UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES-STT

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS
ARTIFICIAIS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DAS
CARACTERÍSTICAS DE SUA FRAÇÃO GROSSA

Jisela Aparecida Santanna

Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

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, área: Transportes.

São Carlos, dezembro de 1998.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Lauro e Neusa,
a minha irmã, Renata e
ao meu amor, Marcelo.

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, pelos ensinamentos, estímulo, confiança, compreensão e amizade;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida;

Aos técnicos do Laboratório de Estrada do Departamento de Transportes, Sr. Antonio Carlos Gigante, Sr. Antonio Carlos de Oliveira e Sr Roberto Antonio Morasco, pela ajuda na execução dos ensaios e pela amizade;

A Suelly Helena de Araujo Barroso, pelo companheirismo e amizade;

Aos professores do Departamento de Transportes, pelo suporte a mim oferecido para realização desse trabalho;

Aos colegas do Departamento de Transportes, pela convivência e apoio na luta do dia a dia;

Aos funcionários do STT, pela colaboração e apoio;

À Mineração DIDONE, pelo fornecimento de parte da areia utilizada nesse trabalho;

Ao Prof. Iraty Samuel Novaes Gomes, pelas fotografias dos grãos de areia;

Aos professores Suelly da Penha Sanches e Archimedes Azevedo Raia Junior, que me recomendaram para aceitação no programa de mestrado do Departamento de Transportes;

A Marcelo Greco, pelo carinho, companheirismo e apoio;

A minha família, por absolutamente tudo.

RESUMO

Com a finalidade de se avaliar a influência da variação das características da fração grossa no comportamento das propriedades mecânicas dos solos compactados, foram desenvolvidos nesse trabalho dois programas de montagem de solos artificiais, sendo o primeiro para análise da influência dos parâmetros forma e textura dos grãos da fração grossa e o segundo, para análise da influência dos parâmetros distribuição granulométrica e porcentagem da fração grossa. O objetivo desse trabalho foi acrescentar informações aos estudos que têm sido conduzidos no sentido da elaboração de uma futura classificação de solos, baseada em ensaios de granulometria e adsorção de azul de metileno pelo método da mancha. Os solos artificiais foram submetidos aos ensaios de limite de liquidez e plasticidade, granulometria por peneiramento e sedimentação, mini-MCV, perda de massa por imersão, mini-CBR com e sem imersão, expansão e contração na energia intermediária. Através dos resultados obtidos, montaram-se gráficos de variação das propriedades tecnológicas dos solos em função das características e teor de sua fração grossa, a partir dos quais pode-se estimar a influência de tais características no comportamento das propriedades apresentadas pelos solos.

ABSTRACT

The goal of this work is to evaluate the influence of the gross fraction characteristic variation in the behavior of the compacted soils mechanic properties, two artificial soils mounting program were developed in this work. The first program was developed to analyze the form and texture influence of the gross fraction grains; the second program, to analyze the influence of the gross fraction granulometric distribution and percentage. The purpose of this work was to contribute for the elaboration of a future soil classification based on granulometric analysis and on the methylene blue adsorption test. The artificial soils were submitted to the tests of liquid and plastic limits, granulometric analysis, mini-MCV, loss of mass by immersion, mini-CBR immediate and after 24 hours of immersion, expansion and shrinkage in the intermediary energy. The test results allowed to make charts of technological properties soil variation as a function of the gross fraction characteristics and content. Based on that charts it is possible to estimate the gross fraction characteristic influence in the behavior of the soil proprieties.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Ábaco para caracterização do grau de atividade da fração argila dos solos (FABBRI, 1994).	20
FIGURA 3.1 – Curvas granulométricas das frações grossas <i>c</i> , <i>df</i> e <i>dg</i> .	47
FIGURA 4.1 – Curvas granulométricas dos solos artificiais <i>cb</i> , possuindo fração fina <i>ag</i> e fração grossa <i>cb</i> , nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.	54
FIGURA 4.2 – Curvas granulométricas dos solos artificiais <i>c</i> , possuindo fração fina <i>l</i> e fração grossa <i>c</i> , nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.	54
FIGURA 4.3 – Curvas granulométricas dos solos artificiais <i>df</i> , possuindo fração fina <i>l</i> e fração grossa <i>df</i> , nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.	55
FIGURA 4.4 – Curvas granulométricas dos solos artificiais <i>dg</i> , possuindo fração fina <i>l</i> e fração grossa <i>dg</i> , nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.	55
FIGURA 4.5 – Variação dos valores de LL e LP em função do teor de fração grossa, para os conjuntos de solos artificiais <i>cb</i> , <i>j</i> , <i>df</i> e <i>dg</i> .	58
FIGURA 4.6 – Localização dos solos artificiais no ábaco de classificação MCT. O sentido das setas indica o aumento do teor de fração grossa, de 0% a 80%, para os conjuntos <i>cb</i> , <i>c</i> , <i>df</i> e <i>dg</i> de solos artificiais.	64
FIGURA 4.7 – Variação da massa específica dos sólidos em função do teor da fração grossa presente.	66
FIGURA 4.8 – Partículas com diâmetros entre 0,300 e 0,600 mm, para as frações grossas <i>cb</i> e <i>j</i> (aumento de 23 vezes).	67
FIGURA 4.9 – Partículas com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm, para as frações grossas <i>cb</i> e <i>j</i> (aumento de 23 vezes).	68

FIGURA 4.10 – Variação da massa específica aparente seca máxima em função do teor de finos, para os solos <i>cb</i> e <i>j</i> .	69
FIGURA 4.11 – Variação da umidade ótima em função do teor de finos, para os solos <i>cb</i> e <i>j</i> .	70
FIGURA 4.12 – Variação do mini-CBR imediato em função do teor de finos, para os solos <i>cb</i> e <i>j</i> .	71
FIGURA 4.13 – Variação do mini-CBR após 24 horas de imersão em função do teor de finos, para os solos <i>cb</i> e <i>j</i> .	72
FIGURA 4.14 – Variação da propriedade expansão em função do teor de finos, para os solos <i>cb</i> e <i>j</i> .	73
FIGURA 4.15 – Variação da propriedade contração em função do teor de finos, para os solos <i>cb</i> e <i>j</i> .	74
FIGURA 4.16 – Variação da massa específica aparente seca máxima dos solos artificiais em função do teor de fração grossa.	77
FIGURA 4.17 – Variação da umidade ótima em função do teor de fração grossa.	79
FIGURA 4.18 – Variação do mini-CBR imediato em função do teor de fração grossa.	80
FIGURA 4.19 – Variação do mini-CBR após 24 horas de imersão em função do teor de fração grossa.	81
FIGURA 4.20 – Variação da expansão em função do teor de fração grossa.	83
FIGURA 4.21 – Variação da contração em função do teor de fração grossa.	84
FIGURA 4.22 – Variação da massa específica aparente seca máxima em função do teor de finos.	86
FIGURA 4.23 – Variação da propriedade umidade ótima em função da porcentagem de fração fina.	88
FIGURA 4.24 – Variação do mini-CBR imediato em função do teor de finos.	89
FIGURA 4.25 – Variação do mini-CBR 24 h em função do teor de finos.	90
FIGURA 4.26 – Variação da expansão em função do teor de finos.	92
FIGURA 4.27 – Variação da contração em função do teor de finos.	93
FIGURA 4.28 – Variação da massa específica aparente seca máxima em função do valor de azul (V_a).	94
FIGURA 4.29 – Variação do mini-CBR imediato em função do valor de azul (V_a).	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Atividade dos argilo-minerais em função do coeficiente de atividade (FABBRI, 1994).	20
TABELA 2.2 – Classes de graus de arredondamento, segundo PETTIJOHN (1963).	37
TABELA 3.1 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais montados a partir da amostra de solo da rodovia Presidente Castelo Branco (identificada pelas iniciais cb).	45
TABELA 3.2 – Características das amostras de solos artificiais montados a partir da matriz fina proveniente do solo originário do município de Descalvado.	46
TABELA 3.3 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais possuindo fração fina l e fração grossa contínua c .	49
TABELA 3.4 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais possuindo fração fina l e fração grossa descontínua fina df .	49
TABELA 3.5 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais possuindo fração fina l e fração grossa descontínua grossa dg .	50
TABELA 4.1 – Valores de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) dos solos artificiais.	57
TABELA 4.2 – Resultados das classificações HRB e USCS dos solos artificiais.	59
TABELA 4.3 – Proposta de hierarquização qualitativa das classes de solos como subleito compactado nos sistemas de classificação USCS e HRB, segundo BARROSO (1996).	60
TABELA 4.4 – Proposta de hierarquização qualitativa das classes de solos como subleito compactado no sistema de classificação MCT, segundo BARROSO (1996).	61

TABELA 4.5 – Comportamento dos solos artificiais quando empregados em pavimentação, de acordo com as classificações HRB e USCS e com a escala qualitativa proposta por BARROSO (1996).	62
TABELA 4.6 – Classificação MCT dos solos artificiais e correspondentes comportamentos, segundo escala qualitativa proposta por BARROSO (1996).	63
TABELA 4.7 – Valores de massa específica dos sólidos, para as frações finas l e ag , e para as frações grossas c , df , dg e j .	65
TABELA 4.8 – Massa específica dos sólidos (ρ_s) calculada para os solos artificiais.	65
TABELA 4.9 – Porcentagem ideal de fração fina, na umidade ótima, correspondente ao preenchimento total dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	- American Association of State Highway Officials
AC	- Airfield Classification System
ASTM	- American Society for Testing and Materials
BS	- British Standard
c'	- coeficiente de deformabilidade da classificação MCT
CA	- coeficiente de atividade
CAA	- Civil Aeronautics Administration
CBR	- California Bearing Ratio
d'	- coeficiente que caracteriza o ramo seco da curva de compactação obtida pelo método MCT
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EA	- equivalente areia
e'	- índice da classificação MCT, calculado em função de P_i e d'
HRB	- Highway Research Board
IP	- índice de plasticidade
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LCPC	- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LC	- limite de contração
LL	- limite de liquidez
LP	- limite de plasticidade
MCT	- Miniatura, Compactado, Tropical; designação de uma metodologia de ensaios geotécnicos

MCV	- Moisture Condition Value
Mini-CBR	- ensaio de suporte da metodologia MCT
Mini-MCV	- ensaio MCV ou valor de MCV da metodologia MCT
Pi	- coeficiente que caracteriza a perda de massa por imersão, na classificação MCT
RIS	- razão do mini-CBR com imersão em água para o mini-CBR sem imersão em água
SAFL	- solo arenoso fino laterítico
USAE	- United States Army Enginneers
USCS	- United Soil Classification System
Va	- valor de azul

LISTA DE SÍMBOLOS

- ag* - fração fina extraída de um solo siltoso de alteração de granito
- c* - fração grossa com distribuição granulométrica contínua (partículas apresentando diâmetros entre 0,150 e 2,0 mm) ou solos montados com essa fração grossa
- cb* - fração grossa com partículas extraídas de um solo siltoso de alteração de granito ou solos montados com tal fração grossa
- df* - fração grossa com distribuição granulométrica descontínua e partículas finas (com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm) ou solos montados com essa fração grossa
- dg* - fração grossa com distribuição granulométrica descontínua e partículas grossas (com diâmetros entre 1,7 e 2,0 mm) ou solos montados com essa fração grossa
- j* - fração grossa montada com areia quartzosa coletada da mineração Jundu ou solos montados com tal fração grossa
- l* - fração fina extraída de um solo laterítico

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 Classificação de solos.....	4
2.1.1 Considerações preliminares.....	4
2.1.2 O significado de uma classificação.....	5
2.1.3 Sistemas de classificação de solos.....	6
2.1.3.1 Classificações de solos para uso rodoviário.....	10
2.1.3.2 Solos tropicais.....	14
2.1.3.3 Caracterização de solos através da utilização do ensaio de..... adsorção de azul de metileno.....	17
2.2 Estabilização granulométrica.....	23
2.2.1 Estabilização de um solo.....	23
2.2.2 Estabilização granulométrica.....	23
2.2.2.1 Influência da granulometria na estabilização de um solo.....	24
2.2.2.2 Influência dos índices plásticos na estabilização de um solo.....	25
2.2.2.3 Considerações referentes à resistência do solo.....	26
2.2.3 Critérios tradicionais sobre estabilização granulométrica.....	27
2.2.3.1 Restrições ao uso de critérios tradicionais para solos tropicais.....	28
2.2.4 Novos critérios de escolha de misturas	
estabilizadas granulometricamente	30
2.2.4.1 Critério de escolha de misturas de solos	
lateríticos arenosos finos.....	31

2.2.4.2 Critério de escolha de solo laterítico-brita de granulação descontínua.....	32
2.2.4.3 Critério para escolha de misturas artificiais de granulação fina (passando na peneira de 2,0 mm).....	33
2.2.4.4 Procedimentos para dosagem e escolha de misturas com elevada porcentagem de fração retida na peneira de 2,0 mm.....	33
2.3 Morfometria e textura superficial de partículas sedimentares.....	35
2.3.1 Morfometria.....	35
2.3.1.1 Grau de arredondamento.....	35
2.3.1.2 Grau de esfericidade.....	38
2.3.2. Textura superficial das partículas.....	39
 CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	 41
3.1 Considerações preliminares.....	41
3.2 Programa para estudo da influência dos parâmetros forma e textura..... dos grãos da fração grossa no comportamento dos solos.....	42
3.2.1 Obtenção da fração fina.....	43
3.2.2 Obtenção da fração grossa.....	43
3.2.3 Montagem dos solos artificiais.....	44
3.3 Programa para estudo da influência dos parâmetros curva granulométrica..... e teor da fração grossa no comportamento dos solos.....	45
3.3.1 Obtenção da fração fina.....	47
3.3.2 Obtenção da fração grossa.....	48
3.3.3 Montagem dos solos artificiais.....	48
3.4 Ensaios realizados.....	50
 CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	 52
4.1 Introdução.....	52
4.2 Distribuições granulométricas dos solos artificiais.....	53

4.3 Classificações HRB e USCS dos solos artificiais.....	56
4.4 Classificação MCT dos solos artificiais.....	63
4.5 Determinação da massa específica dos sólidos.....	64
4.6 Análise da influência dos parâmetros forma e textura dos grãos da fração.....	
grossa no comportamento dos solos.....	66
4.6.1 Comportamento da propriedade massa específica aparente.....	
seca máxima.....	68
4.6.2 Comportamento da propriedade umidade ótima.....	70
4.6.3 Comportamento da propriedade mini-CBR imediato.....	71
4.6.4 Comportamento da propriedade mini-CBR após 24 horas de imersão.....	72
4.6.5 Comportamento da propriedade expansão.....	73
4.6.6 Comportamento da propriedade contração.....	74
4.7 Análise das condições de preenchimento dos vazios existentes entre os.....	
grãos da fração grossa.....	75
4.8 Análise da influência do parâmetro teor da fração grossa no.....	
comportamento dos solos.....	76
4.8.1 Comportamento da propriedade massa específica aparente.....	
seca máxima.....	77
4.8.2 Comportamento da propriedade umidade ótima.....	78
4.8.3 Comportamento da propriedade mini-CBR imediato.....	79
4.8.4 Comportamento da propriedade mini-CBR após 24 horas de imersão.....	81
4.8.5 Comportamento da propriedade expansão.....	82
4.8.6 Comportamento da propriedade contração.....	83
4.9 Análise da influência do parâmetro distribuição granulométrica.....	
no comportamento dos solos.....	84
4.9.1 Comportamento da propriedade massa específica aparente.....	
seca máxima.....	85
4.9.2 Comportamento da propriedade umidade ótima.....	87
4.9.3 Comportamento da propriedade mini-CBR imediato.....	88
4.9.4 Comportamento da propriedade mini-CBR após 24 horas de imersão.....	90
4.9.5 Comportamento da propriedade expansão.....	91
4.9.6 Comportamento da propriedade contração.....	92

4.10 Apresentação da variação das propriedades tecnológicas dos solos artificiais em função do valor de azul (V_a).....	93
--	----

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	96
-----------------------------	----

5.1 Introdução.....	96
5.2 Sobre a influência das características de forma e textura dos grãos da..... fração grossa no comportamento dos solos.....	96
5.3 Sobre a influência do teor de fração grossa no comportamento dos solos....	97
5.4 Sobre a influência da variação da distribuição granulométrica da..... fração grossa no comportamento dos solos.....	98
5.5 Sugestões para a continuidade dessa pesquisa.....	99

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
---------------------------------	-----

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	107
--------------------------------	-----

ANEXO I: Fotografias das partículas das frações grossa j e cb .

ANEXO II: Fotografias das partículas das frações grossas provenientes da
mineração Didone (c , df e dg).

ANEXO III: Resultados dos ensaios de mini-CBR, expansão e contração na
energia intermediária, para os solos artificiais cb , c , df e dg .

ANEXO IV: Procedimento aproximado para determinação das condições de
preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração
grossa.

ANEXO V: Relação entre índices de suporte (RIS), para os solos artificiais cb , j ,
 c , df e dg .

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Diversas classificações foram desenvolvidas para utilização do solo como material de construção em rodovias, com o objetivo de inferir preliminarmente suas propriedades geotécnicas (mecânicas e hidráulicas).

Dentre as classificações mais utilizadas e largamente empregadas destacam-se a classificação USCS (Unified Soil Classification System) e a HRB (Highway Research Board), baseadas em ensaios de granulometria e limites de Atterberg. Entretanto, essas classificações foram desenvolvidas em países de clima temperado, não sendo em geral apropriadas para solos tropicais.

A busca por critérios classificatórios que estivessem relacionados com as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados originou o desenvolvimento, no início da década de 80, do método MCT de classificação de solos tropicais, por NOGAMI & VILLIBOR (1980, 1981, 1985). Esse método tem sido largamente empregado no Brasil, sendo capaz de identificar o comportamento laterítico dos solos. Entretanto a sistemática MCT apresenta algumas dificuldades referentes à complexidade e morosidade dos processos de ensaios e cálculos a serem realizados.

Várias pesquisas têm sido conduzidas no sentido de solucionar a complexidade da classificação MCT. FABBRI (1994) desenvolveu um trabalho sobre classificação de solos utilizando como parâmetros a distribuição granulométrica e o ensaio de absorção de azul de metileno pelo método da mancha.

Diversos estudos sobre a aplicação do ensaio da mancha de azul de metileno na classificação de solos têm demonstrado ser este uma ferramenta muito adequada para tal finalidade, pois constitui-se de um meio simples de qualificar a fração fina dos solos.

Esse ensaio é capaz, inclusive, de caracterizar solos lateríticos, conforme mostrado por CASANOVA (1986). Dessa forma, um índice como o coeficiente de atividade (CA) proposto por FABBRI E SÓRIA (1991), expresso pela relação entre a quantidade de azul de metileno consumida, em peso, por um grama da amostra de solo integral e a porcentagem em peso que o solo contém da fração cujo grau de atividade se quer avaliar, será menor para solos lateríticos do que para solos não lateríticos, uma vez que os primeiros possuem menor capacidade de adsorção do corante azul de metileno do que os últimos.

FABBRI (1994) mostrou que é possível estabelecer faixas de atividade e, a partir delas, inferir o comportamento dos materiais, através de comparação com outros, que apresentem comportamento conhecido.

BARROSO (1996), visando contribuir para a transformação do processo de caracterização da fração fina de solos tropicais, proposto por FABBRI (1994), numa classificação de solos, estudou a variação das propriedades tecnológicas dos solos em função do tipo e teor da fração fina, utilizando a técnica de montagem de solos artificiais, segundo a idéia manifestada por SEED, WOODWARD & LUNDGREN (1964a).

Procurando dar continuidade às pesquisas desenvolvidas, foi executado, no presente trabalho, um programa de montagem de solos artificiais, variando-se as

características da fração grossa. Foram variadas a distribuição granulométrica e a porcentagem da fração grossa presente, bem como as características de forma e textura de seus grãos, com a finalidade de estudar a influência dessas variações no comportamento dos solos.

O trabalho desenvolvido nessa dissertação encontra-se apresentado em cinco capítulos e cinco anexos, sendo que o Capítulo 1 refere-se a esta introdução.

No Capítulo 2 foi apresentada uma revisão da literatura, onde pode-se encontrar um breve histórico sobre classificação de solos, uma revisão sobre conceitos básicos de estabilização granulométrica e técnicas para determinação da morfometria e da textura superficial de partículas sedimentares.

O método empregado para a realização desse trabalho bem como os materiais utilizados encontram-se descritos no Capítulo 3, onde citam-se também os ensaios a que são submetidos os solos artificiais montados em laboratório.

No Capítulo 4 é realizada uma análise da influência da variação das características da fração grossa nas propriedades apresentadas pelos solos artificiais montados em laboratório.

As conclusões decorrentes das análises dos resultados obtidos em laboratório encontram-se apresentadas no Capítulo 5, onde são também realizadas sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

Nos Anexos I e II são apresentadas fotografias para caracterização das frações grossas utilizadas na montagem dos solos artificiais. Os resultados dos ensaios mini-CBR, expansão e contração podem ser encontrados no Anexo III. No Anexo IV é apresentado o procedimento seguido para determinação aproximada das condições de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas da fração grossa. Finalmente, no Anexo V encontra-se a relação entre índices de suporte (RIS), para os solos artificiais montados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

2.1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

O solo tem sido estudado e interpretado de diferentes maneiras, de acordo com o uso que dele se faz. As interpretações e definições são muitas e discordantes, pois as ciências ligadas ao solo envolvem conhecimentos variados, estendendo-se desde a gênese do solo até o mecanismo da alimentação vegetal. São muitos os ramos da ciência que estão ligados ao solo, podendo-se citar Geologia, Engenharia de Minas, Engenharia Civil, Mecânica dos Solos, Pedologia, Engenharia Agrônômica, Biologia, dentre outros.

O interesse que cada um desses ramos possui pelo solo varia, sendo portanto diferentes os sistemas de classificação dos solos por eles elaborados. Dessa forma, um sistema de classificação de solos deverá ser utilizado para a finalidade que foi proposto.

2.1.2 O SIGNIFICADO DE UMA CLASSIFICAÇÃO

Para se classificar determinado objeto, faz-se necessária a determinação das qualidades ou características peculiares a tal objeto. Segundo SÓRIA (1985), classificar é reconhecer um objeto pelos seus atributos. São escolhidos um ou mais atributos que servirão de base para a classificação. Dessa forma, dado determinado objeto a ser classificado, determinam-se seus atributos e realiza-se a classificação.

Uma vez determinada a classe a que pertence o objeto examinado, deve-se saber o significado disso em termos de consequências da ação. Ou seja, além da classificação, deve haver um processo de inferência indutiva que servirá de informação para orientar a ação.

A classificação isoladamente é tautológica. Faz-se necessário correlacionar cada classe de objetos com informações, que servirão de base para a ação. Nesse ponto realiza-se um processo de inferência, onde a experiência sobre o assunto adquire papel fundamental. Associam-se propriedades que foram observadas ou medidas e que serviram para determinação da classe do objeto com outras propriedades que não foram medidas, fazendo-se dessa forma previsões.

Quanto aos solos, sua classificação tem o objetivo de inferir características não medidas, a partir da medida de índices classificatórios, através de um processo de inferência indutiva, que não pode ser justificado pela lógica formal e depende, portanto, do acúmulo de informações pela experiência. A classificação deve estar de acordo com o conhecimento existente e deve se modificar acompanhando a evolução desse conhecimento.

2.1.3 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

A classificação dos solos surgiu quando o homem se interessou pelo seu cultivo, como uma forma de tentar distinguir suas características com relação à produtividade. Os critérios empregados eram empíricos e geralmente associavam a produtividade com outra característica mais visível, como cor, textura etc.

A história das civilizações agrícolas demonstra que as terras eram utilizadas de acordo com a sua produtividade. Na China, 6.500 anos AC, a produtividade serviu de base para a divisão dos solos em nove classes, com finalidade de cobrança de imposto territorial e determinação do tamanho das propriedades.

Segundo VIEIRA & VIEIRA (1983) várias têm sido as classificações apresentadas, variando de acordo com o interesse do grupo de pessoas para o qual cada classificação é elaborada. Foram propostas classificações petrográficas, baseadas nos materiais que deram origem aos solos; classificações com base na textura do solo; classificações geológicas aliadas às geográficas; classificações baseadas no processo químico de humidificação e mineralização da matéria orgânica e outras.

No último quartel do século XIX foram introduzidas as bases para as classificações pedológicas de caráter científico (VIEIRA & VIEIRA, 1983). O perfil de solo passou a ser considerado um corpo autônomo da superfície da crosta terrestre, com origem vinculada ao clima, sendo dessa forma conceituada a 'lei da zonalidade climática', segundo a qual a distribuição dos diferentes tipos de solo do mundo se daria em zonas que se sucederiam dos pólos ao equador, da mesma forma que as grandes zonas climáticas.

Essa classificação genético-natural foi largamente difundida e divide os solos em três ordens, zonal, intrazonal e azonal. Na ordem zonal estão incluídos solos bem amadurecidos, resultantes da atuação de fatores ativos como clima e vegetação. Na ordem intrazonal são colocados solos que apresentam características pedogenéticas mais ou menos desenvolvidas, resultantes de fatores como material originário e

topografia. Foram denominados solos azonais aqueles que aparecem com as mesmas características em qualquer região, não obedecendo à 'lei da zonalidade climática', pois o fator tempo não foi suficiente para imprimir características ao solo. Tratam-se de solos jovens ou imaturos.

Depois da Segunda Guerra Mundial, o potencial agrícola das nações menos desenvolvidas tornou-se alvo de interesse e um melhor sistema de classificação de solos passou a ser necessário, a fim de que os conhecimentos existentes sobre alguns solos pudessem ser transferidos entre localidades com solo e meio-ambiente similares. Além disso fazia-se necessário organizar o crescente conhecimento sobre solos.

Desenvolveu-se a taxonomia de solos – um sistema amplo de classificação de solos – não somente com a finalidade de aplicar as informações existentes na área de agronomia, mas também com a finalidade de servir aos interesses de uso do solo como material de construção, como fundação de construções, como referência para tributação e como base para uso e ocupação.

A razão prática para o seu desenvolvimento foi a descoberta de que solos com propriedades similares em meios também similares respondem do mesmo modo a práticas de gerência semelhantes, permitindo a transferência de experiência.

Programas de levantamentos de solos nos Estados Unidos começaram somente no século XIX, tendo sido a taxonomia de solos iniciada em 1951. Seu desenvolvimento foi lento, pois diferentes cientistas de solos contribuíram com diversas informações sobre o assunto.

Foram realizadas várias aproximações, com sucessivas modificações nas categorias e classes. De acordo com FERNAU (1977), em 1960 foi publicada pelo Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos uma taxonomia descritiva e revisada, conhecida como 7^a Aproximação.

Segundo JOHNSON e McCLELLAND (1977), a taxonomia de solos foi projetada para estar de acordo com os seguintes princípios:

- A classificação é uma criação do homem para propósitos específicos e deve ser projetada para servir a tais propósitos;
- O processo de classificação consiste no agrupamento de objetos e idéias, com base em suas propriedades em comum;
- A classificação deve estar de acordo com o conhecimento existente;
- A medida que o conhecimento do homem se amplia, a classificação deve sofrer mudanças, para fazer uso do novo conhecimento.

Como o conhecimento do homem evolui constantemente, o número de solos conhecidos continuará em constante aumento, podendo também haver mudanças na definição das classes, a fim de tornar o sistema mais lógico.

A taxonomia de solos é um sistema de classificação que possui seis categorias: ordem, sub-ordem, grande grupo, sub-grupo, família e série.

As ordens agrupam solos que apresentam em comum propriedades indicativas de processos pedogenéticos, tendo por base horizontes de solos, composição geral dos solos e grau de intemperização e/ou de lixiviação do solo. Os horizontes de solo refletem processos de intemperismo e são o resultado da influência combinada do clima, animais e plantas, num determinado tipo de material de origem. As superfícies dos horizontes dos solos são geralmente expostas por escavações durante a construção de rodovias, tendo grande influência nos critérios para determinação do comportamento de taludes.

As sub-ordens agrupam solos que dentro das ordens possuem regime de umidade e temperatura similares. Características mineralógicas gerais e a presença de certos horizontes de solos são outros critérios que regem a determinação da sub-ordem.

Os grandes grupos se referem principalmente aos perfis do solo, incluindo também características ditadas por processos pedogenéticos.

Os sub-grupos são agrupamentos que expressam desvios do conceito central de grande grupo ou outros níveis. Se referem também a características incomuns apresentadas pelos solos.

As famílias reúnem solos de um sub-grupo que possuem comportamento similar, determinado por características como textura, mineralogia, temperatura, profundidade etc.

Nas séries são consideradas propriedades referentes à gênese e comportamento dos solos, sendo seu nome designativo do local geográfico onde se encontra o solo. Não são muito descritivas, pois são nomeadas por localidade.

Pode-se observar que condições de umidade e temperatura são parâmetros fundamentais para classificação de solos na taxonomia de solos, uma vez que tais condições encontram-se estritamente relacionadas às propriedades apresentadas pelos solos, especialmente quando estes são utilizados em seu estado natural.

Também é possível identificar as características de umidade e temperatura do solo a partir da nomenclatura da taxonomia de solos, mas isso requer alguma familiaridade e conhecimento sobre o sistema de nomenclatura.

O tamanho das partículas e a composição mineralógica são outros parâmetros fundamentais para a classificação de solos em famílias, dentro dos sub-grupos.

Embora a taxonomia de solos, desenvolvida para ser utilizada na área de agronomia, também possa ser útil às demais áreas da ciência ligadas ao material inconsolidado presente na superfície da Terra, fornecendo informações valiosas, seu uso deve estar limitado a pequenas profundidades, assim como o uso dos sistemas de classificação pedológicos.

2.1.3.1 Classificações do solo para uso rodoviário

Para utilização do solo como material de construção em rodovias, constituindo aterros, base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos, faz-se necessário classificá-lo, com o objetivo de inferir preliminarmente suas propriedades geotécnicas (mecânicas e hidráulicas).

Foi a partir das classificações de solos utilizadas em agronomia que se desenvolveram aquelas voltadas para a engenharia civil, com o objetivo de prever o comportamento tecnológico dos solos quando empregados em obras viárias ou utilizados em seu estado natural.

Segundo CASAGRANDE (1947), as classificações inicialmente baseavam-se apenas em critérios granulométricos, sendo inadequadas para solos argilosos, uma vez que suas características geotécnicas mostram-se mais estritamente relacionadas com as propriedades plásticas do que com as propriedades granulométricas.

Apesar das limitações das classificações texturais, seu grande uso deriva da simplicidade de sua utilização. Nos Estados Unidos, as classificações texturais originais eram baseadas na porcentagem relativa das frações areia, silte e argila. A representação dessas classificações pode ser facilmente realizada através de diagramas triangulares. A classificação textural triangular mais largamente utilizada foi a U.S.Bureau, na qual os solos são divididos em 10 grupos, sendo aplicável somente à fração do solo com partículas de diâmetro menor que 2 mm.

O princípio do diagrama triangular consiste em que cada ponto representa um número em cada uma das três escalas (areia, silte e argila), correspondente à porcentagem daquela fração presente no solo. Entretanto, para classificar um solo, basta entrar com os valores dos percentuais existentes das frações areia e silte, que determinam um ponto no diagrama triangular. O uso de tais diagramas deve ser realizado com muito cuidado, pois segundo CASAGRANDE (1947) já foram constatadas sérias discrepâncias entre os nomes derivados dos diagramas triangulares e as propriedades físicas realmente apresentadas pelos solos.

O desenvolvimento das técnicas laboratoriais para determinação da distribuição granulométrica tem levado à utilização de curvas granulométricas para classificação de solos. Entretanto, a distribuição granulométrica isoladamente não tem se mostrado suficiente para avaliação das características físicas apresentadas pelos solos.

Entre os anos de 1927 e 1929, foi desenvolvida a classificação do United States Bureau of Public Road (PR – 29), a partir de estudos realizados para uso de solos na construção de rodovias secundárias. A definição original dos grupos estava fundamentada nas características de estabilidade dos solos quando submetidos ao carregamento das rodas. Se no início baseava-se quase exclusivamente na análise granulométrica, após 1930 foi complementada pelo uso dos limites propostos por Atterberg, incluindo critérios de plasticidade.

Em 1939 foi desenvolvida outra classificação no “Texas Highway Department”, baseando-se nas características de graduação e plasticidade do solo. Esta classificação foi desenvolvida para solos do Texas, a fim de que materiais naturais pudessem ser satisfatoriamente utilizados na construção de rodovias

Casagrande apresenta seu estudo inicial de classificação de solos em 1943, na reunião da “American Society of Civil Engineers”. Nessa época surge a “Airfield Classification System” (AC), constituindo-se de uma modificação da PR-29, com inclusão do exame visual e tátil dos solos. Esta classificação seria publicada em 1945, por Middlebrooks, engenheiro do United States Army Engineers (USAE),

sendo conhecida tanto por “Airfield Classification” como por classificação “de Casagrande”.

Em 1944 surge o “Civil Aeronautics Administration (CAA) Soil Classification System”, estabelecido para classificação de solos com finalidade de uso como subleito de pavimentos para aeroportos. Este sistema baseia-se na análise mecânica, nas características de plasticidade, na expansividade e no ensaio CBR (California Bearing Ratio).

Em 1945 é publicada a classificação que ficou conhecida como HRB (Highway Research Board), baseada em ensaios de granulometria e limites de Atterberg. A HRB, constituindo-se numa revisão da PR-29, foi adotada com algumas alterações pela “American Association for State Highway Officials” (AASHO) como M-145.

O sistema de classificação AASHO (M 145) não classifica os solos por tipo (como areias, argilas etc) mas simplesmente os divide em sete grupos principais. Embora esse sistema divida o solo em material granular e material silto-argiloso, a distinção é menos clara do que a existente no sistema de Casagrande. Não há uma distinção clara entre siltes e argilas e além disso solos orgânicos não são incluídos na classificação. Entretanto o sistema deve ser julgado com base em seus objetivos, que são especificamente avaliar a adequação dos solos para uso como subleito de pavimentos; os grupos com números mais altos são progressivamente menos adequados. Desse modo, o sistema é mais restrito e mais interpretativo do que o sistema de Casagrande, uma vez que não apenas classifica solos em grupos com propriedades similares mas também infere sobre a qualidade dos solos em cada grupo. Um melhor refinamento do sistema da AASHO nesse aspecto é o uso do índice de grupo, para avaliar a qualidade do subleito.

Em 1947 Casagrande publicou a classificação USCS (Unified Soil Classification System), que se fundamenta na determinação de parâmetros relacionados à granulometria e limites de Atterberg. A sistemática USCS tem como vantagem a possibilidade de inclusão de mais grupos de solo, fornecendo um refinado grau de

classificação, caso necessário. Baseada nesta última, foi publicada na Inglaterra em 1950 a “British Soil Classification”. Em 1965 Schon publica, na França, uma sistemática também baseada na USCS.

Segundo CARTER & BENTLEY (1991), a American Association for Testing and Materials adotou o Sistema Unificado como base para a classificação de solos ASTM, denominada ‘Standart Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes’, designada D2487. Embora a apresentação seja diferente do Sistema Unificado, o método utilizado para classificação é praticamente o mesmo.

O sistema de classificação British Standard (BS 5930) também está baseado na classificação de Casagrande, mas as definições de areia e pedregulho são totalmente diferentes e os solos finos são divididos em cinco classes de plasticidade, ao invés das duas divisões propostas originalmente por Casagrande. Além disso, um considerável número de sub-grupos foi introduzido.

Embora o sistema de Casagrande classifique os solos com base em suas propriedades de engenharia, ele não é interpretativo, uma vez que não classifica o solo como sendo bom ou ruim para determinado uso. Entretanto pode ser utilizado com o acréscimo de tabelas e gráficos que relacionem as classes de solo definidas pelo sistema de Casagrande com as propriedades apresentadas pelos solos.

Segundo MORA (1993), a maioria dos países adotou classificações de solos diretamente baseadas na USCS, publicada por Casagrande.

Entretanto, as classificações tradicionais foram desenvolvidas para solos de países de clima temperado, não sendo geralmente apropriadas para solos tropicais. Dessa forma, vários estudos têm sido realizados, no sentido de desenvolver um método simples e rápido, capaz de identificar as diferenças entre os vários tipos de solos tropicais e estimar suas propriedades de interesse como material integrante de um pavimento.

VERTAMATTI (1988) discutiu as dificuldades do uso das classificações tradicionais e apresentou uma relação de propostas de diversos autores, que incluem a consideração de aspectos como Índice de Atividade de Skempton; características pedogenéticas dos solos; relações moleculares sílica/alumina e sílica/sesquióxidos; resistência ao impacto, ao esmagamento e capacidade de troca catiônica; potencial eletro-resistivo; grau de intemperismo da rocha matriz; geomorfologia de solos lateríticos; peso específico e índice de vazios; absorção de água por lateritas; porosimetria; resistividade à cal, dentre outros.

No Brasil, temos a proposta de MEDINA & PREUSSLER (1980), que apresentaram uma classificação que permite a obtenção do módulo resiliente do solo a partir de índices classificatórios tradicionais e o sistema de classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), desenvolvido por NOGAMI & VILLIBOR (1981, 1985), capaz de identificar as diferenças entre os vários tipos de solos tropicais e prever seu comportamento, quando compactados, como parte integrante de um pavimento. Destacam-se também os trabalhos de SÓRIA (1985) e VERTAMATTI (1988) sobre classificação de solos.

2.1.3.2 Solos tropicais

Segundo NOGAMI & VILLIBOR (1995), a conscientização das peculiaridades dos solos tropicais, como material de construção rodoviária no Brasil, ocorreu a partir de 1930, quando foi criada a Seção de Solos de Fundação no IPT/SP. Ao longo dos anos, a experiência foi demonstrando que o estudo tradicional de solos, baseado na consideração de LL, IP, granulometria por peneiramento e outros índices, não atribuía aos solos tropicais qualidades correspondentes ao seu real desempenho.

Em geral, as normas tradicionais limitam superiormente o Limite de Liquidez (LL) em 25% e o Índice de Plasticidade (IP) em 6%, com a finalidade de controlar a variação de volume dos solos compactados, conseqüente à variação do teor de umidade por secagem ou imersão em água. Entretanto a experiência tem demonstrado que tais limites não se aplicam aos solos tropicais, pois existem vários

exemplos de solos tropicais com elevados LL e que se expandem muito pouco quando compactados segundo as normas tradicionais e imersos em água. Por outro lado, existem exemplos de solos que sofrem elevada expansão, apesar de apresentarem LL e IP de acordo com os limites impostos, significando que tais limites não são adequados para previsão do comportamento expansivo dos solos tropicais.

Consequentemente, o Gráfico de Plasticidade não deve ser aplicado a solos tropicais, o que anula a validade das classificações geotécnicas nele baseadas, como AASHO/HRB e USCS.

O excelente desempenho apresentado por trechos experimentais de pavimentos construídos com utilização de solo arenoso fino laterítico como base comprovou, no final da década de 60 e início da década de 70, as limitações dos critérios tradicionais para escolha de solos, quando aplicados a solos tropicais (VILLIBOR, 1981). Uma vez que os critérios tradicionais consideravam os solos arenosos finos lateríticos inadequados para a construção de pavimentos e estando comprovado o excelente desempenho por eles apresentado, tornou-se evidente a necessidade do desenvolvimento de novos critérios de escolha, que pudessem ser aplicados aos solos tropicais. Tais critérios deveriam estar relacionados com as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados.

A busca por tais critérios originou o desenvolvimento, no início da década de 80, do método MCT de classificação de solos tropicais, por NOGAMI & VILLIBOR (1980,1981,1985). Tal método tem sido amplamente utilizado e sua eficácia foi comprovada, segundo NOGAMI & VILLIBOR (1995), pelo bom desempenho de mais de 5000 Km de rodovias vicinais com base de solo arenoso fino laterítico e mais de 400Km de rodovias de tráfego pesado com base de solo laterítico com brita descontínua.

FABBRI (1994) apresentou um relato sobre o histórico do sistema de classificação MCT. Segundo este autor, o Professor Job Shuji Nogami apresentou em 1979 o

ensaio MCV, Moisture Condition Value, desenvolvido por PARSONS (1976), e uma classificação de solos baseada nos resultados deste ensaio (PARSONS & BOLDEN, 1979). Nessa ocasião propôs uma adaptação desse ensaio, com utilização de corpos de prova de dimensões reduzidas. Esse ensaio, denominado mini-MCV, seria realizado com utilização do equipamento de compactação e cilindro do ensaio mini-CBR.

A pedido do Prof. Nogami, SÓRIA & FABBRI (1980) realizaram uma primeira tentativa de padronização do ensaio mini-MCV. Com a finalidade de avaliar o comportamento do solo quando imerso em água, NOGAMI & VILLIBOR (1980) propuseram um ensaio executado com os corpos de prova que resultam do ensaio mini-MCV, ensaio este posteriormente denominado “Perda de Peso por Imersão”.

O sistema de classificação de solos MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) foi proposto por NOGAMI & VILLIBOR (1981), com base nos resultados dos ensaios mini-MCV e Perda de Peso por Imersão. Tal sistema é capaz de identificar o comportamento laterítico dos solos. A previsão das características dos solos pode ser feita através da carta de propriedades da classificação MCT (NOGAMI & VILLIBOR, 1985).

Entretanto, a sistemática MCT apresenta algumas dificuldades referentes à complexidade e morosidade dos ensaios envolvidos e cálculos a serem realizados. Outra restrição se refere à dúvida existente quanto à repetibilidade dos índices e parâmetros obtidos dos ensaios que compõem a classificação MCT. PEIXOTO, FABBRI & NOGUEIRA (1996) calcularam os valores de repetibilidade dos parâmetros que compõem a classificação MCT, para níveis de confiança de 90 e 95%, utilizando os resultados de FABBRI (1994). Dos resultados obtidos a partir da análise de três amostras de solos, concluiu-se que, de modo geral, os parâmetros que compõem a classificação MCT são não-repetíveis, independentemente do modelo e do nível de confiança adotados.

Procurando solucionar as dificuldades da classificação MCT, têm sido desenvolvidos diversos estudos. Os próprios autores propuseram o ensaio S-MCV (NOGAMI & VILLIBOR, 1985), executado com equipamento sub-miniatura (cilindro de 26 mm de diâmetro), com a finalidade de reduzir a quantidade de amostra utilizada e facilitar sua utilização em campo.

FABBRI (1994), procurando estabelecer um processo simples, econômico e rápido para caracterizar solos, considerando as características peculiares dos solos tropicais, desenvolveu um trabalho sobre classificação de solos utilizando como parâmetros a distribuição granulométrica e o ensaio de absorção de azul de metileno pelo método da mancha, sendo este último para qualificar a parte fina do solo analisado.

2.1.3.3 Caracterização de solos através da utilização do ensaio de adsorção de azul de metileno

Várias pesquisas têm sido conduzidas no sentido da utilização do ensaio da mancha de azul de metileno na caracterização e classificação de solos, podendo-se citar LAN (1977), que considerou esse ensaio adequado para tal finalidade.

Em 1979 foi publicado pelo LCPC (Laboratoires des Ponts et Chaussées) um anteprojeto sobre o ensaio de azul de metileno, no qual este foi definido como sendo uma medida da capacidade que as partículas dos solos possuem de adsorver ionicamente o corante azul de metileno, sendo que o resultado do ensaio depende diretamente da quantidade e da natureza mineralógica da fração argila. Nesse anteprojeto, foi definido o processo de execução do ensaio, assim como a aparelhagem e os produtos a serem utilizados. Foram também estabelecidos os índices a serem determinados através dos resultados obtidos.

Segundo o LCPC (1979), o valor de azul foi definido como a quantidade de azul de metileno, em gramas, adsorvida por 100 g de solo; o coeficiente de atividade da fração do solo com partículas menores que 0,080 mm ou 0,002 mm foi definido

como sendo a razão entre o valor de azul do solo multiplicado por 100 e a porcentagem que o solo possui da fração analisada.

De acordo com LAN (1980), o ensaio de azul de metileno mede a superfície da fração argilosa ativa, que depende da natureza do argilo-mineral presente no solo. LAN (1980), utilizando o ensaio da mancha de azul de metileno, estudou o consumo desse corante por misturas artificiais de argila, constatando que o valor de azul varia linearmente com a porcentagem de cada tipo de argilo-mineral presente na mistura, sendo influenciado mais significativamente pelo aumento da proporção do argilo-mineral mais ativo. O referido autor deduziu nesse estudo que a quantidade total de azul de metileno adsorvida por uma mistura de vários tipos de argilo-minerais é igual à soma das quantidades de azul de metileno consumidas por cada um dos tipos de argilo-minerais presentes na mistura.

Tendo em vista as vantagens da aplicação de um ensaio rápido e facilmente executável, como o ensaio da mancha de azul de metileno, no controle da compactação de solos, KERGOET & CIMPELLI (1980) estudaram o comportamento de areias contaminadas por argila, realizando ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, equivalente de areia, proctor normal e azul de metileno. Esses autores chegaram a correlações entre o valor de azul e a massa específica aparente seca máxima obtida do ensaio de compactação na energia normal, concluindo que existe real possibilidade de se introduzir o valor de azul nas classificações atuais de solos, desde que complementado por critérios granulométricos indispensáveis.

BOURGUET, BROQUET & ROUSSEAU (1985) propuseram um sistema de classificação baseado no ensaio da mancha de azul de metileno, através do qual determina-se a superfície específica do material analisado, e de granulometria, com a finalidade de determinar parâmetros relacionados à forma da curva granulométrica. MAGNAN & YOUSSEFIAN (1989) também propuseram uma classificação de solos finos com base nos mesmos ensaios utilizados por BOURGUET, BROQUET & ROUSSEAU (1985).

O ensaio da mancha de azul de metileno é capaz, inclusive, de caracterizar solos lateríticos, conforme mostrado por CASANOVA (1986). Uma vez que solos lateríticos ou de comportamento laterítico possuem como principal argilo-mineral constituinte a caulinita revestida por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (FABBRI, 1994) e sendo pequena a adsorção do corante azul de metileno por solos com tais características (CASANOVA, 1986), resulta que solos lateríticos ou de comportamento laterítico possuem menor capacidade de adsorção deste corante do que solos de comportamento não-laterítico, considerando-se proporções equivalentes de fração argila.

Dessa forma, um índice como o coeficiente de atividade (CA) proposto por FABBRI & SÓRIA (1991), expresso pela relação entre a quantidade de azul de metileno consumida, em gramas, por um grama da amostra de solo integral e a porcentagem em peso que o solo contém da fração cujo grau de atividade se quer avaliar, será menor para solos lateríticos do que para solos não lateríticos, refletindo a atividade média dos argilo-minerais presentes (FABBRI & SÓRIA, 1995).

FABBRI(1994) mostrou, através de ensaios realizados em 297 amostras, que o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha é capaz de identificar o tipo de argilo-mineral presente na fração fina dos solos. No referido trabalho, foi apresentado um ábaco de caracterização da fração fina e uma tabela de graus de atividade, reproduzidos na FIGURA 2.1 e na TABELA 2.1, respectivamente. O referido autor ressalta, entretanto, que o coeficiente de atividade não deve ser utilizado de forma desvinculada da porcentagem de argila contida no solo, pois esta última influenciará de forma significativa o comportamento do mesmo.

TABELA 2.1 – Atividade dos argilo-minerais em função do coeficiente de atividade (FABBRI, 1994).

Coeficiente de Atividade – CA (10^{-3} g/g)	Atividade dos Argilo-Minerais Presentes no Solo
CA<11	Pouco Ativos
11<CA<80	Ativos
CA>80	Muito Ativos

FIGURA 2.1 – Ábaco para caracterização do grau de atividade da fração argila dos solos (FABBRI, 1994).

Uma vez quantificada a atividade da fração argila do solo, pode-se compará-la com valores de outros materiais, que possuam composição e comportamento conhecidos. Dessa forma, se os graus de atividade e as distribuições granulométricas de dois solos forem semelhantes, pode-se inferir que tais solos se comportem de forma também semelhante.

Com o objetivo de contribuir para a transformação do processo de caracterização da fração fina de solos tropicais, proposto por FABBRI (1994), numa classificação de solos, BARROSO (1996) estudou a variação das propriedades tecnológicas dos solos em função do tipo e teor da fração fina. Para isso, simulou as condições ideais de campo, através da montagem em laboratório de amostras de solos, segundo a idéia manifestada por SEED, WOODWARD & LUNDGREN (1964a).

Esses autores compuseram solos artificiais misturando, aos pares, argilo-minerais de caulinita, illita e bentonita, para estudar as relações existentes entre o limite de liquidez e as características da argila contida em um solo, e entre o potencial de expansão e a composição do argilo-mineral da fração argila. Os resultados assim obtidos mostraram-se em excelente concordância com os determinados empiricamente por Casagrande, através da utilização de argilas naturais.

A montagem de solos artificiais em laboratório é um recurso que possibilita o estudo de características específicas dos solos, pois permite a obtenção de solos diferindo entre si apenas quanto ao parâmetro escolhido para ser analisado.

SÓRIA (1977) utilizou a técnica de montagem de solos artificiais para caracterizar as diferenças tecnológicas entre solos arenosos lateríticos e solos residuais saprolíticos. A partir de um solo laterizado e de um solo residual saprolítico, separados em duas frações (retida e passada na peneira de abertura nominal 0,075 mm), montou solos artificiais através da remontagem em diferentes porcentagens, das frações obtidas dos solos originais. A separação dos solos nas duas frações granulométricas foi realizada através de peneiramento com lavagem na peneira de abertura nominal 0,075 mm. O material passado pela peneira foi secado em estufa a 60°C.

NOGAMI & VILLIBOR (1985) realizaram testes com misturas preparadas em laboratório, tendo por objetivo determinar a influência da graduação da fração areia e da natureza e porcentagem de finos, nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos. Foram utilizados cinco tipos de graduação de areia, obtida de depósitos

naturais, e quatro tipos de finos, obtidos através de peneiramento com lavagem de solos naturais. A cada tipo de areia foram adicionados de 15 a 60 % de finos, sendo que a homogeneização foi realizada por mistura úmida e posterior secagem ao ar. Os resultados obtidos através desse estudo mostraram-se coerentes com os obtidos anteriormente por NOGAMI & VILLIBOR (1980), utilizando solos naturais.

A técnica de montagem de solos artificiais tem se mostrado muito útil, pois permite que sejam obtidos solos de difícil seleção na natureza (BARROSO & FABBRI, 1996). Além disso, os estudos realizados com solos montados em laboratório têm demonstrado que os resultados obtidos de ensaios realizados com tais solos são semelhantes aos obtidos de ensaios realizados com solos naturais, de mesmas características.

BARROSO (1996) montou quinze amostras de solos, obtidas pela mistura de uma mesma fração grossa (retida na peneira de abertura nominal de 0,075 mm) com três diferentes matrizes finas (pouco ativa, ativa e muito ativa), cada uma delas empregada em cinco teores (20, 40, 60, 80 e 100%). Através desse estudo gerou uma maneira preliminar de avaliação das propriedades tecnológicas dos solos, a partir do valor de azul (quantidade de azul de metileno, em peso, consumida por um grama de solo), que está intimamente relacionado com o tipo e o teor da fração fina presente.

2.2 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

2.2.1 ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO

A estabilização de um solo compreende a alteração de qualquer propriedade do mesmo, que melhore seu comportamento sob o ponto de vista de aplicação à engenharia (VILLIBOR, 1982). Quando é utilizada para fins rodoviários, constitui-se de um processo que tem por finalidade conferir ao solo características de deformação e de resistência que o tornem apto a constituir determinada camada do pavimento.

Um pavimento deve suportar o carregamento para o qual foi projetado, sob as condições climáticas da região na qual será construído, de modo que não apresente falhas estruturais ou funcionais, isto é, o pavimento deverá suportar os esforços solicitantes sem sofrer ruptura ou apresentar deformações excessivas, que causem danos aos veículos ou desconforto aos passageiros. Seu desempenho deve ser compatível com o nível de serviço para o qual foi projetado e depende significativamente das características dos solos que constituem suas camadas.

2.2.2 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A estabilização granulométrica ou mecânica consiste na mistura e compactação de solos naturais, rochas alteradas naturais, misturas artificiais de solos, materiais de solos (areia, pedregulho) e materiais de pedra (pedra britada, pedrisco, pó de pedra) ou ainda por qualquer combinação desses materiais, em proporções adequadas, de modo que o produto final possua maior resistência às cargas, ao desgaste e à erosão, estando adequado para aplicação em cada caso particular. A estabilização granulométrica deve conferir ao solo as características requeridas de atrito interno, de modo que não ocorram deformações excessivas ou ruptura por cisalhamento.

2.2.2.1 Influência da granulometria na estabilização de um solo

Segundo YODER & WITCZAK (1975), um material granular projetado para máxima estabilidade deve possuir alto atrito interno, a fim de resistir às deformações. Existe uma relação direta entre estabilização e granulometria, sendo que a estabilização é maior para distribuições granulométricas que proporcionem uma máxima densificação, através do preenchimento, por grãos menores, dos vazios existentes entre os grãos maiores, mas sem que seja perdido o contato entre eles, a fim de que existam forças de atrito entre os mesmos.

Através da utilização de modelos teóricos, SANTANA (1983) mostrou que a porcentagem de vazios existente em um agregado de uma só dimensão é da ordem de 45%, independentemente de seu diâmetro. Essa porcentagem de vazios pode ser reduzida misturando-se tal fração de agregado com outra de diâmetro menor, também de uma só dimensão. Continuando-se o processo, a porcentagem de vazios irá diminuindo sucessivamente, sendo que o volume de vazios final da mistura será tanto menor quanto maior for o diâmetro das partículas da fração de agregado de maior dimensão. Conclui-se, dessa forma, que a máxima densificação é conseguida com curvas granulométricas de distribuição contínua. Além disso, a densidade aumentará com o aumento da rugosidade e angularidade das partículas da fração grossa (SANTANA, 1983).

Curvas com granulometria contínua podem ser representadas pela eq. (1).

$$P = 100\left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (1)$$

onde

P = porcentagem em peso do material que passa na peneira em questão;

d = abertura da peneira;

D = máxima dimensão do agregado;

n = coeficiente que depende das peculiaridades geométricas do material, geralmente variando entre 0,33 e 0,50.

Geralmente a máxima densificação ocorre para $n = 0,5$, quando temos a chamada “equação de Fuller”.

2.2.2.2 Influência dos índices plásticos na estabilização de um solo

Os critérios tradicionais fixam valores máximos para LL e IP com a finalidade de evitar perda de suporte ou expansão excessiva.

Admitindo-se que a fração grossa do solo seja praticamente insensível à água, a mudança de estado irá depender basicamente da fração fina. Como a fração fina do solo só pode absorver água até atingir o “estado líquido”, ou seja, até sua umidade atingir o limite de liquidez (LL), este avalia a tendência de absorção de água pelo solo estabilizado e está ligado com a manutenção da estabilização com a variação do teor de umidade.

Quanto ao limite de plasticidade (LP), este avalia a tendência à expansão do solo estabilizado. Considerando-se que o solo só possa absorver água até atingir o estado líquido (LL) e estando o solo, após a compactação, na umidade LP, a máxima quantidade de água que os finos podem absorver é indicada pelo $IP = LL - LP$. Desse modo, quanto maior for IP, maior será a quantidade de água que pode ser absorvida pelo solo.

Após a compactação, os finos irão absorver água e aumentar de volume, sendo que esse aumento deverá ser no máximo igual ao volume de vazios do solo ou mistura, pois caso contrário haverá o afastamento dos grãos graúdos, diminuindo a resistência por atrito. É por esse motivo que as especificações que tratam da granulometria do solo limitam superiormente o LL e o IP.

No que se refere ao limite de contração, sabe-se que se um solo for compactado no teor de umidade correspondente ao limite de plasticidade (LP), durante o processo de secagem perderá peso e volume até atingir a umidade correspondente ao limite de contração (LC), a partir do qual passará a perder apenas peso. Portanto, quanto maior a diferença LP-LC, maior será a diminuição de volume dos finos e maior a probabilidade de aparecerem trincas de retração.

2.2.2.3 Considerações referentes à resistência do solo

No início do estudo da estabilização granulométrica de solos, considerava-se que o estabelecimento da distribuição granulométrica e dos índices plásticos dos solos seriam suficientes na determinação de sua estabilização. Desse modo, as especificações tradicionais determinam curvas granulométricas para máxima densificação e valores máximos para LL e LP. Entretanto, este critério é pouco funcional, pois a fixação dos valores de LL e IP depende da quantidade de material que passa pela peneira de abertura nominal 0,042 mm e das condições climáticas do local em que será construído o pavimento.

Em virtude dessas restrições, foi adicionado como critério para determinação da estabilização dos solos, a determinação de sua resistência por ensaio mecânico, através por exemplo do Método do Índice de Suporte Califórnia (CBR). O ensaio CBR é o mais utilizado para testar se uma camada estabilizada granulometricamente apresenta as características esperadas de resistência à deformação e ruptura por cisalhamento, embora haja a possibilidade do uso de outros ensaios, como por exemplo, o ensaio triaxial dinâmico.

Dessa forma, as especificações sobre camadas estabilizadas granulometricamente passaram a fixar, além das características granulométricas e índices de plasticidade, também o Índice de Suporte Califórnia mínimo e a expansão máxima.

2.2.3 CRITÉRIOS TRADICIONAIS SOBRE ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Tradicionalmente admitia-se que, uma vez atendidas as exigências referentes a granulometria e índices plásticos, estivesse assegurado o bom desempenho de um solo, em virtude da relação direta entre granulometria e estabilidade e entre índices plásticos (LL e IP) e a permanência relativa dessa estabilidade, em função de perda e absorção de água

Posteriormente foram adicionados critérios referentes à resistência do solo, medida através de ensaios mecânicos, sendo muito utilizado o ensaio CBR (California Bearing Ratio).

Dessa forma, para a escolha de misturas estabilizadas granulometricamente, os critérios tradicionais fazem exigências relativas à:

- granulometria, onde são estabelecidas várias faixas granulométricas caracterizadas por seu diâmetro máximo, baseadas em curvas de máxima densidade estabelecidas tradicionalmente por Fuller e Talbot (VILLIBOR, 1982). Além disso, a maioria das especificações estabelece que a porcentagem do material que passa na peneira n°200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira n°40;
- plasticidade, onde são estabelecidos limites superiores para o limite de liquidez e índice de plasticidade, em frações passadas na peneira 0,42 mm. Esses limites geralmente são, para bases e sub-bases $IP \leq 6$ e $LL \leq 25$;
- equivalente de areia (EA), onde estabelece-se geralmente que o EA deve ser igual ou superior a 30%;

- resistência da mistura, avaliada pelo ensaio CBR. Segundo VILLIBOR (1982), valores característicos mínimos exigidos para o ensaio CBR são 60% e 80%, de acordo com a intensidade do tráfego existente, e expansão máxima de 0,5%;
- desgaste dos grãos retidos na peneira de 2,0 mm de abertura, medido normalmente pelo ensaio de abrasão Los Angeles, com valor máximo permitido de 40% ou 50%.

Deve-se ressaltar, entretanto, que os valores estabelecidos para cada critério, a fim de que o material seja considerado estabilizado granulometricamente, variam em função da camada do pavimento que este constituirá, da importância do tráfego previsto e do clima da região.

2.2.3.1 Restrições ao uso de critérios tradicionais para solos tropicais

a) Quanto à granulometria

Os critérios tradicionais relacionados à granulometria têm significado independente da natureza dos componentes finos da mistura. Entretanto, as características apresentadas pelos finos lateríticos possibilitam a utilização de materiais de granulação mais fina, mal graduados e de grãos arredondados, contra indicados pelos critérios tradicionais.

b) Quanto aos limites plásticos

Os limites tradicionais impostos para LL e IP não se aplicam às condições tropicais. Por exemplo, solos argilosos lateríticos e argilas lateríticas apresentando elevados valores de LL e IP, quando apropriadamente compactados, mesmo em contato com a

água livre, não se expandem e não perdem sensivelmente a capacidade de suporte (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Esse comportamento peculiar dos solos lateríticos está relacionado às propriedades físico-químicas da fração argila de tais solos, que possui constituição química e mineralógica diferenciada.

Por outro lado, existem vários exemplos de solos tropicais saprolíticos atendendo as especificações tradicionais, cujo desempenho apresentado é insatisfatório, verificando-se valores de CBR relativamente baixos e grandes perdas de suporte acompanhadas por expansão, quando a camada constituída por esses solos entra em contato com água livre.

O próprio método de determinação do limite de liquidez mostra-se falho para solos tropicais, uma vez que a espatulação intensa de solos tropicais lateríticos e saprolíticos, que precede a determinação do LL no aparelho de Casagrande é uma das causas de dispersão de resultados de ensaios efetuados por operadores diferentes. Segundo NOGAMI & VILLIBOR (1995), a intensa espatulação de solos lateríticos provoca a elevação de LL e IP enquanto que uma intensa espatulação de solos saprolíticos micáceos e/ou caoliníticos ocasiona uma redução do LL e IP.

c) Quanto à capacidade de suporte e expansão

Os critérios tradicionais de escolha de misturas para compor camadas de pavimentos não exigiam um valor mínimo para sua capacidade de suporte e máximo para expansão, uma vez que supunham que, atendidas as exigências relativas à granulometria, limites plásticos e resistência dos grãos, as demais características estariam automaticamente atendidas.

Em virtude das discrepâncias ocorridas com misturas utilizadas em regiões tropicais, foram adicionadas aos critérios tradicionais exigências relativas a um mínimo de

suporte (ou resistência) e máximo de expansão, sendo utilizado para essa finalidade o ensaio CBR (California Bearing Ratio).

d) Quanto ao equivalente de areia

O equivalente de areia é um ensaio em utilizável especialmente para misturas pobres em finos argilosos e/ou siltosos, não considerando as peculiaridades dos solos tropicais, como por exemplo dos solos arenosos finos lateríticos, que não satisfazem às exigências desse critério.

2.2.4 NOVOS CRITÉRIOS DE ESCOLHA DE MISTURAS ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE

Não existe um único critério genérico abrangendo todos os tipos de misturas. Inicialmente, foi estabelecido um critério de escolha de solos naturais lateríticos, de granulação fina (passando totalmente na peneira de 2,00 mm ou com uma pequena fração retida na mesma), utilizáveis sem quaisquer correções granulométricas em bases de pavimentos destinados a trânsito de leve a médio.

Em seguida, foi desenvolvido um critério para escolha de solo arenoso fino laterítico utilizável em misturas de solo-brita para bases de pavimentos que suportam tráfego pesado.

Para escolha de misturas artificiais de granulação fina (passando na peneira de 2,0mm) foi sugerido um outro critério. Foram também sugeridos procedimentos para dosagem e escolha de misturas com elevada porcentagem de fração retida na peneira de 2,0 mm, incluindo dessa forma misturas tradicionais, porém adaptados para condições ambientais tropicais.

O bom desempenho de pavimentos com bases constituídas por misturas de solos tropicais somente será garantido se esse tipo de base for empregado dentro de certas condições, ditadas pela experiência acumulada no Estado de São Paulo. Isso não significa que esse tipo de base não possa ser utilizado sob outras condições, em outros locais, desde que se adquira experiência a respeito, através da construção de trechos experimentais.

Os critérios de escolha citados foram desenvolvidos para serem aplicados às regiões tropicais brasileiras com tipo climático (Sistema Koppen) Cwa (quente com inverno seco), Aw (tropical com inverno seco) e Cwb (temperado com inverno seco); precipitação anual média de 1000 a 1800 mm e temperatura média anual acima de 20°C, sem possibilidade de congelamento das camadas do pavimento e do subleito.

2.2.4.1 Critério de escolha de mistura de solos lateríticos arenosos finos

NOGAMI, VILLIBOR & SERRA (1987) propuseram um método de escolha de misturas de solos lateríticos arenosos naturais, de granulação fina (passando totalmente na peneira de 2,00 mm ou com pequena fração retida na mesma), designados abreviadamente por SAFL, utilizáveis sem quaisquer correções granulométricas, em bases de pavimentos destinados a trânsito de leve a médio. Tal método fundamenta-se nas seguintes características: granulometria por peneiramento; classificação segundo sistemática MCT; valor de suporte Mini-CBR com e sem imersão; contração/expansão e outras, conforme o caso.

As condições impostas são as seguintes:

- granulometria tal que o solo passe integralmente na peneira de 2,0mm de abertura ou possua uma parcela insignificante retida na mesma;
- classificação MCT: classe de solos de comportamento laterítico, ou seja, classes LA, LA', ou LG';

- propriedades apresentadas por corpos de prova compactados na energia intermediária:

Mini-CBR sem imersão	$\geq 40\%$
perda de suporte por imersão	$< 50\%$
expansão, sem sobrecarga padrão	$< 0,3\%$
contração	0,1 a 0,5 %
coeficiente de sorção	10^{-2} a 10^{-4} cm/min ^{1/2}

2.2.4.2 Critério de escolha de solo laterítico-brita de graduação descontínua

Embora não exista um método geral de escolha de misturas solo-brita, VILLIBOR & NOGAMI (1984) desenvolveram um critério com base em dados experimentais, que consiste em:

- determinar as características do solo, que deverá pertencer a classe L (solo de comportamento laterítico) e aos grupos LA (areia) , LA' ou LG' (areia argilosa e argila arenosa) e atender ao critério de escolha de solos lateríticos arenosos finos;
- determinar as características do agregado britado, que deve apresentar abrasão Los Angeles inferior a 30%;
- determinar as características da mistura solo-brita, que deve conter no mínimo 50% em peso de brita, suporte medido no ensaio CBR superior a 80% e expansão inferior a 0,2%.

2.2.4.3 Critério para escolha de misturas artificiais de granulação fina (passando na peneira de 2,0 mm)

NOGAMI, VILLIBOR & SERRA (1987) propuseram uma metodologia para escolha de misturas de solos nas quais entram componentes típicos das regiões tropicais, passando integralmente na peneira de 2,0 mm ou com porcentagem desprezível de fração retida na mesma.

A metodologia proposta consiste nos seguintes procedimentos:

- classificar os componentes que constituirão a mistura segundo a metodologia MCT, obtendo-se sua localização no gráfico classificatório e a variação de suporte, com e sem imersão, dos corpos de prova resultantes do ensaio;
- desconsiderar componentes não lateríticos, a menos que sejam areias quartzosas do grupo NA, não apresentando quantidade significativa de siltes e areias micáceas;
- executar misturas experimentais, classificá-las segundo a metodologia MCT e determinar a variação de suporte, com e sem imersão, dos corpos de prova resultantes dos ensaios de compactação efetuados;
- escolher misturas apresentando propriedades satisfatórias segundo o critério para escolha de SAFL naturais.

2.2.4.4 Procedimentos para dosagem e escolha de misturas com elevada porcentagem de fração retida na peneira de 2,0 mm

Existem numerosos tipos de solos peculiares das regiões tropicais, com elevada porcentagem de fração retida na peneira de 2,0 mm de abertura. Tais solos não atendem às especificações tradicionais, tampouco aos critérios vistos acima, exigindo

dessa forma o desenvolvimento de especificações próprias. Grande parte dessas especificações constitui-se em adaptações das especificações tradicionais, com aumento da tolerância dos limites das propriedades e introdução de algumas considerações de novas propriedades. Entretanto não existe um consenso sobre o assunto, uma vez que tais critérios apresentam limitações, referentes sobretudo à grande quantidade de amostra exigida. NOGAMI & VILLIBOR (1992) sugeriram um critério simplificado, consistindo basicamente dos seguintes procedimentos:

- determinação da granulometria dos componentes, segundo o procedimento tradicional;
- avaliação da resistência à fragmentação da fração retida na peneira de 2,0mm de abertura, realizando-se, caso necessário, o ensaio de resistência apropriado, como por exemplo o ensaio de abrasão Los Angeles;
- classificar a fração passada na peneira de 2,0 mm de abertura, segundo a metodologia MCT;
- dosar granulometricamente os componentes, utilizando-se faixas granulométricas tradicionais, utilizando-se preferencialmente componentes de comportamento laterítico e com fração retida na peneira de 2,0 mm pouco fragmentável, por exemplo com abrasão Los Angeles menor que 50%;
- obter, através da dosagem dos componentes, uma ou mais misturas promissoras, que em seguida deverão ser submetidas a ensaios de suporte, como por exemplo o ensaio CBR, e/ou resiliência.

2.3 MORFOMETRIA E TEXTURA SUPERFICIAL DE PARTÍCULAS SEDIMENTARES

2.3.1 MORFOMETRIA

A forma e o arredondamento de partículas sedimentares são propriedades fundamentais para as ciências geológicas, pois podem fornecer informações sobre a história de depósitos sedimentares. Por exemplo, a forma de um seixo pode estar relacionada com o fato deste ser marinho ou fluvial. Por outro lado, o arredondamento ou a angularidade de uma partícula reflete a distância e o rigor do transporte a que esta foi submetida. Dessa forma, se for possível detectar graus de arredondamento de partículas sucessivamente maiores, poderá ser determinada a direção em que o sedimento foi transportado.

A importância das características de forma (ou esfericidade), que dependem dos comprimentos dos eixos principais perpendiculares entre si, e arredondamento das partículas originou a necessidade da elaboração de processos que expressassem numericamente tais características. Foram elaborados diversos métodos de determinação dos graus de arredondamento e esfericidade das partículas.

Faz-se importante salientar que arredondamento e esfericidade são duas características distintas das partículas, sendo que uma partícula de forma cilíndrica pode ser tão arredondada quanto uma partícula perfeitamente esférica. O arredondamento é uma função da agudez das arestas e dos vértices das partículas, sendo possível haver partículas perfeitamente arredondadas, independentemente de sua forma. O arredondamento de uma partícula aumenta quando os raios de curvatura dos vértices da partícula aumentam

2.3.1.1 Grau de arredondamento

O grau de arredondamento de uma partícula pode ser expresso como a relação entre a média dos raios de curvatura de seus vértices e o raio de curvatura da máxima esfera inscrita na partícula. Muitas vezes, entretanto, faz-se necessário, por praticidade,

trabalhar com figuras bidimensionais ao invés de se trabalhar com a partícula tridimensional. Nesses casos são realizadas medidas a partir de imagens projetadas da partícula sobre uma tela, sendo que o grau de arredondamento é definido como o raio médio de curvatura dos vértices da projeção, dividido pelo raio do máximo círculo inscrito (PETTIJOHN, 1963). Essa medida pode ser expressa pela eq.(2):

$$P = \Sigma (r_i/R)/N \quad (2)$$

onde

P = grau de arredondamento;

r_i = raios individuais dos vértices;

N = número de vértices e

R = raio do máximo círculo inscrito.

Para que seja possível realizar a projeção de partículas do tamanho de areias, estas devem ser separadas por faixa granulométrica e montadas sobre lâminas de vidro, com índice de refração semelhante ao do quartzo, ou seja, em torno de 1,560. WADELL (1932) padronizou o tamanho das projeções em 7 cm para o diâmetro máximo das partículas, a fim de possibilitar comparações entre as medidas. O tamanho padrão pode ser atingido ampliando-se as projeções de areias e reduzindo-se fotografias de matacões e seixos, através da utilização de combinações de lentes.

A medida do grau de arredondamento através da determinação do raio de curvatura dos vértices das partículas é preciso, mas apresenta a desvantagem de ser trabalhoso e demorado. Uma medida mais objetiva pode ser obtida visualmente por comparação dos grãos com tabelas divididas em classes de arredondamento de PETTIJOHN (1963). Para que essa comparação possa ser feita, as amostras devem ser separadas em classes de tamanhos, de acordo com escalas granulométricas padrões. A comparação pode ser realizada macroscopicamente para o caso de seixos, mas para partículas de granulação areia, deve-se utilizar imagens ampliadas por projeção em uma tela.

Para evitar que termos como arredondamento, arredondado, subarredondado, subangular e angular fossem usados descuidadamente, PETTIJOHN (1963) os definiu em termos quantitativos, utilizando classes limites para os graus de arredondamento, estabelecidas de forma que seus pontos médios estivessem aproximadamente em progressão geométrica (TABELA 2.2).

TABELA 2.2 - Classes de graus de arredondamento, segundo PETTIJOHN (1963).

nomenclatura das classes	graus de arredondamento limites das classes	ponto médio geométrico
angular	0 – 0,15	0,125
subangular	0,15 – 0,25	0,200
subarredondado	0,25 – 0,40	0,315
arredondado	0,40 – 0,60	0,500
bem arredondado	0,60 – 1,00	0,800

As características das classes de arredondamento estabelecidas por PETTIJOHN (1963) são:

- a) Angular (0 – 0,15). Os grãos desta classe apresentam pouco ou nenhum sinal de retrabalhamento, possuindo vértices agudos; vértices secundários são encontrados em grande número.
- b) Subangular (0,15 – 0,25). Nessa classe, os grãos já apresentam sinais de retrabalhamento, mantendo entretanto sua forma primitiva, com faces intactas. Pode ser notado o desgaste dos vértices; os vértices secundários ainda são numerosos, porém em menor número do que nas partículas pertencentes a classe angular.
- c) Subarredondado (0,25 – 0,40). O retrabalhamento das partículas incluídas nessa classe é considerável, sendo seus vértices arredondados em curvas suaves; os vértices secundários são em número reduzido.

- d) Arredondado (0,40 – 0,60). Nessa classe, as faces originais da partícula encontram-se destruídas; os vértices apresentam-se em curvas suaves e amplas; vértices secundários são muito suavizados e escassos.
- e) Bem arredondado (0,60 - ,1,00). As partículas bem arredondadas não apresentam vértices, arestas ou faces originais; mantém-se entretanto a forma original do grão.

2.3.1.2 Grau de esfericidade

O grau de esfericidade de uma partícula refere-se ao grau de aproximação da forma dessa partícula com a forma de uma esfera. A esfera foi escolhida como padrão porque esta é a forma que adquirem as partículas em decorrência de abrasão prolongada. Além disso, possui a menor superfície para determinado volume, o que lhe possibilita maior velocidade de decantação em um fluido, em comparação com outras formas geométricas, considerando-se constantes o volume e a densidade.

Segundo WADELL (1932), a esfericidade pode ser expressa pela relação entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula e a área superficial da partícula, expressa pela eq.(3). Para uma esfera, esse valor é 1,0; para qualquer outro sólido, esse valor é menor do que 1,0.

$$\psi = s/S \quad (3)$$

onde

s = área superficial da esfera de mesmo volume da partícula;

S = área superficial da partícula e

ψ = grau de esfericidade.

As dificuldades em se determinar a área superficial e o volume de uma partícula de dimensões pequenas levou WADELL (1932) a adotar uma fórmula de trabalho, que fornece uma aproximação do grau de esfericidade e pode ser expressa pela eq.(4)

$$\phi = dc/Dc \quad (4)$$

onde

dc = diâmetro de um círculo com área igual à área da partícula;

Dc = diâmetro do menor círculo que circunscreve a partícula, ou seja, diâmetro máximo da partícula e

ϕ = grau de esfericidade da partícula.

Para que o grau de esfericidade de areias possa ser determinado de acordo com a eq.(4), deve ser utilizado o método da projeção, através do qual as imagens dos grãos são projetadas sobre uma tela, com ampliações tais que o diâmetro máximo das partículas fique em torno de 7 cm. Os grãos de areia devem ser inicialmente separados por faixa granulométrica e montados sobre lâminas de vidro, com o cuidado de que as lâminas tenham índice de refração próximo ao do quartzo. Os grãos assim preparados são projetados sobre uma tela, tendo seu contorno desenhado. Devem ser considerados no mínimo 50 grãos por faixa granulométrica.

A área de cada grão é determinada utilizando-se um planímetro, a partir dos desenhos dos contornos dos grãos. Considerando-se uma circunferência com a mesma área do grão, seu diâmetro (dc) é denominado diâmetro seccional nominal (KRUMBEIN & PETTIJOHN, 1938). O diâmetro máximo do grão é obtido medindo-se o diâmetro do menor círculo circunscrito (Dc).

2.3.2 TEXTURA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS

Quanto à textura superficial, os grãos de areia podem ser foscos ou polidos, lisos ou rugosos. O polimento da superfície de uma partícula está relacionado com seu grau

de brilho, que depende da regularidade de reflexão da luz. Superfícies foscas correspondem a muita dispersão ou difusão de luz; são superfícies sem brilho. Superfícies polidas são superfícies brilhantes.

O polimento pode ser produzido mecanicamente por atrito suave ou por retrabalhamento. Também pode ser produzido pela deposição de uma película vítrea ou esmalte sobre a superfície da partícula. Segundo PETTIJOHN (1963), esta deposição ocorre em virtude da água existente nas rochas, que migra para a superfície e se evapora pelo calor solar, depositando de forma insolúvel as substâncias que nela se encontravam dissolvidas, como silício, óxido de ferro e manganês. Além disso, existe também a possibilidade de que certos líquens desempenhem papel importante como depositantes de compostos de ferro e manganês. A maioria das partículas, entretanto, apresenta a superfície fosca, sendo que o fosqueamento é atribuído geralmente à ação eólica, ou à ação prolongada de solventes naturais. Esse tipo de textura superficial é bastante comum em areias predominantemente quartzosas e com grãos arredondados.

Independentemente do grau de brilho da superfície de uma partícula, esta pode ser lisa ou rugosa. Será lisa quando não apresentar relevo e rugosa quando apresentar desigualdades, projeções ou micro-crateras.

A principal dificuldade em se caracterizar os grãos de areia através da textura se refere à quantificação dos dados. Tentativas têm sido feitas no sentido de quantificar o polimento das superfícies através da utilização de um fotômetro e alguns autores têm utilizado a microscopia eletrônica para a caracterização da textura das partículas. Entretanto, as definições e classificações das texturas superficiais das partículas são baseadas principalmente em descrições verbais.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Com o objetivo de se verificar a variação das propriedades mecânicas dos solos com a variação das características de sua fração grossa (retida na peneira de abertura nominal 0,075 mm) foram montados solos artificiais através dos quais foi possível provocar a variação da característica desejada do solo, mantendo-se as demais constantes, com a finalidade de simplificar as análises referentes à influência no comportamento dos solos.

No total foram montados vinte solos artificiais. Cinco deles são derivados de um solo siltoso de alteração de granito, do qual foram extraídas tanto a fração fina (passada na peneira de abertura nominal 0,075 mm) como a fração grossa. Tais solos foram montados com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros forma e textura dos grãos da fração grossa no comportamento dos solos.

Para o estudo da influência dos parâmetros distribuição granulométrica e teor de fração grossa no comportamento dos solos, foram montados outros quinze solos artificiais, com fração fina proveniente de um solo laterítico e frações grossas originárias de uma mesma areia lavada de rio, possuindo em comum a natureza quartzosa e diferindo entre si no que se refere à distribuição granulométrica e diâmetros máximo e mínimo utilizados.

3.2 PROGRAMA PARA ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS FORMA E TEXTURA DOS GRÃOS DA FRAÇÃO GROSSA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

Para verificação da influência da forma e da textura dos grãos da fração grossa no comportamento dos solos, foram montados solos artificiais a partir da desmontagem de um solo siltoso de alteração de granito, coletado no município paulista de Santana do Parnaíba, no Km 34 + 100m da rodovia Presidente Castelo Branco (SP-280), em sua margem esquerda, considerando-se o sentido Sorocaba-São Paulo. O referido solo bem como o ponto de coleta foram escolhidos por terem sido exatamente os mesmos utilizados por BARROSO (1996), em sua montagem de solos artificiais.

O solo natural da Rodovia Castelo Branco foi classificado pela sistemática MCT como um solo siltoso não laterítico (NS'), com fração fina ativa ($CA = 40,1$), determinada de acordo com o ensaio de azul de metileno (FABBRI, 1994).

A partir desse solo, BARROSO (1996) extraiu a fração fina *ag* (passada na peneira de abertura nominal 0,075 mm), por peneiramento a seco. Como fração grossa *j* (retida na peneira de abertura nominal 0,075 mm) utilizou uma areia quartzosa coletada na mineração Jundu S.A.), no município de Descalvado (SP). A definição da curva granulométrica da fração grossa foi feita a partir das médias aritméticas de 66 amostras de solos utilizados por FABBRI (1994) em sua tese de doutorado, sendo que tais amostras possuíam apenas partículas menores do que 2 mm. As frações grossa e fina obtidas foram misturadas em cinco teores de concentração (20%, 40%, 60%, 80%, e 100% de fração fina), sendo tais solos denominados solos *j*.

Com a finalidade de estudar a influência da forma e textura dos grãos da fração grossa no comportamento dos solos, foram montados solos artificiais com todas as características dos solos montados por BARROSO (1996), exceto quanto aos graus de arredondamento e esfericidade das partículas da fração grossa, assim como da textura dessas partículas. Foi utilizada fração grossa extraída do próprio solo da rodovia Presidente Castelo Branco (fração grossa *cb*), possuindo grãos mais

angulosos e mais rugosos do que os grãos da fração grossa *j*. Os solos assim montados foram denominados solos *cb*.

3.2.1 OBTENÇÃO DA FRAÇÃO FINA

A fração fina foi extraída do solo originário da rodovia Presidente Castelo Branco, por peneiramento a seco.

Inicialmente, parte da amostra deformada do solo foi espalhada em bandejas metálicas, levadas até uma estufa para secagem do solo a aproximadamente 50° C. Após 24h de secagem, o material foi novamente ensacado, procedendo-se ao seu destorroamento mecânico. O solo passado na galga foi peneirado a seco, mecanicamente, coletando-se a fração fina e desprezando-se a fração grossa.

O material retido na peneira nº 200 foi novamente destorroadado com a utilização da galga mecânica, repetindo-se o processo de peneiramento, com a finalidade de obtenção de melhor aproveitamento da amostra de solo virgem.

3.2.2. OBTENÇÃO DA FRAÇÃO GROSSA

A fração grossa foi extraída do próprio solo da rodovia Castelo Branco, por via úmida, através de lavagem na peneira de abertura nominal 0,075 mm.

A lavagem da amostra de solo foi realizada por partes. Separando-se porções de aproximadamente 20 Kg de solo bruto, inicialmente procedia-se ao seu destorroamento em peneira de abertura 4 mm, colocando-se o material destorroadado em um tonel, onde realizava-se a mistura com água, a fim de facilitar a separação da fração fina. Após 24 h de imersão, iniciava-se a lavagem em água corrente, reservando-se a fração retida na peneira de abertura nominal 0,075 mm e desprezando-se a fração passada por tal peneira.

A fração retida na peneira de abertura nominal 0,075 mm era novamente misturada com água, repetindo-se o processo de lavagem descrito acima. Entretanto, como a fração grossa apresentava areia de mica, a argila encontrava-se embrenhada em seus poros, fazendo-se necessária uma terceira lavagem, dessa vez com auxílio de um dispersante, para aumentar a eficiência da remoção da argila.

O dispersante utilizado foi hidróxido de amônia, escolhido por ser volátil e não deixar resíduos no solo, após sua utilização.

Porções de aproximadamente 10 Kg de fração grossa úmida, previamente submetidas aos dois processos de lavagens, iam sendo colocadas em recipientes, acrescentando-se água até que o material estivesse totalmente submerso. Adicionavam-se 100 ml de hidróxido de amônia em cada recipiente, procedendo-se a uma intensa homogeneização da mistura.

Após 24h, a fração grossa era novamente lavada em água corrente, sendo então espalhada em bandejas metálicas e levada à estufa para secagem a 50° C. Iniciava-se então a lavagem de nova porção da amostra de solo virgem.

Após seca, a fração grossa foi separada nas faixas granulométricas estabelecidas, por peneiramento a seco.

3.2.3. MONTAGEM DOS SOLOS ARTIFICIAIS

Foram montados cinco solos artificiais, com teores de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da fração fina. As distribuições granulométricas de tais solos encontram-se apresentadas na TABELA 3.1, tendo sido escolhidas de modo que coincidissem com as utilizadas por BARROSO (1996).

Os solos artificiais foram montados em função dos ensaios planejados. Para realização do ensaio mini-MCV, foram preparadas seis porções de 1,0 Kg de solo, cada porção correspondendo a um ponto do ensaio. Embora o ensaio tenha sido

planejado com moldagem de cinco corpos de prova, foram preparados seis pontos, por segurança.

Cada porção de solo de 1,0 Kg foi montada em saco plástico individual, pesando-se separadamente cada fração do solo, de acordo com a distribuição granulométrica escolhida. Para preparação dos solos artificiais a serem utilizados nos ensaios mini-CBR foi seguido o mesmo procedimento descrito acima, sendo entretanto utilizadas porções de solo de 1,5 Kg para cada ponto do ensaio.

TABELA 3.1 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais montados a partir da amostra de solo da rodovia Presidente Castelo Branco (identificada pelas iniciais cb)

Peneira (mm)	Porcentagem que passa				
	cb 20% da fração fina	cb 40% da fração fina	cb 60% da fração fina	cb 80% da fração fina	cb 100% da fração fina
2,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,2	98,84	99,13	99,42	99,71	100,00
0,600	94,56	95,92	97,28	98,64	100,00
0,300	77,84	83,38	88,92	94,46	100,00
0,150	48,40	61,30	74,20	87,10	100,00
0,075	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,05	18,92	37,84	56,76	75,68	94,59
0,005	3,51	7,03	10,54	14,05	17,57
0,002	0,54	1,08	1,62	2,16	2,70

3.3 PROGRAMA PARA ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CURVA GRANULOMÉTRICA E TEOR DA FRAÇÃO GROSSA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

Para verificação da influência da distribuição granulométrica e do teor da fração grossa no comportamento dos solos, foram montados solos artificiais utilizando-se um único tipo de fração fina *l*, originada de um solo laterítico, e três tipos de fração

grossa, provenientes de uma mesma areia lavada de rio. A fração fina foi utilizada nos teores 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

No total foram montados quinze solos artificiais. Cinco deles são constituídos por fração grossa *c* apresentando distribuição granulométrica contínua, com partículas de diâmetros variando entre 0,150 e 2,0 mm. Os outros solos apresentam fração grossa de distribuição granulométrica descontínua, sendo que cinco deles possuem partículas finas, com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm (fração grossa *df*) e os outros cinco, partículas grossas, com diâmetros entre 1,7 e 2,0 mm (fração grossa *dg*). As características dos quinze solos artificiais encontram-se resumidas na TABELA 3.2 e as curvas de distribuição granulométrica das frações grossas *c*, *df* e *dg* são apresentadas na FIGURA 3.1.

Como a areia de rio escolhida para extração da fração grossa apresentava pequena porcentagem de partículas com diâmetros entre 0,075 e 0,150 mm, a obtenção dessa fração não seria viável considerando-se o tempo disponível para realização da presente pesquisa. Dessa forma, utilizaram-se partículas com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm para montagem dos solos artificiais com fração grossa apresentando partículas de granulação fina.

TABELA 3.2 – Características das amostras de solos artificiais montados a partir da matriz fina proveniente do solo originário do município de Descalvado.

intervalo de variação dos diâmetros das partículas da fração grossa	1,7 < d < 2,0 mm					0,150 < d < 0,300 mm					0,150 < d < 2,0 mm				
formato da curva granulométrica da fração grossa	<i>descontínua</i> (grossa) <i>dg</i>					<i>descontínua</i> (fina) <i>df</i>					<i>contínua</i> <i>c</i>				
porcentagem da fração fina (%)	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
porcentagem da fração grossa (%)	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0

FIGURA 3.1 – Curvas granulométricas das frações grossas c, df e dg.

3.3.1 OBTENÇÃO DA FRAÇÃO FINA

A fração fina foi extraída de um solo laterítico do interior do estado de São Paulo, coletado no Km 139 +500 m, à margem direita da rodovia SP-215, considerando-se o sentido Descalvado – São Carlos. Este solo, designado neste trabalho como solo natural de Descalvado, foi classificado pelo sistema MCT de classificação de solos como um solo argiloso laterítico (LG'), apresentando, de acordo com o ensaio de azul de metileno, fração fina pouco ativa ($CA = 5,6$), segundo FABBRI (1994).

Para obtenção da fração fina, foi seguido o mesmo procedimento descrito anteriormente, adotado para extração da fração fina do solo da rodovia Presidente Castelo Branco, tomando-se apenas o cuidado adicional de se manter o solo galgado permanentemente na estufa (à 50°C), a fim de que estivesse totalmente seco ao ser peneirado, para aumentar a eficiência do processo. Essa medida foi necessária em virtude do constante entupimento das malhas das peneiras de abertura nominal 0,074 mm, provocado pelo solo natural de Descalvado.

3.3.2 OBTENÇÃO DA FRAÇÃO GROSSA

Os três tipos de fração grossa utilizados são provenientes de uma mesma areia lavada de rio, fornecida pela mineração Didone, localizada às margens do rio Mogi-Guaçu, no município de Rincão, interior de São Paulo. Sua natureza é predominantemente quartzosa.

A areia foi fornecida com separação prévia nas faixas $1,0 < d < 2,0$ mm, $0,42 < d < 1,0$ mm e $d < 0,42$ mm, sendo então separada por peneiramento à seco nas faixas granulométricas estabelecidas.

3.3.3 MONTAGEM DOS SOLOS ARTIFICIAIS

A montagem dos solos artificiais foi realizada tomando-se por base a distribuição granulométrica definida para cada um deles. Encontram-se especificadas nas TABELAS 3.3, 3.4 e 3.5 as distribuições granulométricas para os solos com fração grossa contínua (*c*), descontínua fina (*df*) e descontínua grossa (*dg*), respectivamente.

Os solos artificiais foram montados em porções de 1,0 Kg, separadas em sacos plásticos, seguindo-se o mesmo procedimento descrito no item 3.2.3. Para realização da montagem, foram pesadas as massas correspondentes a cada faixa granulométrica. Os ensaios de mini-MCV e mini-CBR foram ambos realizados com utilização de 1,0 Kg por ponto, sendo dessa forma montadas doze porções de 1,0 Kg para cada solo, seis delas utilizadas para realização do ensaio mini-MCV e as outras seis, para realização do ensaio mini-CBR.

TABELA 3.3 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais possuindo fração fina *l* e fração grossa contínua *c*.

Peneira (mm)	Porcentagem que passa (%)				
	<i>c</i> 20% da fração fina	<i>c</i> 40% da fração fina	<i>c</i> 60% da fração fina	<i>c</i> 80% da fração fina	<i>c</i> 100% da fração fina
2,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,7	95,36	96,52	97,68	98,84	100,00
1,4	90,40	92,80	95,20	97,60	100,00
1,2	84,80	88,60	92,40	96,20	100,00
1,0	80,00	85,00	90,00	95,00	100,00
0,84	75,04	81,28	87,52	93,76	100,00
0,600	64,00	73,00	82,00	91,00	100,00
0,420	51,20	63,40	75,60	87,80	100,00
0,300	41,60	56,20	70,80	85,40	100,00
0,150	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,075	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,05	18,46	36,92	55,38	73,85	92,31
0,005	14,62	29,23	43,85	58,46	73,08
0,002	13,08	26,15	39,23	52,31	65,38

TABELA 3.4 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais possuindo fração fina *l* e fração grossa descontínua fina *df*.

Peneira (mm)	Porcentagem que passa (%)				
	<i>df</i> 20% da fração fina	<i>df</i> 40% da fração fina	<i>df</i> 60% da fração fina	<i>df</i> 80% da fração fina	<i>df</i> 100% da fração fina
2,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,300	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,150	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,075	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,05	18,46	36,92	55,38	73,85	92,31
0,005	14,62	29,23	43,85	58,46	73,08
0,002	13,08	26,15	39,23	52,31	65,38

TABELA 3.5 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais possuindo fração fina l e fração grossa descontínua grossa dg .

	Porcentagem que passa (%)				
Peneira (mm)	dg 20% da fração fina	dg 40% da fração fina	dg 60% da fração fina	dg 80% da fração fina	dg 100% da fração fina
2,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,7	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,075	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,05	18,46	36,92	55,38	73,85	92,31
0,005	14,62	29,23	43,85	58,46	73,08
0,002	13,08	26,15	39,23	52,31	65,38

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

As frações grossas utilizadas foram submetidas aos ensaios de massa específica dos sólidos e análise granulométrica por peneiramento (DNER ME 80-64); as frações finas, aos ensaios de massa específica dos sólidos (DNER ME 93-64) e análise granulométrica por sedimentação (DNER ME 51-64).

Para classificação dos solos pelos sistemas HRB e USCS, os solos artificiais foram submetidos aos ensaios de limite de liquidez (DNER ME 44-71) e limite de plasticidade (DNER ME 82-63).

A determinação da capacidade de suporte dos solos artificiais foi obtida através da execução do ensaio mini-CBR, realizado de acordo com os procedimentos descritos pela norma DER-SP M 192-88. As características de expansão e contração dos solos foram determinadas realizando-se os ensaios de contração e expansão, de acordo com as normas DER-SP M 193 – 88 e DER-SP M 192 – 88, respectivamente.

Foram realizados ensaios de mini-MCV, executados de acordo com os procedimentos descritos no método de ensaio DER-SP M 191 – 88 e ensaios de perda de massa por imersão, executados de acordo com o método de ensaio DER-SP

M 196 – 88. Tais ensaios foram realizados com o objetivo de classificação dos solos pela sistemática MCT.

Para determinação dos coeficientes de atividade das frações finas dos solos artificiais, estes foram submetidos ao ensaio de adsorção de azul de metileno, de acordo com o procedimento descrito por FABBRI (1994), utilizando-se pH normal da suspensão de solo e água.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Os solos artificiais montados em laboratório foram submetidos aos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos sólidos, granulometria por peneiramento, granulometria por sedimentação, mini-MCV, perda de massa por imersão, mini-CBR com e sem imersão, expansão e contração na energia intermediária e adsorção de azul de metileno.

Dos ensaios realizados, os referentes a índices plásticos e granulometria tiveram por finalidade a classificação dos solos através dos sistemas HRB e USCS, ditos tradicionais. Essas classificações estrangeiras, embora inadequadas aos solos tropicais, foram utilizadas por constituírem uma referência aos profissionais ligados a solos. Os ensaios mini-MCV e perda de massa por imersão foram realizados para classificação dos solos pelo sistema MCT, com o objetivo de obter-se uma previsão de suas propriedades tecnológicas.

Através da execução dos ensaios mini-CBR, expansão e contração na energia intermediária, foram determinadas as propriedades mecânicas umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, mini-CBR imediato, mini-CBR após 24 h de imersão, expansão e contração. Uma vez obtidas tais propriedades, foi analisada a variação de cada uma delas em função do teor e das características da fração grossa.

Foi também apresentada a variação dessas propriedades em função do valor de azul dos solos (Va), uma vez que o objetivo desse estudo foi contribuir para a elaboração de uma futura classificação de solos, baseada em ensaios de granulometria e em ensaios de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

4.2 DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS SOLOS ARTIFICIAIS

A determinação das distribuições granulométricas dos solos artificiais foi realizada ensaiando-se separadamente as frações fina e grossa de cada solo. As frações finas *l* e *ag*, extraídas respectivamente dos solos provenientes do município de Descalvado e da Rodovia Presidente Castelo Branco, foram submetidas à análise granulométrica por sedimentação e as frações grossas *cb*, *c*, *df* e *dg* foram submetidas à análise granulométrica por peneiramento.

Nas FIGURAS 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentadas, respectivamente, as distribuições granulométricas dos solos *cb*, *c*, *df*, *dg*, sendo que em cada figura encontram-se cinco curvas, correspondentes aos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa presente nos solos. Cabe ressaltar que as distribuições granulométricas dos solos *j*, montados por BARROSO (1996) e utilizados para análise da influência da forma e textura das partículas no comportamento dos solos, coincidem com as distribuições granulométricas dos solos *cb*, montados nesse experimento.

FIGURA 4.1 – Curvas granulométricas dos solos artificiais *cb*, possuindo fração fina *ag* e fração grossa *cb*, nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.

FIGURA 4.2 – Curvas granulométricas dos solos artificiais *c*, possuindo fração fina *l* e fração grossa *c*, nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.

FIGURA 4.3 – Curvas granulométricas dos solos artificiais *df*, possuindo fração fina *l* e fração grossa *df*, nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.

FIGURA 4.4 – Curvas granulométricas dos solos artificiais *dg*, possuindo fração fina *l* e fração grossa *dg*, nos teores de 0, 20, 40, 60 e 80% de fração grossa.

4.3 CLASSIFICAÇÕES HRB E USCS DOS SOLOS ARTIFICIAIS

As classificações de solos HRB e USCS são amplamente difundidas e conhecidas pelos profissionais ligados a solos, constituindo-se num elemento de comunicação, motivo pelo qual considerou-se conveniente aplicá-las aos solos artificiais montados nesse experimento, embora tais classificações sejam, muitas vezes, inadequadas a solos tropicais.

Para que os solos pudessem ser classificados pelos sistemas HRB e USCS, foi necessário determinar seus índices plásticos, através dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade. Os valores obtidos de LL, LP e IP para cada solo artificial encontram-se apresentados na TABELA 4.1.

Os solos *cb* e *j*, com exceção de *cb* com 0 % de fração grossa, mostraram-se não plásticos, o que era esperado uma vez que a fração fina *ag*, componente de tais solos, foi extraída do solo proveniente da Rodovia Presidente Castelo Branco, possuindo quantidade razoável de silte em sua composição. O comportamento não plástico também foi observado para o *df* com 80% de fração grossa, em virtude da pequena quantidade de fração fina existente, ocasionando baixa coesão.

A variação dos limites de liquidez e plasticidade em função da porcentagem de fração grossa, para cada conjunto de solos artificiais, encontra-se apresentada na FIGURA 4.5, onde pode-se notar que os valores de LL e LP em geral decresceram com o aumento do teor de fração grossa, conforme observado para solos naturais.

A exceção ocorreu com os solos *dg*, cujos valores de LL e LP variaram em torno de 57 % e 43 %, respectivamente, independentemente da porcentagem de fração grossa presente. Isso ocorreu em virtude das partículas da fração grossa *dg* possuírem diâmetros entre 1,7 e 2,0 mm. Como os ensaios de LL e LP são realizados com a fração do solo passada pela peneira 0,42 mm, a fração *dg* foi eliminada dos ensaios, que foram realizados apenas com a fração fina. A pequena diferença entre os valores

de LL e LP obtidos entre os solos com diferentes teores de fração grossa decorre de variações de ensaios.

TABELA 4.1 – Valores de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) dos solos artificiais.

solo (% de fração grossa)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
j 0 %	64,40	NP	-
j 20 %	54,00	NP	-
j 40 %	41,30	NP	-
j 60 %	29,90	NP	-
j 80 %	19,70	NP	-
cb 0 %	65,20	43,19	22,01
cb 20 %	56,72	NP	-
cb 40 %	40,57	NP	-
cb 60 %	29,12	NP	-
cb 80 %	18,60	NP	-
c 0 %	58,00	44,73	13,27
c 20 %	52,92	38,49	14,43
c 40 %	43,00	30,11	12,89
c 60 %	37,00	24,56	12,44
c 80 %	27,00	17,98	9,02
df 0 %	58,00	44,73	13,27
df 20 %	46,30	32,12	14,18
df 40 %	38,10	25,99	12,11
df 60 %	26,65	18,36	8,29
df 80 %	19,30	NP	-
dg 0 %	58,00	44,73	13,27
dg 20 %	55,40	41,56	13,84
dg 40 %	57,10	42,97	14,13
dg 60 %	56,70	42,68	14,02
dg 80 %	58,00	43,73	14,27

FIGURA 4.5 – Variação dos valores de LL em função do teor de fração grossa, para os conjuntos de solos artificiais *cb, j, c, df* e *dg*.

Os resultados das classificações HRB e USCS dos solos artificiais encontram-se apresentados na TABELA 4.2.

A classificação HRB apresenta uma previsão do comportamento dos solos quando empregados como subleito. Entretanto, fornece as mesmas informações qualitativas a solos pertencentes a classes diferentes e com diferentes desempenhos quando empregados em subleitos de pavimentos. A classificação USCS, por sua vez, não é interpretativa. Procurando solucionar essa dificuldade, BARROSO (1996) elaborou uma escala de adjetivos, em ordem decrescente de eficácia, referente ao emprego dos solos em pavimentação. Essa escala encontra-se apresentada nas TABELAS 4.3 e 4.4, nas quais pode-se observar as sete qualificações idealizadas: excelente, excelente a bom, bom, bom a regular, regular, regular a mau e muito mau.

TABELA 4.2 – Resultados das classificações HRB e USCS dos solos artificiais.

solo	% de fração grossa	classe HRB	classe USCS
j	0 %	A-5	MH
j	20 %	A-5	MH
j	40 %	A-5	ML
j	60 %	A-4	SM
j	80 %	A-2-4	SM
cb	0 %	A-5	MH
cb	20 %	A-5	MH
cb	40 %	A-5	ML
cb	60 %	A-4	SM
cb	80 %	A-2-4	SM
c	0 %	A-7-5	MH
c	20 %	A-7-5	MH
c	40 %	A-7-5	CL
c	60 %	A-6	SC
c	80 %	A-2-4	SC
df	0 %	A-7-5	MH
df	20 %	A-7-5	CL
df	40 %	A-6	CL
df	60 %	A-4	SC
df	80 %	A-2-4	SM
dg	0 %	A-7-5	MH
dg	20 %	A-7-5	MH
dg	40 %	A-7-5	MH
dg	60 %	A-7-5	SM
dg	80 %	A-2-7	SM

BARROSO (1996) relacionou cada uma das sete qualificações a classes HRB, USCS (TABELA 4.3) e MCT (TABELA 4.4). A classificação HRB apresenta duas qualificações para os solos empregados como subleito; segundo essa classificação, os solos pertencentes às classes A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7 possuem desempenho de excelente a bom, enquanto que os solos pertencentes às classes A-4, A-5, A-6, A-7-5, e A-7-6 possuem desempenho de fraco a pobre. Com a finalidade de distribuir essas classes entre as sete qualificações idealizadas, foram utilizadas informações referentes à granulometria e índices plásticos.

Quanto à classificação USCS, BARROSO (1996) baseou-se em informações contidas em VARGAS (1977), referentes à trabalhabilidade dos solos como material de fundação, para atribuir ordem decrescente de qualidade às classes dos solos. A ordem de preferência para diferentes usos em pavimentação atribuída pela classificação MCT serviu de base para a correspondência entre as qualificações idealizadas por BARROSO (1996) e as classes do método MCT.

TABELA 4.3 – Proposta de hierarquização qualitativa das classes de solos como subleito compactado nos sistemas de classificação USCS e HRB, segundo BARROSO (1996).

qualidade como subleito compactado	USCS	HRB
excelente	GW, GC, SC, SW e GP	A-1
excelente a bom	GM	A-3
bom	SP	A-2
bom a regular	SM	A-4
regular	-	A-5
regular a mau	ML e CL	A-6
muito mau	OL, CH, MH, OH e PT	A-7

TABELA 4.4 – Proposta de hierarquização qualitativa das classes de solos como subleito compactado no sistema de classificação MCT, segundo BARROSO (1996).

qualidade como subleito compactado	MCT
excelente	LA'
excelente a bom	LA
bom	LG'
bom a regular	NA
regular	NA'
regular a mau	NG'
muito mau	NS'

Com base na escala qualitativa apresentada nas TABELAS 4.3 e 4.4, foram atribuídos aos solos artificiais comportamentos quando empregados em pavimentação, de acordo com as classificações HRB e USCS. Os resultados encontram-se apresentados na TABELA 4.5.

TABELA 4.5 – Comportamento dos solos artificiais quando empregados em pavimentação, de acordo com as classificações HRB e USCS e com a escala qualitativa proposta por BARROSO (1996).

Solo	% de fração grossa	comportamento	comportamento
		correspondente à classe HRB	correspondente à classe USCS
j	0 %	regular (A-5)	muito mau (MH)
j	20 %	regular (A-5)	muito mau (MH)
j	40 %	regular (A-5)	regular a mau (ML)
j	60 %	bom a regular (A-4)	bom a regular (SM)
j	80 %	bom (A-2-4)	bom a regular (SM)
cb	0 %	regular (A-5)	muito mau (MH)
cb	20 %	regular (A-5)	muito mau (MH)
cb	40 %	regular (A-5)	regular a mau (ML)
cb	60 %	bom a regular (A-4)	bom a regular (SM)
cb	80 %	bom (A-2-4)	bom a regular (SM)
c	0 %	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
c	20 %	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
c	40 %	muito mau (A-7-5)	regular a mau (CL)
c	60 %	regular a mau (A-6)	excelente (SC)
c	80 %	bom (A-2-4)	excelente (SC)
df	0 %	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
df	20 %	muito mau (A-7-5)	regular a mau (CL)
df	40 %	regular a mau (A-6)	regular a mau (CL)
df	60 %	bom a regular (A-4)	excelente (SC)
df	80 %	bom (A-2-4)	bom a regular (SM)
dg	0 %	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
dg	20 %	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
dg	40 %	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
dg	60 %	muito mau (A-7-5)	bom a regular (SM)
dg	80 %	bom (A-2-7)	bom a regular (SM)

4.4 CLASSIFICAÇÃO MCT DOS SOLOS ARTIFICIAIS

Os resultados da classificação dos solos pelo sistema MCT encontram-se apresentados na TABELA 4.6, juntamente com os coeficientes c' e e' , determinados através dos ensaios mini-MCV e perda de massa por imersão. Nessa tabela encontram-se também apresentados os comportamentos dos solos quando empregados em pavimentos, segundo a escala qualificativa proposta por BARROSO (1996) e apresentada na TABELA 4.4.

TABELA 4.6 – Classificação MCT dos solos artificiais e correspondentes comportamentos, segundo escala qualitativa proposta por BARROSO (1996).

solo	% de fração grossa	c'	e'	classe MCT	comportamento do solo
j	0 %	1,50	2,00	NS'	muito mau
j	20 %	1,50	1,89	NS'	muito mau
j	40 %	1,40	1,74	NS'	muito mau
j	60 %	1,32	1,51	NS'	muito mau
j	80 %	0,50	1,59	NA	bom a regular
cb	0 %	1,50	2,00	NS'	muito mau
cb	20 %	1,28	1,66	NS'	muito mau
cb	40 %	1,12	1,75	NS'	muito mau
cb	60 %	1,04	1,50	NS'	muito mau
cb	80 %	0,90	1,60	NS'	muito mau
c	0 %	2,10	1,14	LG'	bom
c	20 %	2,53	1,16	LG'	bom
c	40 %	1,88	0,80	LG'	bom
c	60 %	1,62	0,88	LG'	bom
c	80 %	0,68	1,08	LA	excelente a bom
df	0 %	2,10	1,14	LG'	bom
df	20 %	2,60	1,26	LG'	regular a mau
df	40 %	2,01	1,11	LG'	bom
df	60 %	1,19	0,63	LG'	bom
df	80 %	0,37	1,24	LA	excelente a bom
dg	0 %	2,10	1,14	LG'	bom
dg	20 %	2,35	1,15	LG'	bom
dg	40 %	1,74	1,18	LG'	regular a mau
dg	60 %	1,17	0,81	LA'	excelente
dg	80 %	0,60	1,15	LA	excelente a bom

A localização dos solos no ábaco de classificação MCT encontra-se apresentada na FIGURA 4.6, onde foi também indicada, para cada conjunto de solos artificiais, a trajetória dos solos no ábaco, em função do aumento do teor de fração grossa.

FIGURA 4.6 – Localização dos solos artificiais no ábaco de classificação MCT. O sentido das setas indica o aumento do teor de fração grossa, de 0 % a 80 %, para os conjuntos cb , j , c , df e dg de solos artificiais.

4.5 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Para melhor caracterização dos solos artificiais, foi realizada a determinação da massa específica dos sólidos. Com essa finalidade, tal grandeza foi determinada separadamente para as frações fina e grossa, obtendo-se o resultado final para cada solo através do cálculo da média ponderada entre as duas frações, considerando-se a proporção de cada uma delas presente nos solos. Os resultados obtidos foram utilizados posteriormente para análise das condições de preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa.

Na TABELA 4.7 encontram-se apresentados os valores de massa específica dos sólidos das frações finas *l* e *ag*, assim como das frações grossas *c*, *df*, *dg*, *cb* e *j*.

TABELA 4.7 – Valores de massa específica dos sólidos, para as frações finas *l* e *ag*, e para as frações grossas *c*, *df*, *dg*, *cb* e *j*.

Frações	massa específica dos sólidos ρ_s (g/cm ³)
fração fina <i>l</i>	2,708
fração fina <i>ag</i>	2,691
fração grossa <i>j</i>	2,650
fração grossa <i>cb</i>	2,650
fração grossa <i>c</i>	2,642
fração grossa <i>df</i>	2,639
fração grossa <i>dg</i>	2,646

Os valores calculados de massa específica dos sólidos para cada solo artificial encontram-se apresentados na TABELA 4.8. A variação da massa específica dos sólidos em função do aumento da porcentagem de fração grossa encontra-se apresentada na FIGURA 4.7.

TABELA 4.8 – Massa específica dos sólidos (ρ_s) calculada para os solos artificiais.

	massa específica dos sólidos (g/cm ³)				
% de fração grossa	solos <i>j</i>	solos <i>cb</i>	solos <i>c</i>	solos <i>df</i>	solos <i>dg</i>
0 %	2,691	2,691	2,708	2,708	2,708
20 %	2,683	2,683	2,695	2,694	2,696
40 %	2,675	2,675	2,682	2,680	2,683
60 %	2,666	2,666	2,668	2,667	2,671
80 %	2,658	2,658	2,655	2,653	2,658

FIRURA 4.7 – Variação da massa específica dos sólidos em função do teor da fração grossa presente.

4.6 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS FORMA E TEXTURA DOS GRÃOS DA FRAÇÃO GROSSA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

Para análise da influência dos parâmetros forma e textura dos grãos da fração grossa no comportamento dos solos foram comparados os solos *cb*, montados nesse trabalho, e os solos *j*, montados por BARROSO (1996). Os solos *cb* foram montados com fração fina *ag*, proveniente de um solo siltoso de alteração de granito (solo da rodovia Presidente Castelo Branco), e fração grossa *cb*, extraída do mesmo solo. Os solos *j* foram montados com a mesma fração fina *ag* e fração grossa *j*, coletada da Mineração Jundu S.A., do município de Descalvado (SP). As frações grossas *cb* e *j* são ambas predominantemente quartzosas.

Para caracterização da forma e textura dos grãos das frações grossas *cb* e *j*, foram realizadas observações visuais, separando-se previamente as partículas por faixa granulométrica. As faixas granulométricas consideradas foram 1,2 – 2,0 mm; 0,600 – 1,2 mm; 0,300 – 0,600 mm; 0,150 – 0,300 mm e 0,075 – 0,150 mm, sendo que fotografias de partículas pertencentes a cada uma dessas faixas podem ser observadas no ANEXO I, para as frações grossas *cb* e *j*. A título de demonstração, são apresentadas nas FIGURAS 4.8 e 4.9 as partículas das faixas 0,300 – 0,600 mm e 0,150 – 0,300 mm, respectivamente, para as frações grossas *cb* e *j*.

FIGURA 4.8 – Partículas com diâmetros entre 0,300 e 0,600 mm, para as frações grossas *cb* e *j* (aumento de 23 vezes).

Pode-se observar nas FIGURAS 4.8 e 4.9 que as partículas da fração grossa *cb* possuem textura mais rugosa do que as partículas da fração grossa *j*, que são mais lisas. No que se refere ao grau de arredondamento e ao grau de esfericidade, as partículas da fração grossa *j* são mais arredondadas e mais esféricas do que as partículas da fração grossa *cb*.

O grau de arredondamento foi obtido por comparação visual das imagens projetadas dos grãos com classes de arredondamento de PETTIJOHN (1957). O grau de esfericidade também foi obtido da mesma forma, por comparação com tabelas de classes de esfericidade, definidas por RITTENHOUSE (1943), com base em WADELL (1932). As comparações visuais foram realizadas dividindo-se os grãos entre as faixas granulométricas anteriormente citadas.

fração grossa *cb*

fração grossa *j*

FIGURA 4.9 – Partículas com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm, para as frações grossas *cb* e *j* (aumento de 23 vezes).

4.6.1 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA MÁXIMA

Na FIGURA 4.10 é apresentada a variação da massa específica aparente seca máxima para os solos *cb* e *j*, em função do teor de finos. Os solos *j*, com fração grossa apresentando partículas mais arredondadas, esféricas e lisas do que as partículas dos solos *cb*, apresentaram massa específica aparente seca máxima maior,

exceto para os solos com teores de finos muito elevados, onde praticamente não há contato entre os grãos da fração grossa.

Os maiores valores de massa específica aparente seca máxima apresentados pelos solos *j* provavelmente foram decorrentes de arranjos mais compactos, ocasionados pela forma mais arredondada das partículas da fração grossa *j*.

A faixa de variação dos valores de massa específica aparente seca máxima foi de 1,440 a 1,995 g/cm³ para os solos *j* e de 1,440 a 1,838 g/cm³ para os solos *cb*.

FIGURA 4.10 – Variação da massa específica aparente seca máxima em função do teor de finos, para os solos *cb* e *j*.

4.6.2 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE UMIDADE ÓTIMA

A influência da textura superficial e da forma dos grãos da fração grossa no comportamento da propriedade umidade ótima é apresentada na FIGURA 4.11, na qual pode-se notar que esta é inexpressiva, uma vez que os valores de umidade ótima apresentados pelos solos *cb* e *j* são praticamente iguais, considerando-se constante o teor de fração grossa presente.

Os valores de umidade ótima variaram de 9,3 % a 26,2 %, para os solos *j* e de 6,8 % a 26,2 %, para os solos *cb*.

FIGURA 4.11 – Variação da umidade ótima em função do teor de finos, para os solos *cb* e *j*.

4.6.3 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MINI-CBR IMEDIATO

Os resultados da variação de mini-CBR imediato em função do teor de finos, para os solos *cb* e *j* são apresentados na FIGURA 4.12. Os maiores valores foram obtidos para os solos *cb*, com fração grossa angular, indicando que a resistência se beneficia com o maior atrito proporcionado pelas partículas mais angulares e rugosas presentes nesses solos.

Os valores de mini-CBR imediato variaram de 14,3 % a 29,0% para os solos *j* e de 14,3 % a 42,0 % para os solos *cb*.

FIGURA 4.12 – Variação da propriedade mini-CBR imediato em função do teor de finos, para os solos *cb* e *j*.

4.6.4 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MINI-CBR APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO

Na FIGURA 4.13 encontra-se apresentada a variação dos valores de mini-CBR após 24 horas de imersão para os solos *cb* e *j*, em função da porcentagem de finos presente. Pode-se observar que os maiores valores de mini-CBR após 24 horas de imersão foram sempre obtidos para os solos *cb*, cuja fração grossa apresenta partículas mais angulares e mais rugosas do que as partículas presentes na fração grossa *j*.

A faixa de variação dos valores de mini-CBR após 24 horas de imersão foi de 5,8 % a 17,0 % para os solos *j* e de 5,8 % a 21,0 % para os solos *cb*.

FIGURA 4.13 – Variação da propriedade mini-CBR após 24 horas de imersão em função do teor de finos, para os solos *cb* e *j*.

4.6.5 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE EXPANSÃO

A variação da expansão em função da porcentagem de finos, para os solos *cb* e *j*, encontra-se apresentada na FIGURA 4.14. Considerando-se constante a porcentagem de finos presente nos solos, pode-se observar que os valores de expansão apresentados pelos solos *cb* foram sempre superiores aos apresentados pelos solos *j*, o que indica maior expansividade dos solos montados com fração grossa natural do solo siltoso de alteração de granito, denominado solo da Rodovia Presidente Castelo Branco.

Os valores de expansão apresentaram uma variação de 0,18 % a 3,50 % para os solos *j* e de 0,59 % a 3,50 % para os solos *cb*.

FIGURA 4.14 – Variação da propriedade expansão em função do teor de finos, para os solos *cb* e *j*.

4.6.6 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE CONTRAÇÃO

Na FIGURA 4.15 encontra-se apresentada a variação da contração em função da porcentagem de finos, para os solos *cb* e *j*. Comparando-se os resultados apresentados por esses solos, para as mesmas porcentagens de finos, pode-se observar que, exceto para 80 % de finos presentes nos solos, os valores de contração apresentados pelos solos *cb* e *j* foram consideravelmente próximos. Como a influência da fração grossa não é significativa para solos com 80 % de finos, uma vez que para esse teor não existe contato entre os grãos dessa fração, conclui-se que a influência das características de forma e textura dos grãos da fração grossa não pôde ser detectada no comportamento da propriedade contração, ou tal influência não é significativa.

FIGURA 4.15 – Variação da propriedade contração em função do teor de finos, para os solos *cb* e *j*.

Também pode ser observado, na FIGURA 4.15, que a variação dos valores de contração esteve entre 0,18 % a 0,65 % para os solos *j* e entre 0,14 % e 0,65 % para os solos *cb*.

4.7 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PREENCHIMENTO DOS VAZIOS EXISTENTES ENTRE OS GRÃOS DA FRAÇÃO GROSSA

As condições de arranjo existentes entre as partículas de um solo possuem influência significativa em seu comportamento e nas propriedades por ele apresentadas. Dessa forma, para que pudessem ser melhor analisados os resultados obtidos em laboratório, referentes ao programa de estudo da influência dos parâmetros distribuição granulométrica e teor de fração grossa no comportamento dos solos, foram verificadas as condições de arranjo existentes entre as partículas dos solos *c*, *df* e *dg*. Foram também analisadas as condições de arranjo existentes entre as partículas dos solos *cb*, incluídos na análise da influência do teor de fração grossa no comportamento dos solos.

Foram determinadas as condições de preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa pelos finos, verificando se os finos eram insuficientes para o preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa, se os finos estavam afastando os grãos dessa fração, ou se o solo estava próximo da condição ideal, com os finos preenchendo completamente os vazios entre os grãos da fração grossa, sem afastá-los.

As condições de preenchimento foram determinadas experimentalmente, em laboratório, sendo que o procedimento seguido encontra-se apresentado no ANEXO IV. A porcentagem ideal aproximada de finos para cada solo, correspondente ao total preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa pelos finos e pela água, e também somente pelos finos, encontram-se apresentadas na TABELA 4.9.

TABELA 4.9 – Porcentagem ideal aproximada de fração fina, na umidade ótima, correspondente ao preenchimento total dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa.

Solo	% ideal de fração fina (considerando-se apenas os finos)	% ideal de fração fina (considerando-se finos + água)
c	18,9	17,2
df	22,7	21,7
dg	24,5	25,0
cb	25,9	30,2

4.8 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO TEOR DA FRAÇÃO GROSSA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

A influência do teor da fração grossa, ou seja, da porcentagem de fração grossa presente nos solos, na variação de suas propriedades pode ser observada nas FIGURAS de 4.16 a 4.21, nas quais encontram-se apresentadas, respectivamente, as variações das propriedades massa específica aparente seca máxima, umidade ótima, mini-CBR-imediato, mini-CBR após 24 h de imersão, expansão e contração em função do teor de fração grossa presente. Em cada uma dessas figuras são apresentados as propriedades citadas acima para os solos *c*, *df*, *dg*, e *cb*, montados com 0 %, 20 %, 40 %, 60 % e 80 % de fração grossa.

4.8.1 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA MÁXIMA

Na FIGURA 4.16 são apresentados os resultados da variação da massa específica aparente seca máxima dos solos artificiais em função do teor de fração grossa. Nessa figura são apresentadas quatro curvas, sendo cada uma delas correspondente a conjuntos de solos montados com as mesmas frações fina e grossa, em diferentes proporções ou teores.

FIGURA 4.16 – Variação da massa específica aparente seca máxima dos solos artificiais em função do teor de fração grossa.

Comparando-se conjuntos de solos artificiais montados com as mesmas frações fina e grossa utilizadas em diferentes proporções, observou-se que a massa específica aparente seca máxima aumentou com o aumento do teor da fração grossa presente no solo, conforme indicado pela literatura sobre o assunto. Esse aumento não foi observado para elevados teores de fração grossa, considerando-se os solos *df dg* e *cb*,

que tiveram a massa específica aparente seca máxima diminuída com o aumento da porcentagem de fração grossa, considerando-se elevados teores desta.

A inflexão apresentada nas curvas dos solos *df*, *dg* e *cb* pode ser explicada através do estudo do preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa, apresentado na seção 4.7 deste capítulo. Nesse estudo determinou-se experimentalmente a porcentagem de finos correspondente a situação ideal, onde os finos preenchem totalmente os vazios existentes entre os grãos da fração grossa, sem afastá-los. Para os solos *df* e *dg*, essa situação ocorre para 22,7 e 24,5 % de finos (TABELA 4.8), respectivamente, ou seja, 77,3 e 75,5 % de fração grossa. Para os solos *cb*, a porcentagem ideal de finos encontrada foi de 25,9 %, ou seja, 74,1% de fração grossa.

Dessa forma, aumentando-se a porcentagem de fração grossa acima do valor ideal, os finos serão insuficientes para o preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa, ocasionando a diminuição da massa específica aparente seca máxima.

Os solos com distribuição granulométrica contínua, *c*, não apresentaram diminuição da massa específica aparente seca máxima para valores elevados de fração grossa, visto que para tais solos a situação ideal de total preenchimento dos vazios da fração grossa pelos finos ocorre para 18,9 % de fração fina (TABELA 4.8) e 81,1 % de fração grossa. Como só foram realizados ensaios para solos montados com no máximo 80 % de fração grossa, não foi atingido o ponto a partir do qual os finos seriam insuficientes para o preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa.

4.8.2 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE UMIDADE ÓTIMA

Comparando-se conjuntos de solos com as mesmas frações fina e grossa em diferentes proporções, pode-se observar na FIGURA 4.17 que a umidade ótima diminuiu com o aumento do teor da fração grossa. De acordo com a literatura, esse comportamento estava previsto, uma vez que a superfície específica do material

diminui com a diminuição do teor de finos presentes, ocasionando menor absorção de água pelas partículas.

FIGURA 4.17 – Variação da umidade ótima em função do teor de finos.

4.8.3 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MINI-CBR IMEDIATO

Na FIGURA 4.18 é apresentado o comportamento da propriedade mini-CBR imediato em função da porcentagem de fração grossa. Pode-se observar que os valores dessa propriedade aumentaram com o aumento do teor da fração grossa, sendo que as exceções ocorreram para solos possuindo teores de fração grossa muito elevados.

FIGURA 4.18 – Variação do mini-CBR imediato em função do teor de finos.

O aumento dos valores de mini-CBR imediato com o aumento da porcentagem de fração grossa era esperado, uma vez que a resistência de um solo é proporcionada fundamentalmente por sua fração grossa. Para solos com baixas porcentagens de fração grossa, os finos encontram-se em excesso, afastando os grãos dessa fração e impedindo o contato entre os mesmos. À medida que a porcentagem de finos diminui, procede-se a aproximação dos grãos da fração grossa, com conseqüente aumento do entrosamento entre eles, propiciando o aumento da resistência dos solos. Entretanto, para teores muito elevados de fração grossa, os finos passam a ser insuficientes para o desempenho de sua função ligante, ocorrendo então a diminuição da resistência do solo.

4.8.4 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MINI-CBR APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO

Os valores de mini CBR após 24 horas de imersão encontram-se na FIGURA 4.19, onde pode ser acompanhada sua variação em função do teor de fração grossa. Em geral, o mini-CBR após 24 horas de imersão mostrou-se progressivamente maior com o aumento da porcentagem de fração grossa, exceto para solos com excessiva porcentagem de uma das frações, fina ou grossa.

Para solos com excessiva porcentagem de finos, os grãos da fração grossa não apresentam contato entre si, sendo a fração fina a principal responsável pela resistência do solo. Dessa forma, um aumento na porcentagem de fração grossa pode não corresponder a um aumento da resistência do solo, caso o acréscimo de fração grossa não seja suficiente para que passe a haver contato entre seus grãos.

FIGURA 4.19 – Variação do mini-CBR após 24 horas de imersão em função da porcentagem de fração grossa.

Da mesma forma, para porcentagens de fração grossa elevadas, um aumento dessa fração pode não corresponder a um aumento da resistência do solo. Isso foi observado comparando-se os solos com 60% e 80% de fração grossa, sendo que os últimos apresentaram valores de mini-CBR após 24 horas de imersão inferiores aos solos com 60% de fração grossa, considerando constante os tipos de frações utilizadas e variando-se apenas sua porcentagem. Esse comportamento era esperado uma vez que, a partir da proporção ideal entre finos e grossos, um aumento da fração grossa provoca a insuficiência de finos para o preenchimento dos vazios existentes entre seus grãos, dificultando a transmissão de esforços de um grão para outro, ou seja, prejudicando a interação entre os mesmos.

4.8.5 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE EXPANSÃO

A expansão diminuiu com o aumento do teor de fração grossa, conforme pode ser observado na FIGURA 4.20, onde são apresentados os resultados da variação da expansão em função da porcentagem de fração grossa. Essa diminuição ocorreu porque a expansividade é uma característica própria da fração fina, sendo esperado que a medida que diminua a porcentagem de finos presente em um solo, diminua também sua expansão. Pode-se observar também que a natureza da fração fina possui influência preponderante na expansão, visto que os solos *cb*, com fração fina extraída de um solo siltoso de alteração de granito, não laterítico, apresentaram valores de expansão bem superiores aos valores apresentados pelos solos montados com fração fina *l*, extraída de solo laterítico.

FIGURA 4.20 – Variação da expansão em função da porcentagem de fração grossa.

4.8.6 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE CONTRAÇÃO

Na FIGURA 4.21 encontram-se apresentados os resultados de variação da contração em função da porcentagem de fração grossa, para os conjuntos de solos designados por *c*, *df*, *dg* e *cb*. Nessa figura pode-se observar que a contração diminuiu com o aumento da porcentagem de fração grossa, conforme o esperado, pois essa propriedade depende mais significativamente das características e da porcentagem da fração fina. Dessa forma, comparando-se solos com os mesmos tipos de frações fina e grossa, utilizadas em diferentes teores, parece uma consequência natural que a contração diminua a medida que diminui o teor de finos. A natureza da fração fina, ao contrário do ocorrido para a propriedade expansão, não mostrou influência significativa no comportamento da propriedade contração.

FIGURA 4.21 – Variação da contração em função da porcentagem de fração grossa.

4.9 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

Para análise da influência do parâmetro distribuição granulométrica nas propriedades apresentadas pelos solos, foram comparados os comportamentos dos solos *c*, *df* e *dg*, que possuem a mesma fração fina *l*, extraída do solo laterítico proveniente de Descalvado, e diferentes frações grossas, extraídas de uma mesma areia lavada de rio mas que se distinguem pela distribuição granulométrica. Os solos *c* possuem fração grossa de distribuição granulométrica contínua, com partículas variando entre 0,150 e 2,0 mm de diâmetro. Os solos *df* e *dg* possuem ambas frações grossas com distribuições granulométricas descontínuas, sendo que os solos *df* possuem fração grossa com partículas finas, variando entre 0,150 e 0,300 mm de diâmetro, e os solos *dg* possuem fração grossa com partículas grossas, entre 1,7 e 2,0 mm de diâmetro. As análises foram realizadas mantendo-se constante o teor de fração grossa presente.

O estudo comparativo entre os solos *df*, com fração grossa apresentando partículas de diâmetro médio em torno de 0,223 mm, e *dg*, com fração grossa apresentando partículas de diâmetro médio em torno de 1,84 mm, permitiu a obtenção de informações referentes a influência do tamanho médio das partículas no comportamento dos solos.

4.9.1 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA MÁXIMA

Na FIGURA 4.22 encontra-se apresentada a variação da propriedade massa específica aparente seca máxima em função do teor de finos, para os solos com fração fina *l* proveniente de Descalvado e frações grossas com distribuições granulométricas *contínua*, *descontínua fina* e *descontínua grossa*. Nessa figura encontra-se também indicada, para cada porcentagem de fração fina, a respectiva porcentagem de fração grossa presente no solo.

Os solos com fração grossa de distribuição granulométrica contínua apresentaram valores de massa específica aparente seca máxima mais elevados do que os solos com fração grossa de distribuição granulométrica descontínua, considerando-se iguais teores de concentração da fração grossa. Comparando-se apenas os solos apresentando fração grossa com distribuição granulométrica descontínua, os maiores valores foram obtidos para solos com fração grossa descontínua grossa. Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, que indica maiores valores de massa específica para solos com distribuição granulométrica contínua e fração grossa possuindo partículas com diâmetros elevados.

Deve-se observar que esse comportamento passa a ser nítido apenas para solos com razoável porcentagem de fração grossa presente, pois em solos com elevada porcentagem de finos, são as características desses que determinam o comportamento do solo, uma vez que é perdido o contato entre os grãos da fração grossa. Assim, para

80 % de finos, o solo *df* apresentou massa específica aparente seca máxima superior aos solos *c* e *dg*.

Para 100 % de finos presentes nos solos, os valores de massa específica aparente seca máxima obtidos foram exatamente os mesmos para todos os solos, uma vez que foi utilizada a mesma fração fina *l*, extraída do solo proveniente de Descalvado, para a montagem dos solos *c*, *df* e *dg*.

FIGURA 4.22 – Variação da massa específica aparente seca máxima em função do teor de finos.

Quanto a faixa de variação da massa específica aparente seca máxima, pode-se observar na FIGURA 4.22 que esta variou de 1,52 g/cm³ a 2,12 g/cm³ para os solos *c*, de 1,52 g/cm³ a 1,94 g/cm³ para os solos *df* e de 1,52 g/cm³ a 1,96 g/cm³ para os solos *dg*, considerando-se teores crescentes de fração grossa, sendo que a maior variação ocorreu para os solos *c*.

4.9.2 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE UMIDADE ÓTIMA

Analisando-se a variação da propriedade umidade ótima em função da distribuição granulométrica dos solos, pode-se observar na FIGURA 4.23 que os solos com distribuição granulométrica descontínua apresentaram valores de umidade ótima mais elevados do que os solos com distribuição granulométrica contínua, considerando-se o mesmo teor de fração grossa presente. Comparando-se apenas os solos com distribuição granulométrica descontínua, nota-se que os maiores valores de umidade ótima foram obtidos para os solos com distribuição descontínua fina.

O comportamento descrito acima não foi verificado para solos com elevada porcentagem de finos, onde as características desses passa a ser preponderante, não sendo mais observável a influência das características da fração grossa. Dessa forma, para 80 % de finos, os solos com distribuição granulométrica descontínua grossa, *dg*, apresentaram umidade ótima superior aos solos *df* e *c*, que apresentaram valores de umidade ótima bastante próximos.

O fato dos solos com distribuição granulométrica descontínua grossa *dg* apresentarem valores inferiores de umidade ótima em relação aos solos com distribuição granulométrica descontínua fina *df* era esperado, uma vez que solos finos possuem maior capacidade de absorção de água do que solos grossos, ocasionando maiores valores de umidade ótima, ou seja, sendo necessária maior quantidade de água para que o solo atinja uma umidade ideal para compactação.

De acordo com a FIGURA 4.23, a faixa de variação da umidade ótima foi de 8,8 % a 28,2 % para os solos apresentando fração grossa com distribuição granulométrica contínua *c*, de 11,3 % a 28,2 % para os solos apresentando fração grossa com distribuição granulométrica descontínua fina *df* e de 10,9 % a 28,2 % para os solos apresentando fração grossa com distribuição granulométrica descontínua grossa *dg*. Pode-se observar também que os valores de umidade ótima para 100 % de finos coincidem para os três solos, uma vez que a fração fina utilizada foi a mesma e que a maior variação da umidade ótima ocorreu para os solos *c*.

FIGURA 4.23 – Variação da propriedade umidade ótima em função da porcentagem de fração fina.

4.9.3 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MINI-CBR IMEDIATO

Conforme apresentado na FIGURA 4.24, para solos com 20 e 40 % de fração grossa presente, os maiores valores de mini-CBR foram obtidos para solos com distribuição granulométrica descontínua grossa, seguidos dos solos com distribuição contínua. Aumentando-se o teor da fração grossa, observou-se uma inversão dessa relação, conforme constatado para os solos com 60 e 80% de fração grossa, para os quais os maiores valores foram obtidos para os solos com distribuição contínua, seguidos dos solos com fração grossa descontínua grossa. Os menores valores foram sempre observados para os solos com fração grossa descontínua fina.

Dessa forma, os solos com distribuição granulométrica contínua apresentaram os maiores valores de resistência, exceto para porcentagens muito elevadas de finos, quando as características desses passam a ser preponderantes. Esse resultado era esperado, pois de acordo com a literatura, solos com distribuição granulométrica contínua apresentam resistência mais elevada e melhor comportamento. Da mesma forma, esperava-se que o comportamento dos solos com fração grossa descontínua grossa dg fosse melhor do que o comportamento dos solos com fração grossa descontínua fina df .

FIGURA 4.24 – Variação do mini-CBR imediato em função do teor de finos.

A variação dos valores de mini-CBR imediato foi de 37 % a 97 % para os solos com fração grossa de distribuição granulométrica contínua c , de 37 % a 60 % para solos com fração grossa de distribuição granulométrica descontínua fina df e de 37 % a 70 % para solos com fração grossa de distribuição granulométrica descontínua grossa dg , sendo que a maior variação foi observada para os solos c .

4.9.4 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE MINI-CBR APÓS 24 H

De acordo com a FIGURA 4.25, os valores de mini-CBR após 24h de imersão apresentaram-se maiores para os solos com distribuição granulométrica contínua, sendo que os solos com fração grossa de distribuição granulométrica descontínua fina apresentaram os menores valores. Valores intermediários foram obtidos para os solos com fração grossa descontínua grossa.

Também para essa propriedade observou-se que, para elevadas porcentagens de finos presentes, a influência das características da fração grossa deixa de ser significativa, pois já foi perdido o contato entre os grãos. Assim, para 80 % de finos, o maior valor de mini-CBR imediato foi obtido para o solo *df* e o menor valor para o solo *c*, sendo que um valor intermediário foi obtido para o solo *dg*.

FIGURA 4.25 – Variação do mini-CBR 24h em função do teor de finos.

Quanto à faixa de variação dos valores de mini-CBR após 24 horas de imersão, esta foi de 29 % a 64 % para os solos com fração grossa possuindo distribuição granulométrica contínua c , de 36 % a 50 % para os solos possuindo fração grossa com distribuição granulométrica descontínua fina df e de 33 % a 55 % para solos possuindo fração grossa com distribuição granulométrica descontínua grossa dg , podendo-se observar que a maior variação do mini-CBR após 24 horas de imersão ocorreu para os solos c .

4.9.5 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE EXPANSÃO

Os maiores valores de expansão ocorreram para os solos com fração grossa apresentando distribuição granulométrica contínua. Os solos com fração grossa descontínua apresentaram valores inferiores de expansão, não sendo possível constatar a influência do tamanho médio das partículas da fração grossa no comportamento dos solos, uma vez que para 20 % e 80 % de finos os solos possuindo fração grossa com distribuição granulométrica descontínua grossa dg apresentaram expansão superior aos solos possuindo fração grossa com distribuição granulométrica descontínua fina df e para 40 % e 60 % de finos, o inverso ocorreu.

A variação da propriedade expansão em função do teor de finos encontra-se apresentada na FIGURA 4.26, na qual encontra-se indicada para cada teor de finos, a correspondente porcentagem de fração grossa.

Desconsiderando-se os solos com 100 % de finos, ou seja, 0 % de fração grossa, a variação dos valores de expansão foi de 0,02 % a 0,14 % para os solos com fração grossa de distribuição granulométrica contínua c , de 0 % a 0,03 % para os solos com fração grossa de distribuição granulométrica descontínua fina df e de 0,01 % a 0,04 % para solos com fração grossa de distribuição granulométrica descontínua grossa dg . Pode-se observar que a variação mais significativa dos valores de expansão ocorreu para os solos c .

FIGURA 4.26 – Variação da expansão em função do teor de finos.

4.9.6 COMPORTAMENTO DA PROPRIEDADE CONTRAÇÃO

Na FIGURA 4.27 encontra-se apresentada a variação da propriedade contração em função do teor de finos, estando também indicada nessa figura a porcentagem de fração grossa presente nos solos. Os maiores valores de contração ocorreram para os solos com fração grossa apresentando distribuição granulométrica descontínua fina. Os menores valores foram apresentados para os solos com fração grossa descontínua grossa e valores intermediários foram obtidos para os solos com fração grossa contínua.

A variação dos valores de contração para os solos apresentando fração grossa com distribuição granulométrica contínua foi de 0,15 % a 0,75 %. Para os solos apresentando fração grossa com distribuição granulométrica descontínua fina, essa variação foi de 0,15 % a 1,00 % e para os solos apresentando fração grossa com

distribuição granulométrica descontínua grossa, de 0,10 % a 0,72 %. Nessas variações não estão incluídos os solos com 100 % de finos, ou seja, 0 % de fração grossa.

FIGURA 4.27 – Variação da contração em função do teor de finos.

4.10 APRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS SOLOS ARTIFICIAIS EM FUNÇÃO DO VALOR DE AZUL (VA)

As propriedades massa específica aparente seca máxima, umidade ótima, mini-CBR imediato, mini-CBR após 24 horas de imersão, expansão e contração dos solos artificiais podem ter sua variação representada em função do valor de azul (Va) apresentado pelos solos.

O valor de azul (Va), definido como a quantidade de azul de metileno, em peso, consumida por um grama de solo, está intimamente relacionado com o teor de finos. Considerando-se constante o tipo de fração fina utilizada, o valor de azul aumenta proporcionalmente ao aumento da porcentagem de finos presentes nos solos.

Dessa forma, gráficos representando a variação das propriedades dos solos em função do valor de azul (Va) possuem aspecto muito semelhante aos gráficos correspondentes à variação das propriedades dos solos em função do teor de finos. Assim sendo, foram apresentadas nas FIGURAS 4.28 e 4.29, respectivamente, as variações da massa específica aparente seca máxima e do mini-CBR imediato em função do valor de azul, a título de exemplo. A apresentação da variação das demais propriedades em função do valor de azul foi omitida, pois teria caracter repetitivo.

FIGURA 4.28 – Variação da massa específica aparente seca máxima em função do valor de azul (Va).

FIGURA 4.29 – Variação do mini-CBR imediato em função do valor de azul (V_a).

Pode-se observar, nas FIGURAS 4.28 e 4.29, que a representação das propriedades geotécnicas dos solos em função do valor de azul possui a vantagem de agrupar as curvas de solos montados com a mesma fração fina, uma vez que estas terão coeficientes angulares semelhantes. Esse agrupamento ocorreu com os solos *c*, *df* e *dg*, montados com a mesma fração fina *l*, e com os solos *j* e *cb*, montados com a fração fina *ag*.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento desse trabalho permitiu que fosse realizada uma avaliação da influência da variação das características da fração grossa no comportamento das propriedades dos solos montados artificialmente em laboratório.

A seguir são apresentadas separadamente as conclusões referentes às análises da influência da variação das características da fração grossa no comportamento das propriedades dos solos, tendo por base os resultados dos ensaios de mini-CBR, expansão e contração, na energia intermediária. Deve-se ressaltar que as conclusões apresentadas restringem-se a solos “finos”, com partículas de diâmetros inferiores a 2,0 mm , sendo que as generalizações devem ser feitas com cuidado.

5.2 SOBRE A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE FORMA E TEXTURA DOS GRÃOS DA FRAÇÃO GROSSA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

A análise da influência dos parâmetros forma e textura dos grãos da fração grossa no comportamento dos solos foi realizada através da comparação de solos montados com dois tipos de fração grossa, *j* e *cb*, sendo as partículas da fração *j* mais esféricas, mais arredondadas e mais lisas do que as partículas da fração grossa *cb*.

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que frações grossas com partículas mais angulares e rugosas propiciam resistência mais elevada aos solos, o que foi evidenciado pelos valores de mini-CBR imediato e após 24 horas de imersão obtidos. Os solos *cb* apresentaram valores de mini-CBR imediato e após 24 horas de imersão sempre superiores aos valores apresentados pelos solos *j*.

A influência do maior arredondamento das partículas se fez notar na propriedade massa específica aparente seca máxima, visto que os solos *j* apresentaram massa específica aparente seca máxima maior do que solos *cb*, devido ao arranjo mais compacto proporcionado pelas partículas mais arredondadas.

As propriedades umidade ótima, expansão e contração aparentemente não foram influenciadas pela variação das características de forma e textura dos grãos da fração grossa, ou pelo menos tal influência não pôde ser detectada através dos ensaios a que foram submetidos os solos artificiais montados nesse experimento.

5.3 SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE FRAÇÃO GROSSA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

A variação do teor ou porcentagem de fração grossa presente nos solos refletiu-se significativamente na variação de suas propriedades.

Aumentos do teor de fração grossa presente nos solos corresponderam a respectivos aumentos dos valores de massa específica aparente seca máxima, porém apenas até determinado limite, a partir do qual a massa específica aparente seca máxima passou a decrescer com o aumento da porcentagem de fração grossa. Esse limite corresponde ao teor ideal de fração grossa presente em um solo, situação na qual os finos encontram-se preenchendo totalmente os vazios existentes entre os grãos da fração grossa, sem afastá-los. Caso os solos possuam teores de fração grossa acima desse limite, os finos serão insuficientes para o preenchimento dos vazios, havendo uma queda dos valores de massa específica aparente seca máxima.

A proporção ideal entre as frações fina e grossa presentes em um solo, correspondente à situação ideal de total preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa pelos finos, foi obtida experimentalmente em laboratório para cada um dos solos artificiais montados nesse experimento. Os teores ideais de fração grossa encontrados de forma aproximada para os solos *df*, *dg* e *cb* foram, respectivamente, 77,3 %, 75,5 % e 74,1 %. Como montaram-se solos com no máximo 80% de fração grossa, não foi possível obter para os solos *c* a porcentagem máxima dessa fração, a partir da qual os finos seriam insuficientes para o preenchimento dos vazios entre seus grãos, uma vez que esta porcentagem encontrase acima de 80 %.

Em geral, os valores de mini-CBR imediato e após 24 horas de imersão mostraram-se progressivamente maiores com o aumento do teor de fração grossa, exceto para teores muito elevados, a partir dos quais a resistência dos solos passou a diminuir, em virtude da insuficiência de finos para o preenchimento dos vazios existentes entre as partículas da fração grossa.

A propriedade umidade ótima diminuiu com o aumento do teor de fração grossa e conseqüente diminuição da superfície específica do material, em virtude da menor absorção de água pelas partículas. As propriedades expansão e contração também diminuíram com o aumento da fração grossa, uma vez que dependem mais significativamente da fração fina presente nos solos.

5.4 SOBRE A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA FRAÇÃO GROSSA NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

A influência da variação da distribuição granulométrica da fração grossa no comportamento das propriedades apresentadas pelos solos foi avaliada comparando-se os resultados obtidos para os solos *c*, *df* e *dg*.

No que se refere à propriedade massa específica aparente seca máxima, observou-se que os solos apresentando distribuição granulométrica contínua apresentaram os maiores valores dessa propriedade. Entre os solos com distribuição granulométrica descontínua, os solos com fração grossa *dg* (com partículas entre 1,7 e 2,0 mm de diâmetro) apresentaram valores de massa específica aparente seca máxima mais elevados do que os solos *df* (com partículas entre 0,150 e 0,300 mm de diâmetro).

Quanto a propriedade umidade ótima, os solos com distribuição contínua apresentaram os menores valores. Os solos *df* apresentaram valores de umidade ótima superiores aos valores apresentados para os solos *dg*, uma vez que os últimos possuem superfície específica menor.

Os maiores valores de resistência foram apresentados pelos solos com fração grossa de distribuição granulométrica contínua, exceto para elevados teores de finos, quando as características desses passam a ser preponderantes. Os solos *df* apresentaram sempre os menores valores de mini-CBR-imediato e após 24 horas de imersão, tendo sido encontrados valores intermediários para os solos *dg*.

A influência do tamanho médio das partículas na variação da propriedade expansão não pôde ser constatada através dos ensaios realizados, tendo sido verificado, entretanto, que os solos com distribuição granulométrica contínua apresentaram expansão superior aos solos com distribuição granulométrica descontínua. Quanto à propriedade contração, os maiores valores foram apresentados pelos solos *df* e os menores valores, pelos solos *dg*; valores intermediários foram obtidos para os solos *c*.

5.5 SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DESSA PESQUISA

O trabalho desenvolvido nessa dissertação teve por objetivo contribuir para transformar o processo de caracterização da fração fina de solos tropicais, proposto por FABBRI (1994), numa classificação de solos.

Dando continuidade a essa linha de pesquisa, sugere-se que sejam desenvolvidos estudos relacionados com:

- a) execução de um programa de montagem de solos artificiais, com variação da natureza da fração grossa utilizada, tendo por finalidade o estudo de sua influência no comportamento das propriedades apresentadas pelos solos. Por exemplo, poderiam ser comparados solos apresentando frações grossa de natureza quartzosa e micácea;
- b) investigação da validade dos resultados obtidos para solos apresentando partículas com diâmetro máximo superior a 2,00 mm;
- c) complementação da investigação referente à influência das características de forma dos grãos da fração grossa no comportamento dos solos, através da realização de um programa de montagem de solos com a utilização de frações grossas apresentando partículas com graus de arredondamento e esfericidade diferentes dos aqui utilizados;
- d) medida de outras propriedades dos solos, como por exemplo, módulo de resiliência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROSO, S.H.A. (1996). *Estudo do comportamento de solos artificiais através da adsorção de azul de metileno*. São Carlos. 124p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BARROSO, S.H.A; FABBRI, G.T.P. (1996). Variação de algumas propriedades dos solos de interesse à pavimentação em função do tipo e do teor de fração fina. In: ANAIS DO X CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, ANPET, 1996. *Anais*. Brasília, v.2, p.761-769.

BOURGUET, J.L.; BROQUET, P.; ROUSSEAU, J. (1985). Essai de classification des sols pour les terrassements. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, n.3. França.

CARTER, M; BENTLEY, S.P. (1991). *Correlations of soil properties*. London, Pentech Press.

CASANOVA, F.J. (1986). O ensaio de azul de metileno na caracterização de solos lateríticos. In: ANAIS DA 21ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1986. *Anais*. Salvador. v.2, p. 276-286.

CASAGRANDE, A. (1947). Classification and identification of soils. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Proceedings*. p.783-810.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1988). DER M191/88 – *Ensaio de compactação de solos com equipamento miniatura*. SP, DER-SP.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1988). *Determinação do índice de suporte mini-CBR e da expansão de solos compactados com equipamento miniatura*. DER M192/88 – SP, DER-SP.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1988). DER M196/88. *Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT*. SP, DER-SP.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1988). DER M197/88 – *Determinação da perda de massa por imersão de solos compactados com equipamento miniatura*. SP, DER-SP.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1968). *Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro.

FABBRI, G.T.P. (1994). *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. São Carlos. 101p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

FABBRI, G.T.P. e SÓRIA, M.H.A. (1991). Aplicação do ensaio de azul de metileno à classificação de solos - Uma primeira aproximação. In: ANAIS DA XXV REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPV, 1991. *Anais*. São Paulo, SP.

FABBRI, G.T.P. e SÓRIA, M.H.A (1995). A atividade dos solos tropicais. In: ANAIS DO IX CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 1995. *Anais*. São Carlos, SP.

FERNAU, E.A. (1977). Application of soil taxonomy in engineering. *Transportation Research Record*, n.642, p.24-27.

JOHNSON, W. M.; McCLELLAND, J.E. (1977). Soil taxonomy: an overview. *Transportation Research Record*, n.642, p.2-6.

KERGOET, M.; CIMPELLI, C. (1980). Appréciation d'un comportement de sable fin pollué par l'essai au bleu de méthylène. *Bulletin de Liaison de Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n.108, p. 89-90.

KRUMBEIN, W.C.; PETTIJOHN, F.J. (1938). Manual of sedimentary petrography. New York. 549 p. Appleton-Century-Crofts-Inc.

LAN, T.N.(1977). Un nouvel essai d'identification des sols – l'essai au bleu de méthylène. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n.88, p.136-137.

LAN, T.N. (1980). L'essai au bleu de méthylène: un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n.107, p. 130-135.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTES ET CHAUSSÉES. (1979). *L'essai au bleu de méthylène: avant-projet de mode opératoire*. [s.l. :s.n.].

MAGNAN, J.; YOUSSEFIAN, G. (1989). Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, v.159, p.93-104, jan./fév., 1989.

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

MORA, M.R. (1993). *Análise crítica das classificações de solos para fins rodoviários usadas no Brasil – Proposta e adequação para a região metropolitana da grande São Paulo*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1980). Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitação do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática. In: ANAIS DA XV REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPV, 1980. Belo Horizonte, MG.

NOGAMI, J.S.e VILLIBOR, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. COPPE/UFRJ; CNPq; ABMS. Rio de Janeiro, RJ.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1985). Peculiarities of fine grained stabilized lateritics soils. *TropicalLS'85, ABMS*, p. 327-337.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1992). Dosagem de solo-agregados tropicais, de granulação grossa, para bases de pavimentos. In: ANAIS DA XXVI° REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Aracaju, 1992. *Anais*. Rio de Janeiro, ABPv. v.1. p.362-386.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F.; SERRA, P.R.M. (1987). Metodologia MCT para dosagem de misturas de solo-agregado finas lateríticas. In: ANAIS DA 22° REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Maceió, 1987. *Anais*. Rio de Janeiro, ABPv. v.1, p.583-602.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo.

PARSONS, A.W.(1976). *The rapid measurement of the moisture condiction of earthwork material*. Transportation and Road Research Laboratory, Report, n.750.

PARSONS, A.W; BOLDEN, J.B.(1979). Transportation and Road Research Board – Supplementary Report , n.522.

PEIXOTO, A.S.P., FABBRI, G.T.P. e NOGUEIRA, J.B. (1996). Uma Avaliação da Repetibilidade dos Parâmetros que Compõem a Classificação MCT. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. ABGE,8. v.1. Rio de Janeiro. p.251-259.

PETTIJOHN, F.J. (1963). Rocas sedimentarias. 2 ed. Trad Juan Turner. Editorial Universitária de Buenos Aires. p.731.

RITTENHOUSE, G. (1943). A visual method of estimating two-dimensional sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.13, n.2, p. 79-81.

SANTANA, H. (1983). Pontos básicos e elementares da estabilização granulométrica. In: ANAIS DA 18º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO,1983. *Anais*. Porto Alegre, p. 419-462.

SEED, H.B., WOODWARD, R.J.e LUNDGREN, R. (1964a). Clay mineralogical aspects of the Atterberg Limits. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division - Proceedings of the American Society of Civil Engineers*.SM4 p.107-131.

SÓRIA, M.H.A. (1977). Relatório técnico de apreciação de programa desenvolvido dentro do convênio DER-IPA 44/77 – “Estudo comparativo das características geotécnicas de solo laterítico e solo residual saprolítico a partir de solos montados em laboratório em função da granulometria”. São Carlos.

SÓRIA, M.H.A; FABBRI, G.T.P.(1980). O ENSAIO Mini-MCV – um ensaio de MCV, Moisture Condition Value, com corpos de prova de dimensões reduzidas. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 15. Belo Horizonte, MG.

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

- VARGAS, M. (1977). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo. Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda.
- VERTAMATTI, E.(1988). Novas considerações geotécnicas sobre solos tropicais amazônicos de textura fina. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23. *Anais*, p.533-564. Florianópolis.
- VIEIRA, L.S.; VIEIRA, M.N.F. (1983). *Manual de morfologia e classificação de solos*. 2.ed. São Paulo, Editora Agronômica Ceres Ltda.
- VILLIBOR, D.F. (1981). *Pavimentos econômicos. Novas considerações*. São Carlos. 224p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VILLIBOR, D.F. (1982). *Estabilização granulométrica ou mecânica*. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. (1984). Critério para escolha de misturas descontínuas de solo laterítico-brita para bases de pavimentos. In: ANAIS DA 19ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1984. *Anais*. Rio de Janeiro, ABPv. v.1, p.267-292.
- WADELL, H. (1932). Volume, shape, and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, v.40, p.443-451.
- YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. (1975). *Principles of pavement design*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, Inc.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ANGULO, A. W. (1947). *Estabilização de solos - dosagem de misturas de solos e materiais de pedra*. Associação Rodoviária do Brasil, Boletim Técnico nº8.

ARNOLD, R.W. (1973). Soil engineers and the new pedological taxonomy. *Highway Research Record*. n.426, p.51-54.

BARROSO, S.H.A; FABBRI, G.T.P. (1997). Comparação entre as classes dos solos obtidas pelos sistemas de classificação HRB, USCS e MCT. In: ANAIS DO XI CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 1997. *Anais*. Rio de Janeiro, ANPET. v.1, p.60-70.

BARTELLI, L.J. (1977). Diagnostic soil horizons in soil taxonomy. *Transportation Research Record*, n.642, p.6-9.

BOX, G. E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. (1978) *Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building*. United States of América. John Wiley & Sons.

BUENO, B.S.; VILAR, O .M. (1984). *Mecânica dos solos*. v.1. São Carlos. EESC.

BUOL, S.W. (1977). Soil moisture and temperature regimes in soil taxonomy. *Transportation Research Record*, n.642, p.9-12.

- CAPUTO, P.H. (1973). *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 3.ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A
- DER, SP (1969). *Sub-base e base estabilizadas granulometricamente (instrução)*. 1º edição.
- GIDIGASU, M.D. (1974). Identification of problem laterite soils in highway engineering: a review. *Transportation Research Record*, n.497, p.96-111.
- GRIFFITHS, J.C.; ROSENFELD, M.A (1954). Operation variation in experimental research. *The Journal of Geology*, v.62, n.1, p.74-91.
- HANDY, R.L.; FENTON, T.E. (1977). Particle size and mineralogy in soil taxonomy. *Transportation Research Record*, n.642, p.13-19.
- McCORMACK, D. E.; FLACH, K.W.(1977). Soil series and soil taxonomy. *Transportation Research Record*, n.642, p.19-24.
- NOGUEIRA, J.B. (1988). *Mecânica dos solos*. São Carlos. EESC.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1985). Additional considerations about a new geotechnical classification for tropical soils. *TropicalLS'85, ABMS*, p. 165-175.
- NOGUEIRA, J.B.; TSUTIYA, A.M. (1982). A influência da forma da partícula na curva de distribuição de vazios de um material granular. In: ANAIS DO VII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, ABMS, 1882. Olinda, Recife. v.5, p.174-180.

- PEREIRA, AC.; JÚNIOR, F.A; GALVES, M.L. (1981). Algumas propriedades de solos arenosos finos lateríticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. COPPE/UFRJ; CNPq; ABMS. p. 497-507.
- PHILIPSON, W.R.; ARNOLD, R.W.; SANGREY, D.A (1973). Engineering values from soil taxonomy. *Highway Research Record*. n.426, p.39-49.
- ROCHA, H.C. (1995). *Algumas características dos solos arenosos terciários de São Paulo e suas implicações em obras subterrâneas*. São Carlos – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- SEED, H.B., WOODWARD, R.J.e LUNDGREN, R. (1964b) Fundamental aspects of the Atterberg Limits. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division - Proceedings of the American Society of Civil Engineers*.SM4 p.75-105.
- SELIG, E.T.; RONE, C.J. (1987). Effects of particle characteristics on behavior of granular material. *Transportation Research Record*. n.1131, p1-6.
- SÓRIA, M.H.A; FABBRI, G.T.P. (1981). Peculiaridades da fração areia de solos lateríticos utilizados na construção de bases de pavimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. COPPE/UFRJ; CNPq; ABMS. p. 261-273.
- SUGUIO, K. (1973). *Introdução à sedimentologia*. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda.
- TERZAGHI, C. (1926). Simplified soil tests for subgrades and their physical significance. *Public Roads*. v.7, n.8, p.153-170.

TERZAGHI, C. (1927). Principles of final soil classification. *Public Roads*. v.8, n.3, p.41-53.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. (1955). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Buenos Aires, Argentina, Librería “El Ateneo” editorial.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. (1982). Novo critério para escolha de solos arenosos finos para bases de pavimentos. In: ANAIS DA 17º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. 7., 1982. *Anais*. Brasília, DER-DF e ABPv. v.2, p.107-127.

ANEXO I

Fotografias das partículas das frações grossas *j* e *cb*

fração grossa j
partículas com diâmetros entre 1,2 e 2,0 mm
aumento de 9 ×

fração grossa cb
partículas com diâmetros entre 1,2 e 2,0 mm
aumento de 9 ×

fração grossa j
partículas com diâmetros entre 0,600 e 1,2 mm
aumento de $9\times$

fração grossa cb
partículas com diâmetros entre 0,600 e 1,2 mm
aumento de $9\times$

fração grossa j
partículas com diâmetros entre 0,300 e 0,600 mm
aumento de 23 ×

fração grossa cb
partículas com diâmetros entre 0,300 e 0,600 mm
aumento de 23 ×

fração grossa j
partículas com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm
aumento de 23 ×

fração grossa cb
partículas com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm
aumento de 23 ×

ANEXO II

Fotografias das partículas das frações grossas provenientes da
mineração Didone (*c*, *df* e *dg*)

partículas com diâmetros entre 1,2 e 2,0 mm
aumento de 9 ×

partículas com diâmetros entre 1,0 e 1,2 mm
aumento de 9 ×

partículas com diâmetros entre 0,600 e 0,84 mm
aumento de 9 ×

partículas com diâmetros entre 0,150 e 0,300 mm
aumento de 9 ×

ANEXO III

Resultados dos ensaios de mini-CBR, expansão e contração na energia intermediária, para os solos artificiais *cb*, *c*, *df* e *dg*

Solo artificial *cb*, com 80% de fração grossa e 20% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
4,18	1,805	37,8	16,8	0,83	0,04
5,54	1,821	54,0	19,0	0,56	0,06
6,79	1,834	40,0	19,0	0,59	0,14
7,85	1,827	34,3	22,4	0,54	0,32
9,03	1,820	34,3	19,0	0,87	0,34
10,10	1,834	25,6	22,7	0,26	0,26

Solo artificial *cb* , com 60% de fração grossa e 40% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
6,55	1,795	35,7	10,7	2,55	0,10
8,46	1,793	39,4	16,8	2,55	0,18
10,65	1,816	39,3	15,3	2,30	0,20
12,71	1,807	32,1	18,3	1,19	0,57
14,60	1,819	30,7	16,6	0,04	0,84
16,56	1,769	24,5	21,2	1,07	0,62
18,14	1,755	19,8	8,4	0,65	0,60

Solo artificial *cb* , com 40% de fração grossa e 60% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
10,49	1,687	21,2	4,8	5,47	0,10
12,40	1,691	30,0	9,3	3,88	0,30
14,24	1,692	27,8	9,9	3,26	0,42
16,10	1,699	18,9	9,9	2,39	0,57
17,77	1,704	17,3	6,8	3,08	0,61
19,00	1,692	12,6	5,2	2,76	1,02

Solo artificial *cb* , com 20% de fração grossa e 80% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
7,29	1,509	30,0	3,6	8,65	-0,12
9,44	1,515	30,7	3,5	6,86	0,04
11,30	1,530	19,8	4,0	8,30	0,06
11,52	1,572	30,5	5,0	7,16	0,00
12,75	1,586	32,1	4,9	7,26	0,22
13,03	1,550	30,0	4,4	7,72	0,24
15,01	1,551	27,8	5,2	6,86	0,26
15,48	1,586	30,7	6,3	4,74	0,34
17,34	1,597	21,2	6,0	5,94	0,45
19,46	1,598	24,2	7,2	3,76	0,58
20,33	1,565	22,7	6,6	3,64	0,38

Solo artificial c , com 80% de fração grossa e 20% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
5,81	1,944	111,9	21,2	0,04	0,24
7,45	2,047	104,0	40,0	0,04	0,14
8,77	2,104	94,7	51,9	0,14	0,12
10,29	2,071	49,1	41,4	0,00	0,32
11,24	2,038	29,3	26,4	0,00	0,22

Solo artificial *c* , com 60% de fração grossa e 40% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
7,99	1,776	132,2	10,1	0,36	0,08
10,52	1,851	117,8	20,4	0,08	0,16
12,33	1,984	94,0	59,5	0,00	0,28
13,87	1,908	30,0	25,6	0,00	0,38
15,76	1,846	10,7	9,9	0,00	0,89

Solo artificial *c*, com 40% de fração grossa e 60% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
13,21	1,551	93,3	6,8	0,8	0,0
15,28	1,649	61,5	8,4	0,4	0,4
15,64	1,596	86,0	11,1	0,3	0,2
16,87	1,825	62,9	47,7	0,1	0,5
18,86	1,748	26,4	19,8	0,0	0,7
21,11	1,697	11,0	8,5	0,0	1,1

Solo artificial *c*, com 20% de fração grossa e 80% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
18,30	1,429	79,2	8,5	0,54	0,04
18,51	1,394	62,2	7,6	0,85	0,02
20,03	1,479	54,6	17,3	0,26	0,26
22,16	1,625	24,2	14,2	0,00	0,77
22,31	1,625	46,3	28,6	0,14	0,77
24,02	1,596	24,2	19,0	0,14	1,28
26,18	1,530	9,3	7,2	0,20	2,13
28,12	1,482	7,6	5,2	0,06	1,86

Solo artificial *df*, com 80 % de fração grossa e 20 % de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
5,97	1,791	69,1	15,8	0,00	0,08
7,26	1,853	45,6	19,4	0,00	0,14
8,74	1,906	47,0	27,1	0,00	0,20
9,96	1,914	43,5	13,8	0,02	0,08
11,38	1,927	38,6	27,1	0,00	0,16
13,02	1,921	16,0	24,2	0,00	0,20
14,03	1,872	10,7	8,4	0,00	0,20

Solo artificial *df*, com 60% de fração grossa e 40 % de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
9,66	1,754	109,9	15,0	0,24	0,24
11,98	1,895	67,0	43,5	0,04	0,24
13,73	1,941	55,3	49,8	0,02	0,39
15,86	1,846	17,5	14,5	0,02	1,18
17,08	1,816	5,2	5,2	0,00	0,42

Solo artificial *df*, com 40% de fração grossa e 60% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
15,42	1,600	77,9	15,3	0,00	0,34
17,84	1,750	52,6	41,5	0,04	0,68
19,36	1,739	27,1	20,9	0,02	1,22
21,41	1,668	13,0	9,2	0,00	1,75
23,12	1,616	6,0	5,2	0,00	2,33

Solo artificial *df*, montado com 20 % de fração grossa e 80 % de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
18,21	1,448	80,6	6,8	0,84	0,12
20,64	1,521	53,3	19,0	0,16	0,34
21,65	1,601	54,0	15,8	0,10	0,65
22,34	1,656	48,4	38,7	0,02	1,01
24,64	1,589	19,8	15,3	0,00	1,21
26,70	1,534	9,3	8,5	0,00	1,91
28,71	1,479	6,8	4,4	0,00	2,99

Solo artificial dg , com 80 % de fração grossa e 20 % de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm^3)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
5,28	1,741	57,4	6,8	0,58	0,32
6,49	1,798	74,5	21,2	0,08	0,08
7,86	1,836	56,6	25,7	0,00	0,00
8,91	1,868	54,8	44,2	0,00	0,00
9,37	1,880	62,9	48,4	0,00	0,12
9,99	1,872	67,0	39,7	0,00	0,12
10,83	1,975	66,3	55,3	0,02	0,10
11,58	1,907	45,6	47,0	0,00	0,10

Solo artificial *dg*, com 60 % de fração grossa e 40 % de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR (Imediato)	Mini-CBR (24 h)	Expansão (%)	Contração (%)
8,68	1,763	90,0	19,0	0,20	0,14
11,11	1,895	100,6	37,6	0,32	0,06
12,83	1,945	71,8	54,2	0,00	0,12
15,11	1,878	30,0	26,4	0,06	0,46
17,20	1,788	16,8	16,0	0,20	0,40

Solo artificial *dg*, com 40% de fração grossa e 60% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
14,94	1,600	68,4	9,2	0,54	0,20
16,19	1,756	75,9	17,3	0,04	0,40
18,51	1,779	41,4	35,0	0,02	0,41
19,84	1,741	22,7	19,0	0,10	0,49
21,01	1,696	15,3	9,9	0,00	1,03
22,69	1,654	5,9	5,0	0,02	1,44
23,96	1,620	4,4	5,0	0,02	1,74

Solo artificial d_g , com 20% de fração grossa e 80% de fração fina

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Mini-CBR Imediato (%)	Mini-CBR 24 h (%)	Expansão (%)	Contração (%)
17,55	1,417	63,6	9,2	0,73	0,14
20,68	1,510	57,4	16,0	0,16	0,37
23,30	1,584	47,0	31,4	0,00	0,74
25,13	1,557	18,9	19,8	0,02	0,86
26,46	1,545	13,8	8,5	0,00	1,10

ANEXO IV

Procedimento aproximado para determinação das condições de
preenchimento dos vazios existentes entre
os grãos da fração grossa

PROCEDIMENTO APROXIMADO PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE PREENCHIMENTO DOS VAZIOS EXISTENTES ENTRE OS GRÃOS DA FRAÇÃO GROSSA

Para análise aproximada das condições de preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração grossa, foi seguido o procedimento descrito a seguir.

Inicialmente, cada uma das frações grossas foi colocada num cilindro de volume conhecido, submetido a vibrações, com a finalidade de obter-se a máxima densidade possível na prática. A massa de fração grossa contida no cilindro foi determinada por pesagem; a massa específica aparente de cada fração foi calculada utilizando-se os dados obtidos de massa e volume; a massa específica aparente seca foi determinada medindo-se a umidade em que se encontravam as frações c , df , dg e cb .

Uma vez que a massa específica dos sólidos da fração grossa havia sido previamente determinada através de ensaio específico, foi calculada a porcentagem de vazios existente entre os grãos da fração grossa através da diferença percentual entre a massa específica dos sólidos e a massa específica aparente seca da fração grossa. A partir da massa específica dos sólidos da fração grossa foi também calculada a massa de fração grossa presente num volume hipotético de 1000 cm^3 de fração grossa.

A partir dessas porcentagens e utilizando-se a massa de fração grossa calculada para um volume hipotético de 1000 cm^3 dessa fração, foram calculadas as massas de água e de finos presentes nesse volume. Considerando-se a massa específica aparente seca das frações finas l e ag aproximadamente iguais a $1,2 \text{ g/cm}^3$, e conhecendo-se a massa específica da água, foram determinados os volumes de finos e água presentes nos solos.

Comparando-se a soma dos volumes ocupados pelos finos e pela água com o volume total de vazios existente em cada solo (soma dos volumes de vazios existentes entre os grãos da fração grossa e de vazios existentes na fração fina), pôde-se constatar a condição de entrosamento entre esses três componentes dos solos, isto é, pôde-se

constatar se os finos e água eram insuficientes para o preenchimento dos vazios entre as partículas da fração grossa ou se estavam separando tais partículas. Foi determinada também a porcentagem ótima de fração fina presente em um solo, na condição de umidade ótima, tal que o volume de finos e água correspondesse exatamente ao volume de vazios existente entre os grãos da fração grossa. Esses valores ótimos de porcentagem de finos foram apresentados na TABELA 4.8; a obtenção de tais valores está representada a seguir, para os solos *c*, *df*, *dg* e *cb*, respectivamente.

Foi também realizada uma análise paralela, onde considera-se apenas o preenchimento dos vazios da fração grossa pelos finos, desconsiderando-se a água. Da mesma forma que na análise anterior, foi determinada a porcentagem ótima de fração fina presente em um solo, tal que o volume de finos correspondesse exatamente ao volume de vazios existentes entre os grãos da fração grossa. Os resultados dessa análise encontram-se apresentados na TABELA 4.8 e nas figuras apresentadas a seguir.

Representação gráfica da obtenção da porcentagem ideal de finos presentes nos solos *c*.

Representação gráfica da obtenção da porcentagem ideal de finos presentes nos solos df .

Representação gráfica da obtenção da porcentagem ideal de finos presentes nos solos dg .

Representação gráfica da obtenção da porcentagem ideal de finos presentes nos solos *cb*.

ANEXO V

Relação entre índices de suporte (RIS), para os solos artificiais
cb, j, c, df e dg

RELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE SUPORTE (RIS)

São apresentados nesse anexo os resultados da relação entre índices de suporte (RIS), proposta por VILLIBOR (1981) para caracterizar a redução do valor de suporte dos solos, pela imersão em água. A RIS é definida pela relação percentual entre o valor de mini-CBR após 24 horas de imersão e o valor de mini-CBR imediato.

Representação gráfica da variação da relação entre índices de suporte (RIS), para os solos artificiais *cb*, *j*, *c*, *df* e *dg*.

Pode observar na figura acima que a influência da natureza da fração fina foi significativa, uma vez que os solos possuindo fração fina *l* (extraída de um solo laterítico) apresentaram sempre maiores valores de RIS do que os solos com fração fina *ag* (extraída de um solo siltoso de alteração de granito, não laterítico). Pode-se observar também que os solos *df* apresentaram os maiores valores de RIS, sendo que para tais solos a redução da capacidade de suporte pela imersão em água foi muito pequena.