classificação (**Figura 4.4**).

Porém, a incongruência observada acima se mantém incontestável quando são considerados os resultados dos ensaios de DRX e MEV, pois a amostra 7Lb apresenta em sua composição o argilomineral caulinita além de óxidos e hidróxidos e as imagens obtidas nos ensaios de MEV (vide Anexo F) mostram um aspecto característico dos solos que passaram pelo processo de laterização.

Quanto às outras duas discordâncias, amostras 14N e 15Na, estas correspondem a solos classificados como não lateríticos pela MCT, MCT-M e

pelos ensaios de MEV, mas apresentam na sua constituição, segundo o ensaio de azul, argilominerais pouco ativos.

No caso da amostra 15Na, o CA é igual a 10,5, valor este muito próximo do limite (11) que separa os argilominerais ativos dos pouco ativos. Para a amostra 14N, o valor de CA é igual a 5,1, posicionando a amostra na região de solos pouco ativos e distante do limite destacado anteriormente. Entretanto, analisando-se os resultados dos ensaios de DRX (vide **Tabela 4.6**), observa-se que esta amostra apresenta apenas argilominerais do grupo das caulinitas (como nos solos lateríticos), mas em contrapartida não foi detectada a presença de óxidos e hidróxidos nesta amostra.

4.6 Método das Pastilhas (Nogami & Villibor, 1994b)

Conforme detalhado no Capítulo 3, para os 38 solos estudados, foram realizados os ensaios de classificação pelo método das pastilhas segundo dois procedimentos distintos: o de Nogami & Villibor (1994b) e o de Godoy & Bernucci (2002).

Para a classificação dos solos segundo o procedimento proposto por Nogami & Villibor (1994b), são necessários dois parâmetros: a contração e a penetração. A **Tabela 4.10** mostra os valores de contração e penetração obtidos nos ensaios das pastilhas segundo o procedimento destacado anteriormente, bem como a classificação dos solos segundo este método. E a **Figura 4.10** apresenta o ábaco de classificação do método das pastilhas com a distribuição das 38 amostras pesquisadas.

Analisando-se a **Tabela 4.10** e a **Figura 4.10**, observa-se que dentre os 38 solos ensaiados por este método, 13 amostras (aproximadamente 34% do total de ensaiado) apresentaram comportamento laterítico e 25, ou 66% apresentaram comportamento não laterítico.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios das pastilhas segundo o método de Nogami & Villibor (1994b)

Amostra	Resultados dos ensaios das pastilhas (Nogami & Villibor)			Classificação dos solos
	Contração (mm)	Coefficiente c'	Penetração (mm)	
1L	0,6	0,9	3,8	NA / NS'
1N	1,0	1,4	5,9	NS' - NG'
2L	1,1	1,5	0,9	LA' - LG'
2N	1,5	1,7	3,4	NG'
3N	0,0	0,0	0,0	NA
4L	0,2	0,4	1,0	LA
5N	0,3	0,5	3,1	NA
6L	0,7	1,1	2,5	NA' - NS'
6N	0,4	0,7	4,9	NS' - NA'
7La	1,0	1,4	1,2	LA' - LG'
7Lb	1,1	1,5	2,8	NA' / (NG' - NS')
7N	1,7	1,8	4,0	NG'
8L	0,6	1,0	2,1	NA' - NS'
9L	0,9	1,3	0,4	LA' - LG'
10L	2,1	2,0	0,0	LG'
10N	2,8	2,3	5,2	NG'
11L	2,0	2,0	0,0	LG'
11N	2,2	2,1	2,8	NG'
12La	1,6	1,8	0,0	LG'
12Lb	1,6	1,8	0,0	LG'
12N	2,8	2,3	5,2	NG'
13L	2,0	2,0	0,0	LG'
13Na	3,3	2,4	2,9	NG'
13Nb	2,2	2,1	3,8	NG'
14L	2,5	2,2	0,0	LG'
14N	2,6	2,2	2,6	NG'
15L	1,8	1,9	0,0	LG'
15Na	1,9	2,0	3,7	NG'
15Nb	2,2	2,1	6,4	NG'
16L	0,6	1,0	3,2	NA' - NS'
17L	0,2	0,3	0,0	LA
18L	0,6	1,0	3,1	NA' - NS'
19N	1,5	1,7	5,1	NG'
20N	1,3	1,6	6,5	NS' - NG'
21N	0,7	1,1	6,5	NS' / NA'
22N	0,4	0,7	5,5	NS' - NA'
23N	0,2	0,4	0,9	LA
24N	1,2	1,6	5,7	NS' - NG'

Figura 4.10 - Ábaco de classificação do método das pastilhas (Nogami & Villibor, 1994b) com a distribuição das 38 amostras estudadas

A **Tabela 4.11** mostra a classificação dos solos segundo o método das pastilhas e a MCT, destacando se há ou não concordância entre os resultados.

Analisando-se a **Tabela 4.11**, pode-se observar que em sete amostras (aproximadamente 18% do total) ocorreram divergências entre os resultados dos ensaios das pastilhas e a MCT no tocante ao caráter laterítico dos solos.

A **Figura 4.11** ilustra o ábaco de classificação do método das pastilhas de Nogami e Villibor (1994b), destacando as amostras que apresentaram divergências entre os resultados das pastilhas e da MCT.

Dentre as sete discordâncias observadas entre as indicações das duas metodologias de classificação, seis situam-se entre solos classificados como lateríticos pela MCT. Na situação contrária, destaca-se apenas a amostra 23N, classificada como não laterítica pela MCT e que apresentou, segundo as pastilhas, comportamento laterítico.

No que diz respeito à amostra 23N, como já comentado anteriormente no item 4.3, vale ressaltar que embora tenha sido classificada como não laterítica pela MCT, o resultado do ensaio de MEV indica que este solo possui

características de um material que passou pelo processo de laterização (vide **Figura 4.8**), confirmando assim o resultado obtido pelo método das pastilhas.

Tabela 4.11 - Concordância entre os resultados das pastilhas e a MCT

Amostra	Classificação dos solos		Concordância entre resultados
	Pastilhas	MCT	
1L	NA / NS'	LA'	Não
1N	NS' - NG'	NA'	<i>Sim</i>
2L	LA' - LG'	LA'	<i>Sim</i>
2N	NG'	NA'	<i>Sim</i>
3N	NA	NA	<i>Sim</i>
4L	LA	LA	<i>Sim</i>
5N	NA	NA'	<i>Sim</i>
6L	NA' - NS'	LA'	Não
6N	NS' - NA'	NA'	<i>Sim</i>
7La	LA' - LG'	LG'	<i>Sim</i>
7Lb	NA'/(NG' - NS')	LG'	Não
7N	NG'	NG'	<i>Sim</i>
8L	NA' - NS'	LA'	Não
9L	LA' - LG'	LA'	<i>Sim</i>
10L	LG'	LG'	<i>Sim</i>
10N	NG'	NG'	<i>Sim</i>
11L	LG'	LG'	<i>Sim</i>
11N	NG'	NG'	<i>Sim</i>
12La	LG'	LG'	<i>Sim</i>
12Lb	LG'	LG'	<i>Sim</i>
12N	NG'	NG'	<i>Sim</i>
13L	LG'	LG'	<i>Sim</i>
13Na	NG'	NG'	<i>Sim</i>
13Nb	NG'	NG'	<i>Sim</i>
14L	LG'	LG'	<i>Sim</i>
14N	NG'	NG'	<i>Sim</i>
15L	LG'	LG'	<i>Sim</i>
15Na	NG'	NG'	<i>Sim</i>
15Nb	NG'	NG'	<i>Sim</i>
16L	NA' - NS'	LA'	Não
17L	LA	LA	<i>Sim</i>
18L	NA' - NS'	LA'	Não
19N	NG'	NG'	<i>Sim</i>
20N	NS' - NG'	NS'	<i>Sim</i>
21N	NS' / NA'	NS'	<i>Sim</i>
22N	NS' - NA'	NS'	<i>Sim</i>
23N	LA	NA'	Não
24N	NS' - NG'	NS'	<i>Sim</i>

Figura 4.11 - Abaco de classificação das pastilhas destacando as amostras que apresentaram divergências com a MCT

Com relação às amostras 1L e 7Lb, ambas possuem e' igual a 1,11 colocando-as muito próximas à linha de transição entre os solos de comportamento laterítico e não laterítico segundo a MCT (vide **Figura 4.3**), circunstância que poderia ter levado à divergência entre os resultados. Contudo, para ambas amostras, os resultados dos ensaios de DRX indicam a presença do argilomineral caulinita, óxidos e hidróxidos, característica marcante dos solos lateríticos. Além disso, as imagens obtidas através dos ensaios de MEV também indicam que estes solos passaram pelo processo de laterização. Assim, neste caso, os resultados fornecidos pelo método das pastilhas estariam incorretos.

Observando-se a **Tabela 4.11** e a **Figura 4.11**, verifica-se que a amostra 8L classificada como não laterítico pelas pastilhas e como laterítico pela MCT e pelos ensaios de MEV e DRX, apresentou penetração igual a 2,1 situando-a no ábaco de classificação das pastilhas praticamente na fronteira que separa o comportamento dos solos em laterítico e não laterítico. Neste caso, a imprecisão envolvida nas medidas de penetração pelo método das pastilhas poderia ter acarretado a incompatibilidade entre os resultados.

Os resultados obtidos nos ensaios das pastilhas para as amostras 6L, 16L e 18L discordaram dos resultados obtidos segundo a MCT e MEV, não havendo uma explicação que justifique tais divergências. Destaca-se que para a amostra 6L a previsão da MCT foi corroborada pelos ensaios de MEV e de DRX, sendo que, através deste último foi detectada neste solo a presença do argilomineral caulinita e de óxidos e hidróxidos. Nos casos das amostras 16L e 18L, não foram realizados os ensaios de DRX, porém o MEV também confirma a previsão da MCT.

4.7 Método das Pastilhas (Godoy & Bernucci, 2002)

Conforme já detalhado nos Capítulos 2 e 3, a classificação dos solos através deste método é realizado através do guia identificatório de solos tropicais proposto por Godoy & Bernucci (2002) (vide **Figura 2.4**). Os parâmetros necessários para a determinação do comportamento dos solos através deste método são: a contração, o inchamento, a penetração com os cones de 10 e 30 gramas e o índice de reabsorção de água.

A **Tabela 4.12** apresenta os valores destes parâmetros e a classificação dos solos segundo este método. Destaca-se, entretanto, que segundo os autores do método, Godoy e Bernucci (2002), existe a necessidade de uma reavaliação dos limites estabelecidos preliminarmente no guia identificatório utilizado para a classificação dos solos, que está no momento sendo revisto com base em resultados de análises complementares.

Analisando-se a **Tabela 4.12**, observa-se que, dentre os 38 materiais ensaiados por este método, para 10 amostras não foi possível realizar a classificação dos solos devido a inconsistências encontradas entre os valores de alguns parâmetros e os limites propostos pelo guia identificatório, a saber:

- As amostras 5N e 23N, segundo os valores de contração, penetração (cones de 10 e 30g) e índice de reabsorção poderiam ser classificadas como TA' (areias transicionais). Entretanto, os valores de inchamento de ambos materiais (15,7 e 16,3% respectivamente), não se enquadram no intervalo estabelecido no guia de identificação que é de 5,5 a 13%, impossibilitando a classificação para estes solos;

- Os valores de contração, inchamento e penetração das amostras 10N, 15Nb e 20N permitiriam classificar estes materiais como NG' (argiloso não laterítico). Porém, os valores do índice de reabsorção destes solos (0,2, 0,3 e 0,3, respectivamente) estão abaixo do limite proposto no guia para a classificação destes materiais;
- A amostra 11N apresenta valores de contração, penetração e índice de reabsorção que poderiam classificá-la como um solo LG' (argiloso laterítico). Todavia, o valor do inchamento, determinado para este material (12,6%) está fora do limite estabelecido no guia para estes materiais;
- Os valores de contração, inchamento e penetração (cones de 10 e 30g) da amostra 12N indicam que se trata de um solo TG' (transicional argiloso). Porém o valor obtido para o índice de reabsorção de água (0,2), está fora do intervalo de 0,3 a 0,9 proposto no guia para identificação deste grupo de solos;
- Os valores dos parâmetros contração, penetração (cones de 10 e 30g) e índice de reabsorção obtidos para a amostra 13Na permitiriam classificar este material como LG' (argiloso laterítico), entretanto o valor do inchamento está além do limite estabelecido no guia para identificação deste grupo de solos;
- Para a amostra 18L foram obtidos valores de contração, penetração (cones de 10g e 30g) e índice de reabsorção que inferem a este solo um comportamento TA' (transicional arenoso). Porém o valor do inchamento, embora muito próximo do limite, está fora do intervalo estabelecido aos solos deste grupo que apresentam inchamento entre 5,5 e 13,0%;
- No caso da amostra 19N os valores do índice de reabsorção de água e do inchamento divergem dos demais parâmetros que indicariam um comportamento argiloso não laterítico (NG') para este material.

Tabela 4.12 - Resultados dos ensaios das pastilhas segundo o método de Godoy & Bernucci (2002)

Amostra	Contração	Inchamento	Penet. com cones		Índice de reab.	Identificação
	(%)	(%)	10g	30g	de água	dos solos
1L	3,5	8,9	3,3	6,1	0,3	TA'
1N	5,1	11,3	4,6	8,5	0,4	NA'
2L	5,5	8,7	2,3	4,3	0,3	LA'
2N	8,5	8,3	3,3	5,4	0,1	LG'
3N	0,0	6,6	0,7	1,7	0,3	LA
4L	1,7	7,4	2,5	5,8	0,4	LA
5N	2,0	15,7	3,8	6,9	0,7	não det.
6L	2,9	0,8	0,3	1,3	-0,1	LA'
6N	2,6	14,7	5,1	9,0	0,8	NA'
7La	5,2	9,1	2,5	4,0	0,4	LA'
7Lb	5,6	9,6	2,2	4,7	0,3	LA'
7N	9,3	8,4	2,0	4,0	0,0	LG'
8L	5,2	8,9	2,6	5,3	0,4	LA'
9L	5,0	0,3	0,2	0,3	-0,3	LA'
10L	9,2	4,5	0,0	0,1	-0,3	LG'
10N	14,1	15,6	4,0	7,7	0,2	não det.
11L	9,1	1,0	0,0	0,3	-0,4	LG'
11N	11,9	12,6	1,9	4,7	0,1	não det.
12La	7,3	0,5	0,0	0,0	-0,4	LT OU LG'
12Lb	7,1	0,5	0,0	0,0	-0,3	LT OU LG'
12N	13,3	11,2	3,8	7,8	0,2	não det.
13L	7,7	1,6	0,0	0,0	-0,3	LG'
13Na	17,0	16,2	2,5	4,9	-0,1	não det.
13Nb	11,6	7,9	2,5	5,5	0,1	LG'
14L	12,8	3,7	0,3	1,8	-0,3	LG'
14N	14,0	6,6	0,7	2,8	-0,4	LG'
15L	6,9	0,6	0,0	0,0	-0,3	LT OU LG'
15Na	9,5	6,7	3,4	5,1	0,0	LG'
15Nb	12,7	18,7	5,8	9,7	0,3	não det.
16L	3,6	10,4	2,8	5,4	0,4	LA'
17L	1,1	8,2	1,6	5,2	0,5	LA
18L	2,9	13,3	4,8	7,8	0,6	não det.
19N	7,3	6,9	5,5	9,4	0,2	não det.
20N	6,1	16,1	4,3	8,6	0,3	não det.
21N	2,4	20,8	10,0	10,0	0,5	NA'
22N	2,0	11,9	4,5	7,7	0,7	TA
23N	1,5	16,3	3,7	6,1	0,8	não det.
24N	6,1	8,9	4,0	7,9	0,4	TG'

* não det. - Identificação dos solos não determinada através deste método.

Com relação às divergências destacadas anteriormente, vale ressaltar que o índice de reabsorção de água foi o principal parâmetro que impossibilitou a classificação de amostras argilosas (transicionais e não lateríticas).

No caso das amostras argilosas não lateríticas (10N, 15Nb, 19N e 20N), os valores deste parâmetro indicam que possivelmente o limite inferior mais apropriado para a classificação destes materiais (argilosos não lateríticos) seja de 0,2 e não de 0,4, como estabelecido no guia identificatório. Já o inchamento interferiu na classificação de materiais argilosos (lateríticos e não lateríticos) e arenosos (transicionais).

Desta forma, dentre as 28 amostras em que foi possível a aplicação do método para a classificação dos solos, 22 apresentaram comportamento laterítico, 3 comportamento transicional e 3 comportamento não laterítico. A **Tabela 4.13** mostra os resultados destes ensaios e os resultados correspondentes da classificação MCT, destacando as divergências entre as indicações observadas.

Analisando-se a **Tabela 4.13**, com relação ao comportamento laterítico ou não laterítico do solo, observa-se que dentre as 28 amostras classificadas pelo método das pastilhas de Godoy & Bernucci (2002) e pela MCT, em 22 casos (78,6%) houve concordância entre os resultados das duas metodologias de classificação, considerando-se que os solos transicionais segundo as pastilhas sejam concordantes com os resultados da MCT. Assim sendo, as inconsistências entre os ensaios poderiam ser creditadas aos limites estabelecidos preliminarmente no guia identificatório, que como já comentado anteriormente, estão em fase de revisão.

Tabela 4.13 - Comparação entre as classificações segundo o método das pastilhas de Godoy e Bernucci (2002) e a MCT

Amostra	Classificação dos solos		Concordância entre resultados
	Pastilhas - Godoy e Bernucci (2002)	MCT	
1L	TA'	LA'	Sim
1N	NA'	NA'	Sim
2L	LA'	LA'	Sim
2N	LG'	NA'	Não
3N	LA	NA	Não
4L	LA	LA	Sim
6L	LA'	LA'	Sim
6N	NA'	NA'	Sim
7La	LA'	LG'	Sim
7Lb	LA'	LG'	Sim
7N	LG'	NG'	Não
8L	LA'	LA'	Sim
9L	LA'	LA'	Sim
10L	LG'	LG'	Sim
11L	LG'	LG'	Sim
12La	LT ou LG'	LG'	Sim
12Lb	LT ou LG'	LG'	Sim
13L	LG'	LG'	Sim
13Nb	LG'	NG'	Não
14L	LG'	LG'	Sim
14N	LG'	NG'	Não
15L	LT ou LG'	LG'	Sim
15Na	LG'	NG'	Não
16L	LA'	LA'	Sim
17L	LA	LA	Sim
21N	NA'	NS'	Sim
22N	TA	NS'	Sim
24N	TG'	NS'	Sim

4.8 Classificação Resiliente dos Solos (DNER, 1996)

Como explicado no Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, a classificação resiliente (DNER, 1996) é fundamentada no conhecimento do módulo de resiliência dos solos (M_R). Na impossibilidade de se determinar o M_R , para os solos finos, ou seja, que apresentam mais de 35% em peso de material passante na peneira n°200, é possível se estimar a classificação indiretamente a partir da percentagem de silte, $S\%$, e do valor do CBR. Este processo é

realizado através da **Tabela 2.3**, apresentada no Capítulo 2, que separa estes materiais em solos do Tipo I, Tipo II e Tipo III.

Luz (2003) em sua dissertação de mestrado analisou resultados do ensaio CBR realizado em condições variadas de umidade pós-compactação para três pares de solos, sendo que dois pares ou 4 solos fazem parte da presente pesquisa. Estes materiais identificados pela autora através da numeração 1,2,5 e 6 correspondem respectivamente às amostras 2L, 2N, 13L e 13Nb aqui estudadas. Desta forma, para estas amostras foi possível realizar a classificação resiliente pelo método indireto devido ao fato da pesquisadora ter realizado os ensaios de CBR para estes materiais. Os valores do CBR e da porcentagem de silte são apresentados na **Tabela 4.14**, bem como sua classificação segundo este método.

Tabela 4.14 - Classificação resiliente dos solos

Amostra	% de silte	CBR	Classificação Resiliente
2L	9,15	23	Tipo I
2N	9,94	27	Tipo I
13L	44,23	14	Tipo II
13Nb	57,49	9	Tipo II

A **Tabela 4.15** apresenta as amostras destacadas anteriormente bem como sua classificação segundo a MCT e a classificação resiliente segundo o Manual do DNER (1996).

Tabela 4.15 - Resultados da classificação MCT e da classificação resiliente

Amostra	Classificação MCT	Classificação Resiliente
2L	LA'	Tipo I
2N	NA'	Tipo I
13L	LG'	Tipo II
13Nb	NG'	Tipo II

Analisando-se a **Tabela 4.15**, observa-se que, segundo a classificação resiliente, os solos 2L e 2N apresentaram comportamento tipo I, podendo ser utilizados em camadas de pavimentos, como subleito, reforço do subleito e sub-base, conforme discorrido no Capítulo 2. Ainda na **Tabela 4.15** verifica-se

que os solos 13L e 13Nb apresentaram comportamento tipo II, segundo a classificação em questão, apresentando comportamento regular quanto a resiliência para ser utilizado como subleito e reforço de subleito.

Segundo Nogami e Villibor (1995), os materiais 2L e 2N classificados como LA' e NA' respectivamente, apesar de apresentarem comportamentos distintos, podem ser utilizados em camadas de pavimentos como reforço do subleito e bases, dando-se preferência ao primeiro material por este possuir comportamento laterítico. A classificação MCT ainda estende a utilização destes solos em aterros compactados e revestimentos primários, como mostra a **Tabela A.1**, apresentada no Anexo A.

Desta forma, em relação às amostras 2L e 2N, pode-se observar que há um consenso entre a MCT e a classificação resiliente no tocante à utilização destes materiais em camadas de pavimentos.

Com relação ao material 13L, classificado como LG', a MCT possibilita sua utilização em camadas de pavimentos (reforço do subleito e base) além de aterros compactados, revestimentos primários, e proteção à erosão. Já a aplicação da amostra 13Nb, classificada como NG' se restringe a subleito e aterro compactado conforme a **Tabela A.1**.

Nenhuma dentre as quatro amostras analisadas, segundo a classificação resiliente, apresentou comportamento tipo III, ou seja, comportamento ruim quanto a resiliência sendo vedado seu emprego em camadas de pavimentos.

Para os pares estudados por Luz (2003), a classificação resiliente situa solos lateríticos e não lateríticos em classes coincidentes, não os distinguindo conforme suas respectivas gênese, pois, neste caso, solos pertencentes a um mesmo par possuem granulometrias e índice de suporte CBR muito próximos.

Takeda (2005) determinou os parâmetros de resiliência k_1 e k_2 das amostras 2L, 2N, 13L e 13Nb possibilitando o cálculo do módulo de resiliência (MR) e assim a classificação dos solos a partir do gráfico de classificação dos solos finos.

A **Tabela 4.16** apresenta os valores de k_1 e k_2 (na umidade ótima) determinados por Takeda (2005) e a **Figura 4.12** mostra o gráfico de

classificação resiliente para solos finos com as curvas ($\sigma_d \times MR$) segundo o modelo $MR=K_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$ das quatro amostras estudadas, localizadas nos intervalos correspondentes ao tipo de solo de cada uma.

Tabela 4.16 - Parâmetros de resiliência (Takeda, 2005)

Amostra	k_1	k_2
2L	730	-0,28
2N	1078	-0,31
13L	1661	-0,42
13Nb	842	-0,29

Figura 4.12 - Gráfico de classificação resiliente para os solos finos com as curvas das amostras estudadas

Analisando-se a **Figura 4.12** observa-se que os dois pares estudados localizam-se na região do gráfico pertencente ao solo tipo I. Assim as amostras 2L e 2N concordaram com os resultados estimados a partir do método indireto. Por outro lado, as amostras 13L e 13Nb, identificadas como solo tipo II pelo método indireto foram classificadas como solo tipo I pelo gráfico de classificação resiliente.

4.9 Permeabilidade dos Solos

Como já comentado anteriormente no início deste capítulo, foram realizados ensaios de permeabilidade para 38 solos com o intuito de complementar o estudo das características de solos tropicais buscando-se verificar a existência de relações entre a gênese e as características destes materiais e seu coeficiente de permeabilidade.

A **Tabela 4.17** apresenta os valores de K , em cm/s, onde este parâmetro foi calculado através da média aritmética dos coeficientes de permeabilidade obtidos nos 3 ensaios realizados para cada amostra. Os resultados de todos os ensaios encontram-se relacionados no **Anexo H**.

Para efeito de comparação, foram calculados a média e o desvio padrão dos logaritmos dos coeficientes de permeabilidade K dos solos (lateríticos e não lateríticos) que também são apresentados na **Tabela 4.17**.

Tabela 4.17 - Coeficientes de permeabilidade dos solos estudados e seus respectivos logaritmos

SOLOS LATERÍTICOS			SOLOS NÃO LATERÍTICOS		
Amostra	K (cm/s)	log de K	Amostra	K (cm/s)	log de K
1L	6,73E-08	-7,17	1N	1,04E-07	-6,98
2L	1,49E-07	-6,83	2N	4,23E-07	-6,37
4L	1,58E-07	-6,80	3N	2,39E-07	-6,62
6L	1,65E-07	-6,78	5N	2,61E-07	-6,58
7La	3,97E-08	-7,40	6N	2,29E-07	-6,64
7Lb	1,72E-08	-7,76	7N	7,84E-08	-7,11
8L	8,49E-08	-7,07	10N	1,71E-07	-6,77
9L	5,97E-08	-7,22	11N	1,14E-05	-4,94
10L	2,70E-07	-6,57	12N	1,19E-06	-5,92
11L	1,18E-08	-7,93	13Na	2,94E-08	-7,53
12La	2,20E-07	-6,66	13Nb	7,90E-08	-7,10
12Lb	3,70E-07	-6,43	14N	2,48E-08	-7,61
13L	1,61E-07	-6,79	15Na	1,25E-07	-6,90
14L	5,98E-08	-7,22	15Nb	6,45E-07	-6,19
15L	4,09E-08	-7,39	19N	5,93E-08	-7,23
16L	1,84E-08	-7,74	20N	3,02E-07	-6,52
17L	4,52E-08	-7,34	21N	não det.	não det.
18L	1,17E-07	-6,93	22N	5,10E-07	-6,29
			23N	1,04E-07	-6,98
			24N	2,81E-08	-7,55
Média dos log de k		-7,11	Média dos log de k		-6,73
Desvio padrão		0,43	Desvio padrão		0,64

* não det. – K não determinado para esta amostra.

Analisando-se a **Tabela 4.17** observa-se que, de maneira geral, os solos analisados apresentaram coeficientes de permeabilidade (k) da ordem de 10^{-7} a 10^{-8} cm/s, sendo considerados, segundo Lambe & Whitman (1969), solos com grau de permeabilidade muito baixa (solos com $10^{-7} \leq k \leq 10^{-5}$ cm/s) e praticamente impermeável (materiais com $k \leq 10^{-8}$ cm/s). Estes resultados corroboram com Nogami e Villibor (1995), onde materiais pertencentes ao mesmo grupo MCT aos estudados nesta pesquisa apresentam k de Baixo a Médio, o que pode ser observado na **Tabela A.1** do Anexo A.

Ainda na **Tabela 4.17** observa-se que os valores médios dos logaritmos dos k de solos lateríticos e de solos não lateríticos apresentaram a mesma ordem de grandeza indicando a não relação entre a gênese destes materiais e seu coeficiente de permeabilidade.

Com o objetivo de analisar o efeito das características dos solos na permeabilidade, foram consideradas as relações entre esta variável e a porcentagem de material passante na peneira #200, o teor de argila, a umidade ótima, a massa específica seca máxima e o índice de vazios. Todas estas relações apresentaram coeficientes de determinação (R^2) muito baixos, indicando a não existência de uma função bem determinada entre esta variável e os parâmetros em questão tomados de maneira isolada.

Como exemplo das tentativas realizadas, a **Figura 4.13** ilustra a relação entre o coeficiente de permeabilidade e o teor de argila dos solos estudados.

Analisando-se a **Figura 4.13**, observa-se que a gênese também não guarda relação com a permeabilidade. Porém, durante a realização dos ensaios de permeabilidade, observou-se que de maneira geral os solos com comportamento laterítico demandaram um período de tempo maior do que os solos de comportamento não laterítico para que se estabelecesse um fluxo de água contínuo, ou seja, para que ocorresse saturação do material.

Figura 4.13 - Exemplo da não relação entre k e o teor de argila dos materiais estudados

4.10 Análise da Sucção dos Solos

Com o objetivo de analisar-se o efeito da granulometria na sucção dos solos, foram consideradas as relações entre esta variável entre a porcentagem de material passante na peneira #200 e a porcentagem de argila para 26 amostras de solos. Esta última relação apresentou um melhor coeficiente de determinação (R^2), sendo a mesma ilustrada na **Figura 4.14**.

Analisando-se a **Figura 4.14**, observa-se que de maneira geral os solos com maiores teores de argila apresentam maiores valores de sucção. Esta constatação pode ser explicada pelo fato de que apesar de solos mais finos possuírem índices de vazios mais elevados, a dimensão desses vazios é comparativamente menor do que os vazios dos solos menos finos, favorecendo o desenvolvimento de maiores tensões capilares.

No tocante à influência da gênese, observa-se que para iguais teores de argila, solos de comportamento laterítico apresentam sucções menores que os solos de comportamento não laterítico, conforme mostra a **Figura 4.14**.

Figura 4.14 - Efeito da granulometria na sucção

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações Iniciais

As classificações geotécnicas tradicionais aplicadas aos solos tropicais não refletem o real comportamento destes materiais nas obras. Desta forma, a Classificação MCT, desenvolvida especialmente para identificar o comportamento (laterítico ou não laterítico) destes solos tem sido um recurso muito utilizado por profissionais da área de pavimentação.

Entretanto, devido à sistemática de ensaios necessários para a aplicação da metodologia de classificação destacada acima, algumas simplificações têm sido propostas para a identificação do comportamento dos solos tropicais, como por exemplo, o Método das Pastilhas.

Além do método e da classificação acima referidos, foram analisados neste trabalho métodos de previsão do comportamento (Ensaio de Azul de Metileno) e de identificação da gênese (Ensaio de MEV e DRX) dos solos. Ainda nesta pesquisa, foi estudada a classificação dos solos a partir da Classificação Resiliente. De forma complementar, foram analisados resultados de ensaios de permeabilidade e sucção, visando correlacioná-los com propriedades/ características destes materiais.

5.2 Conclusões

É importante ressaltar que as conclusões seguintes restringem-se ao universo de solos estudados nesta pesquisa, ensaiados sob condições específicas.

Baseando-se nos resultados obtidos para a identificação da gênese dos solos através dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV),

verifica-se que para as 38 amostras analisadas nesta etapa, com exceção da amostra 23N, houve coincidência entre as gêneses destes materiais e seu comportamento (laterítico ou não laterítico) previsto pela Classificação MCT.

No caso dos ensaios de Difração de Raios-x (DRX), onde 30 amostras foram estudadas, houve integral coincidência entre a gênese destes solos e seu comportamento determinado pela MCT.

As coincidências fornecidas pelos resultados dos ensaios de DRX, MEV e Metodologia MCT permitiram concluir que o comportamento laterítico ou não laterítico determinado segundo esta metodologia foram confirmados pela gênese dos materiais estudados.

Entre os resultados obtidos nos Ensaios de Adsorção de Azul de Metileno e a previsão do comportamento (laterítico ou não laterítico) determinado pela Classificação MCT foi observada uma boa concordância (92,1%). Neste caso, as divergências detectadas podem ter sido ocasionadas pelo fato de que este procedimento expressa a atividade da fração fina presente nos solos, ao invés da presença de óxidos e hidróxidos, sinais típicos de laterização.

Com relação ao Método das Pastilhas proposto por Nogami e Villibor (1994b), houve concordância de 81,6% entre os resultados obtidos por este método e pela Classificação MCT. Ressalta-se que, para a execução dos ensaios, a adaptação de um minipenetrômetro propiciou maior precisão nas medidas de penetração.

O Método das Pastilhas proposto por Godoy e Bernucci (2002), como já destacado pelos autores do método, necessita de revisões com relação aos limites estabelecidos preliminarmente no guia identificatório.

Com relação à Classificação Resiliente, conforme os resultados obtidos para os dois pares de solos analisados nesta etapa da pesquisa, constatou-se que esta classificação não distingue os materiais conforme suas respectivas gêneses, situando solos lateríticos e não lateríticos em classes coincidentes. Nesta classificação foram detectadas divergências entre os resultados estimados pelo método indireto (CBR e porcentagem de silte do material) e pelos resultados obtidos a partir do módulo de resiliência. Entretanto ressalta-

se que nesta fase da pesquisa foram utilizados apenas dois pares de solos. Desta forma, sugere-se a extensão de análises da Classificação Resiliente para uma maior amostragem de solos.

Os coeficientes de permeabilidade dos solos estudados nesta pesquisa não revelaram uma relação clara entre esta variável e o comportamento laterítico ou não laterítico destes materiais previsto pela Classificação MCT. Nesta etapa, também não foi encontrada uma relação bem definida entre a permeabilidade e as características dos solos estudados: porcentagem de material passante na peneira #200, teor de argila, umidade ótima, massa específica seca máxima e índice de vazios, todas tomadas de maneira isolada.

Os valores de sucção das amostras aqui analisadas mostram que, de maneira geral, os solos com maiores teores de argila apresentam maiores valores de sucção. Neste caso, também se observa que para iguais teores de argila, solos de comportamento laterítico apresentam sucções menores que os solos de comportamento não laterítico.

Durante a realização dos ensaios de permeabilidade, observou-se que os solos com comportamento laterítico demandaram um período de tempo maior do que os solos de comportamento não laterítico para que se estabelecesse um regime permanente de fluxo, ou seja, para que ocorresse saturação do material. Desta forma, sugere-se que estes ensaios sejam realizados registrando-se o tempo de saturação dos materiais, buscando-se analisar uma possível relação entre o umedecimento e comportamento (laterítico/ não laterítico) dos solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, (1990). *Annual book of ASTM standards*. Section 4: Construction, v. 04.08: Soil and rock; dimension stone; geosynthetics. Philadelphia

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR 6459 - Determinação do limite de liquidez*. Rio de janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR 6508 - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica*. Rio de janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR 7180 - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR 7181 - Análise granulométrica*. Rio de janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1995). *NBR 13292 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante*. Rio de janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2000). *NBR 14545 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de janeiro - RJ.

BARROSO, S.H.A.; FABBRI, G.T.P. (1996). *Algumas considerações sobre a classificação MCT e seus índices*. 30^a Reunião Anual de Pavimentação, Salvador - BA. v.2, pp. 494-505.

Barroso, S. H. A. (2002). *Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP. 178 p.

BERNUCCI, L.B. (1995). *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego*. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. São Paulo - SP. 237p.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. (1998). *Mecânica dos solos*. Vol.I. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Apostila 131p.

CASANOVA, F.J. (1986). *O ensaio de azul de metileno na caracterização de solos lateríticos*. Anais da 21ª. Reunião Anual de Pavimentação. Vol II, pp. 276-286. Salvador, BA.

COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE (1985). *Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils*. ABMS. Progress Report (1982-1985). São Paulo - SP, 449p.

COSTA, T. C. D; GANDOLFI, N. (1998). *Uso do ensaio de azul de metileno no mapeamento geotécnico e sua correlação com a classificação MCT para os procedimentos de Pejon e Fabbri*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS. Brasília - DF, v.1 p.157-164.

CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KAMPF, N.; MONIZ, A.C.; FONTES, L.E.F. (1993). *Vocabulário de ciência do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Campinas - SP.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1971). DER/SP M13-71 - *Ensaio de compactação de solos*. São Paulo - SP.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1989). DER/SP M196-89 – *Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT*. São Paulo - SP.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). DNER-ME 256/94. *Solos compactados com equipamento miniatura - Determinação da perda de massa por imersão*. Método de Ensaio.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). DNER-ME 258/94. *Solos - Compactação em equipamento miniatura*. Método de Ensaio.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1996). *Manual de Pavimentação*. 2ª. Edição. Rio de Janeiro - RJ. 320p.

DOURADO, K. A. (2003). *Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - São Carlos/ SP, 89p.

FABBRI, G.T.P.; SÓRIA, M.H.A. (1991). *Aplicação do ensaio de azul de metileno à classificação de solos - Uma primeira aproximação*. Anais da XXV Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. São Paulo - SP.

FABBRI, G. T. P.; SÓRIA, M H A. (1994). *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. Reunião Anual de Pavimentação, 28. Anais Rio de Janeiro, ABPv. Rio de Janeiro - RJ, v.1 p.157-83.

FABBRI, G.T.P. (1994). *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos - SP, 157p.

FORTES, R.M.; ZUPPOLINI NETO, A.; MERIGHI, J.V. (2002). *Proposta de normalização do método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais*. Anais da 11ª Reunião de Pavimentação Urbana, ABPv - Associação Brasileira de Pavimentação, Porto Alegre - RS.

GODOY, H. (1997). *Identificação e classificação geotécnica de latossolos do estado de São Paulo pelo método das pastilhas MCT*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências - USP. São Paulo - SP, 132p.

GODOY, H.; BERNUCCI, L. B. (2002). *O método das pastilhas na compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos solos: um recurso didático*. Anais do XVI ANPET, Natal - RN. v.1, pp.145-156.

LAMBE, T. W. ; WHITMAN, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. New York, Ed. Wiley, 553p.

LUZ, M. P. (2003). *Análise dos resultados do ensaio CBR realizado em condições variadas de umidade pós-compactação*. . Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos - SP, 111p.

MACAMBIRA, I. Q. (2002). *Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos - SP, 117p.

MEDINA, J; PREUSSLER, E.S. (1980). *Características resilientes de solos em estudos de pavimentos*. Solos e Rochas, nº1 V.3. 26p.

MEDINA, J; MOTTA, L. (1989). *Resilient Behavior of brazilian tropical soils in pavement design*. 2nd. Int. Symp. on Pavement Evaluation and Overlay Design. Vol I, pp. 1.1.1 a 1.1.22. Setembro. ABPv. – Associação Brasileira de Pavimentação.

NOGAMI, J. S.; COZZOLINO, V. M. N. (1985). *A identificação de solos tropicais: dificuldades e proposta de um método preliminar*. Reunião anual de pavimentação, 20. Fortaleza - CE. Anais. Fortaleza, ABPv. pp. 117-134.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1981). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias*. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro - RJ. v.1, pp. 30-41.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1994a). *Ampliação do uso da metodologia MCT no estudo de solos tropicais para pavimentação*. 28^a Reunião Anual de Pavimentação. Belo Horizonte - MG, v.1, pp.184-209.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1994b). *Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais*. Anais do X Congresso Brasileiro de

Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Foz do Iguaçu - PR. v.4, pp. 1293-1300.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo - SP. Ed. Villibor, 213 p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1996). *Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia*. VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. ABGE. Rio de Janeiro - RJ, v.1, pp.345-358.

PEJON, O. J. (1992). *Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos - SP.

RAMOS, C. R. (2003). *Estudo para o desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do município do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado. COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro – RJ 301p.

SÓRIA, M. H. A. (1985). *Reflexões lógicas sobre classificação de solos*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos - SP, 209 p.

TAKEDA, M. C. (2005). *A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos do subleito de rodovias do interior paulista*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos - SP.

VARGAS, M. (1977). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, Macgraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 509p.

VERTAMATTI, E. (1988). *Novas considerações geotécnicas sobre solos tropicais amazônicos de textura fina*. Anais da 23ª. Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis, SC. pp. 533-564.

VIANA, H. M. F. (2006). *Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo*. Exame de qualificação. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos – SP.

- ANEXO A -

Tabela de Propriedades e Utilização dos Grupos MCT
(Nogami e Villibor, 1995)

Tabela A.1 - Propriedades e utilização dos grupos de solos MCT (Nogami e Villibor, 1995)

GRANULOMETRIAS TÍPICAS			Argilas,	Areias	Siltos (k,m),	Argilas, Argilas arenosas, Argilas siltosas, Siltos argilosos	Areias	Areias	Argilas, Argilas arenosas, Argilas siltosas, Siltos argilosos
Designações do T1-71 do DER SP (equivalentes da Mississipi River Commission, USA) k=caolinitico; m=micaceo; s=sericitico; q=quartzoso			Siltos (q,s)	siltosas	e Siltos arenosos		siltosas	argilosas	
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico				L = Laterítico		
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR (%)	Sem Imersão	M,E	E	M,E	E	E	E,EE	E
		Perda por imersão	B,M	B	E	E	B	B	B
	EXPANSÃO		B	B	E	M,E	B	B	B
	CONTRAÇÃO		B	B,M	M	M,E	B	B,M	M,E
	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (k)		M,E	B	B,M	B,M	B,M	B	B
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)		E	B,M	E	M,E	B	B	B
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima de energia normal		EE=Muito elevado (a); E=Elevado (a); M=Médio (a); B=Baixo (a)						
Utilização	Base de pavimento		n	4º	n	n	2º	1º	3º
	Reforço do subleito compactado		4º	5º	n	n	2º	1º	3º
	Subleito compactado		4º	5º	7º	6º	2º	1º	3º
	Aterro (corpo) compactado		4º	5º	6º	7º	2º	1º	3º
	Proteção à erosão		n	3º	n	n	n	2º	1º
	Revestimento primário		5º	3º	n	n	4º	1º	2º
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunsa		USCS	SP; SM	MS; SC; ML	SM; CL; ML; MH	MH; CH	SP; SC	SC	MH; ML; CH
		AASHO	A-2	A-2; A-4; A-7	A-4; A-5; A-7-5	A-6; A-7-5	A-2	A-2; A-4	A-6; A-7-5

- ANEXO B -

Locais de Coleta das Amostras

Tabela B.1 - Locais de coleta das amostras

Amostra	Sentido local	Lado	Latitude sul	Longitude oeste	Profundidade (m)	Solo e linha de seixos (ls)
1L (76)	Cajuru / Santa Cruz da Esperança (SP 333 / Km 13 + 400m)	Direito	21° 17' 28,5"	47° 24' 46,6"	1,00	Acima da ls
1N (85)	São Carlos / Rio Claro (SP 310 / Km 191)	Esquerdo	22° 18' 17,0"	47° 40' 08,0"	4,00	Não definida
2L (11)	Ribeirão Bonito / São Carlos (SP 215 / Km 152 + 500m)	Direito	22° 03' 54,4"	47° 54' 32,1"	2,00	Acima da ls
2N (17)	Ribeirão Bonito / Dourado (SP 215 / Km 193 + 100m)	Esquerdo	22° 06' 58,8"	48° 17' 26,6"	4,00	Abaixo da ls
3N (89)	Santa Rita do Passa Quatro / Luís Antônio (SP 330 / Km 225)	Direito	21° 38' 20,2"	47° 36' 41,5"	Não definida	Não definida
4L (50)	Macaraí / Regente Feijó (SP 270 / Km 515 + 500m)	Esquerdo	22° 25' 05,5"	51° 02' 12,5"	2,00	Não definida
5N (81)	Osvaldo Cruz / Lucélia (SP 294 / Km 575)	Esquerdo	21° 45' 43,7"	50° 55' 29,6"	1,00	Não definida
6L (60)	Nova Canaã / Entroncamento SP 310 (SP 595)	Direito	20° 26' 15,8"	51° 16' 26,4"	Não definida	Acima da ls
6N (55)	Nova Independência / Pontal (SPV 8)	Esquerdo	20° 57' 26,9"	51° 37' 12,4"	1,50	Não definida
7La (30)	Santa Cruz das Palmeiras / Casa Branca (SP 215 / Km 54 + 400m)	Direito	21° 47' 53,6"	47° 05' 05,1"	8,00	Acima da ls
7Lb (57)	São Carlos / Catanduva (SP 310 / Km 380 + 800m)	Direito	21° 10' 14,2"	48° 58' 17,2"	Não definida	Não definida
7N (27)	Pederneiras / Bauru (SP 225 / Km 220 + 500m)	Esquerdo	22° 19' 44,9"	48° 55' 26,8"	6,00	Abaixo da ls
8L (46)	Mirassol / Monte Aprazível (SP 310 / Km 458)	Direito	20° 47' 41,0"	49° 34' 35,0"	Não definida	Acima da ls
9L (88)	Pirassununga / Porto Ferreira (SP 330)	Direito	21° 56' 31,0"	47° 27' 51,5"	1,00	Não definida
10L (21)	SP-225 / Dois Córregos (vicinal / Km 6)	Direito	22° 18' 58,0"	48° 23' 36,5"	2,00	Acima da ls
10N (77)	Bauru / Piratininga (SP 294)	Direito	22° 20' 28,5"	49° 12' 24,8"	4,00	Abaixo da ls
11L (38)	Via Dutra / Caçapava Velha (1 Km do trevo da Via Dutra)	Esquerdo	23° 06' 01,6"	45° 40' 33,2"	Não definida	Abaixo da ls
11N (53)	Teodoro Sampaio / Marabá Paulista (SP 563 / Km 33)	Direito	22° 15' 13,2"	52° 01' 03,9"	3,00	Abaixo da ls
12La (48)	Borborema / Ibitinga (SP 304 / Km 384 + 600m)	Esquerdo	21° 41' 35,9"	49° 00' 31,9"	1,50	Acima da ls
12Lb (91)	Batatais / Franca (SP 334 / Km 356 + 800m)	Direito	20° 50' 22,9"	47° 36' 03,8"	3,00	Acima da ls
12N (78)	Entroncamento Piratininga / Entroncamento Duartina (SP 294 / Km 375)	Direito	22° 19' 38,5"	49° 19' 31,6"	6,00	Abaixo da ls
13L (25)	Dois Córregos / Min. do Tietê (SP 304 / Km 277 + 50m)	Esquerdo	22° 23' 58,1"	48° 27' 02,4"	6,00	Não definida
13Na (22)	SP-225 / Dois Córregos (vicinal / Km 6)	Direito	22° 18' 58,0"	48° 23' 36,5"	4,00	Abaixo da ls
13Nb (34)	Capivari / Rio das Pedras (SP 308 / Km 150)	Direito	22° 49' 23,2"	47° 34' 28,4"	2,00	Não definida
14L (67)	Itapetininga / Piraju (SP 270 / Km 213 + 300m)	Direito	23° 31' 28,8"	48° 28' 39,2"	Não definida	Não definida
14N (39)	Via Dutra / Igaratá (SP 65 / Km 16 + 700m)	Direito	23° 14' 58,2"	46° 06' 21,3"	4,00	Não definida
15L (71)	Guará / Ituverava (SP 330 / Km 400 + 500m)	Direito	20° 25' 03,3"	47° 49' 40,9"	3,00	Não definida
15Na (65)	Mairinque / Alumínio (SP 270 / Km 72)	Esquerdo	23° 31' 49,7"	47° 13' 38,4"	Não definida	Não definida
15Nb (86)	São Carlos / Rio Claro (SP 310 / Km 187)	Esquerdo	22° 19' 50,3"	47° 39' 14,4"	2,00	Não definida
16L (28)	Pirajuí / Cafelândia (SP 300 / Km 400)	Direito	21° 57' 51,0"	49° 27' 39,3"	8,00	Não definida
17L (80)	Tupã / Osvaldo Cruz (SP 294 / Km 517 + 700m)	Esquerdo	21° 57' 53,7"	50° 25' 56,4"	1,00	Não definida
18L (82)	Pacaembu / Tupi Paulista (SP 294 / Km 620 + 500m)	Esquerdo	21° 33' 11,4"	51° 17' 18,3"	3,00	Não definida
19N (32)	São José do Rio Pardo / São Sebastião da Gramma (SP 207 / Km 8)	Direito	21° 39' 08,9"	46° 52' 13,9"	8,00	Abaixo da ls
20N (33)	Amparo / Morungaba (SP 360 / Km 124)	Direito	22° 44' 45,1"	46° 45' 47,3"	2,00	Abaixo da ls
21N (36)	Santo Antônio do Pinhal / Via Dutra (SP 123 / Km 29)	Esquerdo	22° 51' 10,7"	45° 36' 56,8"	Não definida	Não definida
22N (43)	Monte Azul / Severínea (SP 322 / Km 429 + 100m)	Esquerdo	20° 49' 20,8"	48° 47' 12,8"	3,30	Abaixo da ls
23N (62)	Auriflama / Entroncamento SP 463 (SP 310 / Km 563)	Esquerdo	20° 39' 37,2"	50° 31' 59,9"	3,00	Acima da ls
24N (75)	Cajuru / Santa Cruz da Esperança (SP 333 / Km 13 + 400m)	Direito	21° 17' 28,5"	47° 24' 46,6"	2,00	Abaixo da ls

- ANEXO C -

Resultados dos Ensaaios de Granulometria Conjunta

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios de granulometria conjunta

Amostras													
1L (76)		1N (85)		2L (11)		2N (17)		3N (89)		4L (50)		5N (81)	
Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa
4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00
2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	99,98	2,000	100,00	2,000	99,91	2,000	100,00	2,000	100,00
1,190	100,00	1,190	100,00	1,190	98,80	1,190	99,78	1,190	99,47	1,190	100,00	1,190	99,96
0,590	99,94	0,590	99,94	0,590	95,49	0,590	95,90	0,590	96,45	0,590	99,86	0,590	99,87
0,300	98,44	0,300	99,67	0,300	80,51	0,300	76,24	0,300	72,36	0,300	82,11	0,300	98,49
0,150	63,47	0,150	60,21	0,150	41,06	0,150	40,91	0,150	27,78	0,150	39,75	0,150	62,40
0,075	32,74	0,075	30,72	0,075	31,18	0,075	35,34	0,075	14,71	0,075	22,12	0,075	32,48
0,037	18,80	0,035	20,56	0,024	26,60	0,024	31,98	0,037	10,53	0,050	14,85	0,026	17,95
0,013	17,57	0,013	19,15	0,012	26,60	0,012	31,27	0,013	10,53	0,025	14,17	0,014	17,26
0,009	17,57	0,009	19,15	0,009	26,60	0,009	29,84	0,010	9,33	0,017	13,48	0,010	17,26
0,007	16,01	0,006	17,73	0,006	25,90	0,006	29,84	0,007	9,51	0,013	12,80	0,007	16,85
0,005	16,01	0,005	16,32	0,004	25,20	0,004	28,42	0,005	8,15	0,009	12,80	0,005	16,85
0,003	16,01	0,003	16,32	0,003	24,34	0,003	26,13	0,003	8,52	0,006	12,80	0,003	16,85
0,002	16,01	0,002	14,81	0,002	24,60	0,002	25,68	0,002	7,16	0,005	12,11	0,002	16,57
										0,003	11,69		
										0,002	11,97		

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios de granulometria conjunta (continuação)

Amostras													
6L (60)		6N (55)		7La (30)		7Lb (57)		7N (27)		8L (46)		9L (88)	
Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa
4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00
2,000	99,88	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00
1,190	99,78	1,190	99,83	1,190	99,79	1,190	99,96	1,190	99,91	1,190	100,00	1,190	98,45
0,590	99,41	0,590	99,48	0,590	97,68	0,590	99,81	0,590	99,38	0,590	100,00	0,590	96,34
0,300	93,21	0,300	89,61	0,300	80,54	0,300	91,81	0,300	91,05	0,300	97,63	0,300	87,21
0,150	68,41	0,150	56,26	0,150	49,86	0,150	63,97	0,150	69,44	0,150	65,54	0,150	56,39
0,075	40,12	0,075	36,90	0,075	37,79	0,075	44,77	0,075	50,01	0,075	36,92	0,075	39,36
0,052	24,55	0,035	23,50	0,035	31,52	0,039	24,86	0,035	36,44	0,051	25,09	0,035	32,35
0,026	22,19	0,025	22,31	0,017	30,33	0,027	24,86	0,025	34,05	0,025	23,90	0,013	32,35
0,018	21,85	0,018	21,12	0,013	29,14	0,019	23,65	0,017	32,85	0,018	23,90	0,009	30,29
0,013	21,85	0,013	21,12	0,009	29,14	0,014	23,65	0,013	31,66	0,013	23,90	0,006	30,60
0,009	21,85	0,009	19,93	0,006	27,95	0,003	22,97	0,009	30,46	0,009	22,71	0,005	28,24
0,007	21,85	0,007	17,99	0,005	26,76	0,002	22,97	0,006	29,27	0,006	23,08	0,003	26,53
0,005	21,85	0,005	15,61	0,003	26,11			0,004	28,42	0,005	23,08	0,002	26,53
0,003	21,20	0,003	14,91	0,002	23,11			0,003	26,88	0,003	22,71		
0,002	20,59	0,002	14,25					0,002	23,52	0,002	21,36		

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios de granulometria conjunta (continuação)

Amostras													
10L (21)		10N (77)		11L (38)		11N (53)		12La (48)		12Lb (91)		12N (78)	
Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa
4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00
2,000	99,71	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	99,84	2,000	100,00
1,190	98,93	1,190	100,00	1,190	98,65	1,190	100,00	1,190	99,50	1,190	99,25	1,190	100,00
0,590	98,19	0,590	100,00	0,590	91,87	0,590	100,00	0,590	99,44	0,590	98,39	0,590	99,87
0,300	93,39	0,300	99,22	0,300	79,89	0,300	97,96	0,300	95,50	0,300	92,81	0,300	98,98
0,150	77,28	0,150	80,01	0,150	68,11	0,150	87,15	0,150	86,39	0,150	78,00	0,150	86,55
0,075	68,30	0,075	66,95	0,075	59,00	0,075	69,10	0,075	78,17	0,075	72,89	0,075	75,14
0,022	56,47	0,013	53,97	0,023	47,59	0,048	56,75	0,029	67,21	0,030	64,02	0,012	57,45
0,011	53,98	0,009	52,72	0,012	46,71	0,024	53,13	0,021	66,08	0,011	57,04	0,009	55,14
0,008	51,50	0,006	50,72	0,009	44,07	0,016	53,12	0,015	64,95	0,008	54,72	0,006	50,19
0,006	49,65	0,004	48,22	0,006	44,07	0,012	53,12	0,011	63,81	0,006	50,07	0,004	44,90
0,004	47,16	0,003	45,72	0,004	41,88	0,006	51,37	0,008	62,68	0,004	47,75	0,003	37,69
0,003	44,12	0,002	42,70	0,003	41,06	0,004	48,95	0,005	60,42	0,003	45,42	0,002	32,40
0,002	42,19			0,002	40,28	0,003	47,24	0,004	58,45	0,002	44,10		
						0,002	46,88	0,003	54,53				
								0,002	47,14				

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios de granulometria conjunta (continuação)

Amostras													
13L (25)		13Na (22)		13Nb (34)		14L (67)		14N (39)		15L (71)		15Na (65)	
Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa
4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00
2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00
1,190	100,00	1,190	99,82	1,190	99,88	1,190	99,80	1,190	99,96	1,190	99,73	1,190	99,82
0,590	99,63	0,590	99,40	0,590	99,57	0,590	99,62	0,590	99,42	0,590	99,32	0,590	99,20
0,300	96,63	0,300	98,24	0,300	99,15	0,300	99,26	0,300	97,84	0,300	98,15	0,300	97,79
0,150	88,98	0,150	94,72	0,150	98,75	0,150	97,99	0,150	94,88	0,150	95,78	0,150	95,55
0,075	84,73	0,075	91,99	0,075	90,56	0,075	95,57	0,075	91,77	0,075	92,62	0,075	92,33
0,022	51,32	0,021	69,71	0,023	56,26	0,028	90,10	0,029	86,42	0,018	75,27	0,020	74,68
0,016	48,72	0,015	64,13	0,016	52,18	0,020	88,89	0,011	85,46	0,010	70,82	0,011	67,79
0,012	46,12	0,011	58,54	0,012	49,46	0,014	86,47	0,008	84,02	0,007	66,37	0,008	63,20
0,008	43,51	0,008	52,96	0,009	45,38	0,010	85,26	0,005	84,02	0,005	62,35	0,005	59,33
0,006	41,58	0,006	47,38	0,006	40,84	0,007	82,84	0,003	82,17	0,004	57,90	0,004	54,74
0,004	38,98	0,004	43,19	0,004	36,32	0,005	81,63	0,002	79,89	0,003	53,91	0,003	49,79
0,003	34,49	0,003	39,77	0,003	31,39	0,004	79,76			0,002	48,85	0,002	44,17
0,002	33,77	0,002	36,21	0,002	26,51	0,003	78,55						
				0,002	26,51	0,002	77,34						

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios de granulometria conjunta (continuação)

Amostras													
15 Nb (86)		16L (28)		17L (80)		18L (82)		19N (32)		20N (33)		21N (36)	
Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa
4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00
2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	100,00	2,000	99,81	2,000	100,00
1,190	99,35	1,190	99,96	1,190	100,00	1,190	99,91	1,190	99,64	1,190	98,42	1,190	99,68
0,590	96,75	0,590	99,85	0,590	99,86	0,590	99,91	0,590	97,43	0,590	88,09	0,590	97,65
0,300	92,57	0,300	96,93	0,300	97,28	0,300	99,87	0,300	90,19	0,300	72,29	0,300	89,01
0,150	87,94	0,150	56,93	0,150	49,62	0,150	86,94	0,150	85,06	0,150	62,96	0,150	79,37
0,075	85,20	0,075	32,25	0,075	27,54	0,075	37,60	0,075	80,54	0,075	57,10	0,075	69,98
0,023	79,36	0,049	23,25	0,036	17,70	0,036	17,95	0,031	69,50	0,035	42,34	0,034	39,26
0,012	74,16	0,035	21,82	0,013	16,31	0,013	17,95	0,022	64,68	0,025	38,72	0,024	30,69
0,009	70,26	0,025	21,82	0,009	16,48	0,009	17,95	0,015	59,86	0,017	35,03	0,017	23,72
0,006	65,60	0,013	21,11	0,007	16,67	0,007	15,57	0,011	53,84	0,012	31,82	0,013	17,61
0,004	60,41	0,009	21,11	0,005	15,27	0,005	15,93	0,008	47,82	0,009	26,99	0,009	14,32
0,003	55,21	0,006	21,11	0,003	15,66	0,003	15,57	0,006	41,05	0,006	24,58	0,007	9,43
0,002	46,88	0,004	20,60	0,002	15,66	0,002	14,21	0,004	36,23	0,005	18,95	0,005	6,98
		0,003	20,39					0,003	31,91	0,003	17,00	0,003	3,77
		0,002	20,52					0,002	25,23	0,002	15,08	0,002	3,05

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios de granulometria conjunta (continuação)

Amostras					
22N (43)		23N (62)		24N (75)	
Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa	Diâmetro (mm)	(%) passa
4,760	100,00	4,760	100,00	4,760	100,00
2,000	100,00	2,000	99,90	2,000	100,00
1,190	99,97	1,190	99,78	1,190	100,00
0,590	99,80	0,590	99,55	0,590	100,00
0,300	97,67	0,300	98,54	0,300	98,91
0,150	47,69	0,150	83,36	0,150	78,74
0,075	28,00	0,075	41,38	0,075	49,61
0,050	20,55	0,052	18,99	0,050	30,80
0,036	17,73	0,026	15,48	0,024	27,21
0,026	16,31	0,018	15,32	0,013	23,24
0,018	14,90	0,013	15,32	0,009	22,04
0,013	13,49	0,009	15,32	0,006	21,22
0,009	12,07	0,006	14,88	0,005	18,82
0,007	10,88	0,005	13,71	0,003	18,07
0,005	9,46	0,003	13,34	0,002	17,37
0,003	8,54	0,002	12,29		
0,002	7,03				

- ANEXO D -

**Resultados dos Ensaaios de Limites de Consistência e
Classificação segundo a HRB e a USCS**

Tabela D.1 - Limites de Consistência e Classificação segundo a HRB e a USCS dos solos estudados nesta pesquisa

Amostra	Limites de consistência			Classificação do solo	
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	HRB	USCS
1L	31	16	15	A-2-6	SC
1N	34	18	16	A-2-6	SC
2L	34	21	13	A-2-6	SC
2N	38	24	14	A-2-6	SC
3N	0	0	NP	A-2-4	SM
4L	19	14	5	A-2-4	SM
5N	0	0	NP	A-2-4	SM
6L	23	17	6	A-4	SM-SC
6N	18	14	4	A-4	SM-SC
7La	31	19	12	A-6	SC
7Lb	31	23	8	A-4	SM
7N	38	23	15	A-6	SC
8L	34	19	15	A-6	SC
9L	28	20	8	A-4	SC
10L	44	30	14	A-7-5	ML
10N	55	30	25	A-7-5	MH
11L	61	32	29	A-7-5	MH
11N	55	35	20	A-7-5	MH
12La	47	30	17	A-7-5	ML
12Lb	46	33	13	A-7-5	ML
12N	59	39	20	A-7-5	MH
13L	46	33	13	A-7-5	ML
13Na	79	53	26	A-7-5	MH
13Nb	57	40	17	A-7-5	MH
14L	60	43	17	A-7-5	MH
14N	108	55	53	A-7-5	MH
15L	48	37	11	A-7-5	ML
15Na	58	34	24	A-7-5	MH
15Nb	74	36	38	A-7-5	MH
16L	29	18	11	A-2-6	SC
17L	0	0	NP	A-2-4	SM
18L	28	18	10	A-4	SC
19N	65	40	25	A-7-5	MH
20N	50	35	15	A-7-5	ML
21N	40	29	11	A-4	CL
22N	0	0	NP	A-2-4	SM
23N	20	16	4	A-4	SM-SC
24N	39	23	16	A-6	SC

- ANEXO E -

Resultados dos Ensaaios de Compactação

Tabela E.1 - Resultados dos ensaios de compactação

Amostra	Ensaio de compactação	
	Energia Normal	
	W _o (%)	$\rho_{d\text{máx.}}$ (g/cm ³)
1L	12,90	1,858
1N	12,80	1,841
2L	13,20	1,905
2N	14,70	1,788
3N	8,83	1,979
4L	10,57	1,944
5N	10,63	1,909
6L	10,16	2,014
6N	11,52	1,923
7La	12,60	1,888
7Lb	13,52	1,862
7N	17,00	1,739
8L	13,47	1,809
9L	13,89	1,855
10L	21,00	1,679
10N	20,03	1,570
11L	20,87	1,626
11N	29,10	1,417
12La	21,82	1,642
12Lb	23,87	1,583
12N	21,89	1,443
13L	24,90	1,608
13Na	32,00	1,415
13Nb	26,40	1,433
14L	29,79	1,362
14N	37,74	1,272
15L	26,64	1,597
15Na	22,94	1,563
15Nb	29,16	1,415
16L	12,27	1,889
17L	11,13	1,913
18L	12,67	1,837
19N	24,26	1,531
20N	20,54	1,597
21N	20,11	1,549
22N	15,42	1,770
23N	11,08	1,940
24N	15,47	1,790

- ANEXO F -

**Resultados dos Ensaaios de Microscopia
Eletrônica de Varredura**

Microfotografias Amostra 01L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 01N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 02L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 02N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 03N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 04L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 05N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 06L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 06N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 07La - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 07Lb - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 07N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 08L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 09L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 10L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 10N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 11L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 11N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 12La - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 12Lb - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 12N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 13L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 13Na - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 13Nb - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 14L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 14N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 15L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 15Na - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 15Nb - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 16L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 17L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 18L - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 19N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 20N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 21N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 22N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 23N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

Microfotografias Amostra 24N - aumento 3000 e 10000x respectivamente

- ANEXO G -

Resultados dos Ensaaios de Sucção

Tabela G.1 - Valores de sucção na umidade ótima

Amostra	Sucção	Amostra	Sucção
1L	21	10N	138
1N	34	11L	74
2L	45	11N	55
2N	56	12La	31
4L	4	12Lb	55
5N	15	12N	97
6L	41	13Na	109
6N	27	13Nb	53
7La	67	14L	76
7Lb	53	14N	118
7N	99	15L	50
8L	26	15Na	96
10L	39	15Nb	80

- ANEXO H -

Resultados dos Ensaaios de Permeabilidade

Tabela H.1 - Resultados dos ensaios de permeabilidade

Amostra 1L		Amostra 1N		Amostra 2L	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	6,48E-08	1	1,00E-08	1	1,11E-07
2	4,02E-08	2	2,00E-07	2	3,76E-08
3	9,69E-08	3	1,02E-07	3	2,99E-07
Kmédio	6,73E-08	Kmédio	1,04E-07	Kmédio	1,49E-07
Amostra 2N		Amostra 3N		Amostra 4L	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	4,43E-07	1	1,76E-07	1	2,67E-07
2	4,16E-07	2	3,03E-07	2	1,09E-07
3	4,09E-07	3	não determinado	3	9,65E-08
Kmédio	4,23E-07	Kmédio	2,39E-07	Kmédio	1,58E-07
Amostra 5N		Amostra 6L		Amostra 6N	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	*5,47E-08	1	2,12E-07	1	*4,99E-8
2	1,09E-07	2	1,18E-07	2	2,78E-07
3	4,13E-07	3	*4,31E-08	3	1,80E-07
Kmédio	2,61E-07	Kmédio	1,65E-07	Kmédio	2,29E-07
Amostra 7La		Amostra 7Lb		Amostra 7N	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	4,02E-08	1	1,88E-08	1	8,33E-08
2	3,82E-08	2	1,55E-08	2	7,34E-08
3	4,07E-08	3	não determinado	3	*1,75E-07
Kmédio	3,97E-08	Kmédio	1,72E-08	Kmédio	7,84E-08
Amostra 8L		Amostra 9L		Amostra 10L	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	*2,99-07	1	6,34E-08	1	3,20E-07
2	9,56E-08	2	6,16E-08	2	1,18E-07
3	7,43E-08	3	5,41E-08	3	3,71E-07
Kmédio	8,49E-08	Kmédio	5,97E-08	Kmédio	2,70E-07
Amostra 10N		Amostra 11L		Amostra 11N	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	2,37E-07	1	*4,50E-07	1	1,12E-05
2	*7,42E-08	2	1,19E-08	2	1,14E-05
3	1,06E-07	3	1,17E-08	3	1,16E-05
Kmédio	1,71E-07	Kmédio	1,18E-08	Kmédio	1,14E-05
Amostra 12La		Amostra 12Lb		Amostra 12N	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	3,50E-07	1	4,24E-07	1	2,21E-06
2	1,20E-07	2	5,30E-07	2	6,00E-07
3	1,91E-07	3	1,56E-07	3	7,53E-07
Kmédio	2,20E-07	Kmédio	3,70E-07	Kmédio	1,19E-06
Amostra 13L		Amostra 13Na		Amostra 13Nb	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	2,49E-07	1	*1,95E-07	1	1,18E-07
2	1,67E-07	2	1,93E-08	2	5,76E-08
3	6,68E-08	3	3,95E-08	3	6,18E-08
Kmédio	1,61E-07	Kmédio	2,94E-08	Kmédio	7,90E-08

Tabela H.1 - Resultados dos ensaios de permeabilidade (continuação)

Amostra 14L		Amostra 14N		Amostra 15L	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	6,44E-08	1	*9,98E-08	1	5,57E-08
2	5,08E-08	2	2,25E-08	2	2,62E-08
3	6,41E-08	3	2,70E-08	3	*1,34E-07
Kmédio	5,98E-08	Kmédio	2,48E-08	Kmédio	4,09E-08
Amostra 15Na		Amostra 15Nb		Amostra 16L	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	1,13E-07	1	6,40E-07	1	2,27E-08
2	1,19E-07	2	6,49E-07	2	1,41E-08
3	1,44E-07	3	6,47E-07	3	*1,87E-07
Kmédio	1,25E-07	Kmédio	6,45E-07	Kmédio	1,84E-08
Amostra 17L		Amostra 18L		Amostra 19N	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	5,63E-08	1	1,68E-07	1	6,11E-08
2	4,80E-08	2	1,03E-07	2	6,24E-08
3	3,13E-08	3	8,01E-08	3	5,45E-08
Kmédio	4,52E-08	Kmédio	1,17E-07	Kmédio	5,93E-08
Amostra 20N		Amostra 21N		Amostra 22N	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)
1	4,33E-07	1	não determinado	1	3,85E-07
2	2,60E-07	2	não determinado	2	4,37E-07
3	2,14E-07	3	não determinado	3	7,09E-07
Kmédio	3,02E-07	Kmédio	não determinado	Kmédio	5,10E-07
Amostra 23N		Amostra 24N		OBS - *valores não utilizados no cálculo do Kmédio	
Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)	Corpo de prova	Coefficiente de permeabilidade - K (cm/s)		
1	1,27E-07	1	*1,63E-07		
2	7,99E-08	2	2,42E-08		
3	não determinado	3	3,20E-08		
Kmédio	1,04E-07	Kmédio	2,81E-08		