Campus de São Carlos

*REVISÃO DA CORRELAÇÃO MINI-CBR/CBR
PARA SOLOS DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS- SP*

CRISTIANE OLIVEIRA DE ALENCAR BARROS

ORIENTADOR: PROF. DOUTOR GLAUCO TÚLIO PESSA FABBRI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Revisão da Correlação Mini-Cbr / Cbr para Solos do Município de São Carlos - SP

Eng^a Cristiane Oliveira de Alencar Barros

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 Transportes.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

Serviço de Pós-Graduação EESC - SP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 07.10.2003

Ass:.....
[Assinatura]

São Carlos
2003

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043065

✓

Class.	TESE
Cutt.	0820
Tombo	T106/03
Sysno	1314300

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B277r Barros, Cristiane Oliveira de Alencar
Revisão da correlação Mini-CBR/CBR para solos do
município de São Carlos-SP / Cristiane Oliveira de
Alencar Barros. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri.

1. Mini-CBR. 2. CBR. 3. Solos tropicais. 4. MCT.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **CRISTIANE OLIVEIRA DE ALENCAR BARROS**

Dissertação defendida e julgada em 15/04/2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **GLAUCO TÚLIO PESSA FABBRI** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **SÉRGIO ANTONIO RÖHM**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovada

Prof. Assoc. **ALEXANDRE BENETTI PARREIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Assoc. **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Aos meus amados pais Juraci Alencar e Zoraide
Oliveira e fiéis irmãs Pollyanne Alencar e
Juliane Alencar pelo carinho, apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que, de uma forma ou de outra, ajudaram na realização deste trabalho, especialmente:

Ao Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri, pela orientação e constante ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

À Agência Financiadora CNPq, pelo apoio financeiro cedido durante a realização desta pesquisa.

A Antônio Carlos Gigante, Roberto Morasco e Carlos Antônio Oliveira (*in memoriam*) do Laboratório de Estradas da Escola de Engenharia de São Carlos, pela colaboração na realização dos ensaios e pelos momentos de descontração.

Ao Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, através do Prof. Dr. Manoel Alba Sória e aos funcionários, representados por Heloísa, Magali e Beth.

Aos funcionários da biblioteca da Escola de Engenharia de São Carlos.

À Santana, minha vó, pela benção que mesmo de longe sentia a todo instante.

Aos amigos Éverton Parente, Andréa Oliveira, Andréa Kobayachi e Josiane Palma, pelo apoio e compreensão.

Ao grande amigo Ricardo que tanto me ajudou com as cópias.

À Dona Élide, pelo carinho e pelas palavras de entusiasmo.

A Sergio Gomes de Miranda pelo amor dedicado.

Ao Prof. Lourival Trajano pela gentileza de ter revisado este trabalho.

A Lourival Trajano Filho pelos conselhos e amizade.

A Deus, pela saúde e força nas horas mais difíceis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Estrutura da Pesquisa	3
2. ENSAIO DE CBR (California Bearing Ratio)	5
2.1 Introdução	5
2.2 Descrição do Ensaio de CBR	7
2.3 Ensaio de CBR: Vantagens, Desvantagens e Algumas Pesquisas Realizadas	11
2.3.1 Determinação do Índice de Suporte Califórnia com Equipamento de Dimensões Reduzidas (Ensaio mini-CBR)	12
2.3.2 Estudos dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza	16
2.3.3 CBR do <i>Kentucky</i> e o Índice de Suporte Califórnia	18
2.3.4 Módulo de Resiliência e CBR	21
2.3.5 Ensaio com Penetrômetros e o Ensaio de CBR <i>In-Situ</i>	29
3. ENSAIO DE MINI-CBR	36
3.1 Introdução	36
3.2 Descrição do Ensaio Mini-CBR	40
3.3 Ensaio de Mini-CBR: Vantagens, Desvantagens e Algumas Pesquisas Realizadas	43
3.3.1 Classificação Resiliente e Ensaio de mini-CBR	43
3.3.2 Algumas Peculiaridades Resilientes de Solos Lateríticos e Saprolíticos	47
3.3.3 Determinação de mini-CBR com Penetrômetro Dinâmico Leve PDL	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1 Introdução	52

4.2 Solos Utilizados	52
4.3 Ensaio de Mini-CBR	54
4.4 Ensaio de CBR	54
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	55
5.1 Introdução	55
5.2 Umidade Ótima do Ensaio de Mini-CBR versus Umidade de Moldagem do Ensaio de CBR	56
5.3 Massa Específica Seca Máxima do Ensaio de Mini-CBR versus Massa Específica Seca de Moldagem do Ensaio de CBR	58
5.4 Valores de Mini-CBR Imediato versus Valores de CBR	61
5.5 Valores de Mini-CBR após 24h de imersão versus Valores de CBR	67
5.6 Valores das cargas dos Ensaios de Mini-CBR após 24h de imersão versus Valores das cargas dos Ensaios de CBR	73
5.6.1 Cargas dos Ensaios de Mini-CBR determinadas para as umidades de moldagem dos Ensaios de CBR	73
5.6.2 Cargas dos Ensaios de Mini-CBR determinadas para as umidades ótimas dos Ensaios de Mini-CBR	76
5.7 Valores das cargas dos Ensaios de Mini-CBR após 24h de imersão versus Valores de CBR	78
5.7.1 Cargas dos Ensaios de Mini-CBR determinadas para as umidades de moldagem dos Ensaios de CBR versus Valores de CBR	79
5.7.2 Cargas dos Ensaios de Mini-CBR determinadas para as umidades ótimas dos Ensaios de Mini-CBR versus Valores de CBR	81
5.8 Valores médios dos CBR dos solos em função de suas classes MCT	84
5.9 Expansões dos Ensaios de Mini-CBR versus Expansões dos Ensaios de CBR	87
6. CONCLUSÕES	89
6.1 Considerações Iniciais	89
6.2 Principais Conclusões	90
6.3 Considerações Finais	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

ANEXO A - LOCAL ONDE AS AMOSTRAS ESTUDADAS FORAM COLETADAS, NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLSO-SP	96
ANEXO B - RELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CBR PARA ENERGIA NORMAL DE COMPACTAÇÃO	99
ANEXO C - RELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE MINI-CBR PARA ENERGIA NORMAL DE COMPACTAÇÃO	102
ANEXO D - RELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CBR PARA ENERGIA INTERMEDIÁRIA DE COMPACTAÇÃO	105
ANEXO E - RELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE MINI-CBR PARA ENERGIA INTERMEDIÁRIA DE COMPACTAÇÃO	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Correção das curvas carga x penetração do ensaio de CBR, segundo o Manual do <i>Corps of Engineers U. S. Army</i> (1958)	11
FIGURA 2.2 - Valores de CBR x cargas dos ensaios de mini-CBR, obtidos na energia normal, segundo Nogami (1972)	14
FIGURA 2.3 - Relações entre valores de CBR e mini-CBR, correspondentes ao teor de umidade ótimo de compactação (NOGAMI, 1972)	15
FIGURA 2.4 – Relação entre os valores de carga de mini-CBR para penetração de 2,0mm e os valores de CBR para penetração de 2,5mm para energia normal (Barroso, 2002)	17
FIGURA 2.5 – Relação entre os valores de carga de mini-CBR para penetração de 2,5mm e os valores de CBR para penetração de 5,0mm para energia normal (Barroso, 2002)	17
FIGURA 2.6 - Curvas CBR x CBR do <i>Kentucky</i> (Hopkins e Deen, 1973)	21
FIGURA 2.7 - Classificação resiliente de solos granulares, segundo DNER (1996)	23
FIGURA 2.8 - Variação da relação M_R /CBR em função da classificação MCT dos solos, segundo DNER (1996)	25
FIGURA 2.9 – Relações M_R /CBR em função do teor de argila e do CBR dos solos (DNER, 1996)	26
FIGURA 2.10 – Relação gráfica para estimativa dos módulos de resiliência do solo (Huang, 1993)	28
FIGURA 2.11 - Relação entre CBR calculado pelo ensaio de SPT e o ensaio de CBR <i>in-situ</i> (Livneh, 1989)	31
FIGURA 2.12 - Comparação dos valores de CBR calculados através dos vários testes de penetração e os valores de CBR <i>in-situ</i> (Livneh, 1989)	32
FIGURA 2.13 - Comparação dos resultados de CBR <i>in-situ</i> e os calculados pelo ensaio de DCP realizado em vias urbanas (Livneh, 1989)	34

FIGURA 3.1 – Equipamento utilizado para compactação dos corpos de prova de mini-CBR	41
---	----

FIGURA 3.2 – Ilustração da montagem para medição da expansão do solo no cilindro de mini-CBR	42
--	----

FIGURA 3.3 - Módulo de Resiliência x Tensão Desvio – Solos argilosos e siltosos, de acordo com o DNER (1990)	45
--	----

FIGURA 3.4 - Distribuição dos valores de M_R (kgf/cm ²) na classificação MCT, segundo o DNER (1990)	46
---	----

FIGURA 3.5 - Variação do módulo de resiliência com o mini-CBR para alguns solos (FRANZOI, 1990)	49
---	----

FIGURA 3.6 - Representação gráfica das equações de regressão (3.2) e (3.3), que relacionam os valores de penetração do PDL e os valores de mini-CBR, segundo Nogueira e Röhms (1993)	51
--	----

FIGURA 4.1 – Distribuição das amostras de solos utilizadas na carta da classificação MCT	53
--	----

FIGURA 5.1 – Umidade ótima dos ensaios de mini-CBR x umidade de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia normal, segundo classe MCT	56
--	----

FIGURA 5.2 – Umidade ótima dos ensaios de mini-CBR x umidade de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia intermediária, segundo classe MCT	57
---	----

FIGURA 5.3 – Massa específica seca máxima dos ensaios de mini-CBR x massa específica seca de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia normal	59
---	----

FIGURA 5.4 – Massa específica seca máxima dos ensaios de mini-CBR x massa específica seca de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia intermediária	59
--	----

FIGURA 5.5 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe MCT	61
---	----

FIGURA 5.6 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe MCT	62
--	----

FIGURA 5.7 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe pedológica	62
--	----

FIGURA 5.8 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe pedológica	63
FIGURA 5.9 – Variação dos valores de mini-CBR imediato, para energia normal	63
FIGURA 5.10 – Variação dos valores de mini-CBR imediato, para energia intermediária	64
FIGURA 5.11 – Distribuição dos valores de mini-CBR imediato, para energia normal	65
FIGURA 5.12 – Distribuição dos valores de mini-CBR imediato, para energia intermediária	65
FIGURA 5.13 – Relações CBR/mini-CBR imediato, para energia normal	66
FIGURA 5.14 – Relações CBR/mini-CBR imediato, para energia intermediária	66
FIGURA 5.15 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe MCT	68
FIGURA 5.16 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe MCT	68
FIGURA 5.17 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe pedológica	69
FIGURA 5.18 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe pedológica	69
FIGURA 5.19 – Variação dos valores de mini-CBR imerso, para energia normal	70
FIGURA 5.20 – Variação dos valores de mini-CBR imerso, para energia intermediária	70
FIGURA 5.21 – Distribuição dos valores de mini-CBR imerso, para energia normal	71
FIGURA 5.22 – Distribuição dos valores de mini-CBR imerso, para energia intermediária	71
FIGURA 5.23 – Relações CBR/mini-CBR imerso, para energia normal	72
FIGURA 5.24 – Relações CBR/mini-CBR imerso, para energia intermediária	72
FIGURA 5.25 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x carga de CBR (2,5mm), para umidade de moldagem do CBR, energia normal	74

FIGURA 5.26 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x carga de CBR (5,0mm), para umidade de moldagem do CBR, energia normal	74
FIGURA 5.27 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x carga de CBR (2,5mm), para umidade de moldagem do CBR, energia intermediária	75
FIGURA 5.28 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x carga de CBR (5,0mm), para umidade de moldagem do CBR, energia intermediária	75
FIGURA 5.29 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x carga de CBR (2,5mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia normal	76
FIGURA 5.30 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x carga de CBR (5,0mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia normal	77
FIGURA 5.31 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x carga de CBR (2,5mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária	77
FIGURA 5.32 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x carga de CBR (5,0mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária	78
FIGURA 5.33 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x CBR (2,5mm), para umidade de moldagem do CBR, energia normal	79
FIGURA 5.34 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x CBR (5,0mm), para umidade de moldagem do CBR, energia normal	80
FIGURA 5.35 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x CBR (2,5mm), para umidade de moldagem do CBR, energia intermediária	80
FIGURA 5.36 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x CBR (5,0mm), para umidade de moldagem do CBR, energia intermediária	81
FIGURA 5.37 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x CBR (2,5mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia normal	82
FIGURA 5.38 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x CBR (5,0mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia normal	82
FIGURA 5.39 – Carga de mini-CBR (2,0mm) x CBR (2,5mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária	83
FIGURA 5.40 – Carga de mini-CBR (2,5mm) x CBR (5,0mm), para umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária	83

FIGURA 5.41 – Valores médios de CBR na energia normal, em função da classe MCT dos solos _____ 84

FIGURA 5.42 – Valores médios de CBR na energia intermediária, em função da classe MCT dos solos _____ 85

FIGURA 5.43 – Valores de CBR na energia normal, em função da classe MCT dos solos _____ 86

FIGURA 5.44 – Valores de CBR na energia intermediária, em função da classe MCT dos solos _____ 86

FIGURA 5.45. - Expansão na umidade ótima do ensaio de mini-CBR x expansão do ensaio de CBR, para a energia normal _____ 87

FIGURA 5.46. - Expansão na umidade ótima do ensaio de mini-CBR x expansão do ensaio de CBR, para a energia intermediária _____ 87

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Métodos de compactação usados para preparar os corpos de prova (Hopkins e Deen, 1973)	19
TABELA 2.2 - Resumo das características dos materiais estudados na Pesquisa de Inter-Relacionamento de Custos Rodoviários (Queiróz <i>et alli</i> , 1981)	22
TABELA 2.3 - Classificação dos solos finos, segundo DNER (1996)	24
TABELA 2.4 - Relação M_R – CBR (DNER, 1996)	27
TABELA 2.5 - Comparação dos valores de CBR estimados pelo valor do DCP utilizando as expressões 2.11 e 2.12 (Livneh, 1989)	30
TABELA 2.6 - Comparação dos resultados de CBR <i>in-situ</i> e os obtidos a partir de vários ensaios realizados em pistas de aterrissagem de aeronaves pesadas (Livneh, 1989)	33
TABELA 3.1 - Dados qualitativos das propriedades mecânicas e hidráulicas da classificação MCT, segundo Nogami e Villibor (1995)	39
TABELA 3.2 - Faixas de variação dos valores das propriedades mecânicas e hidráulicas da classificação MCT (Nogami e Villibor, 1995)	40
TABELA 3.3 – Classificação MCT x classificação resiliente e o comportamento dos solos quanto ao grau de resiliência (DNER, 1990)	46
TABELA 4.1 - Distribuição das amostras de solos de acordo a ocorrência das classes pedológicas do município de São Carlos e as respectivas classes MCT encontradas por Rodgher (2002)	53
TABELA 5.1 – Teores de umidade médios pretendidos (mini-CBR) e obtidos (CBR) e desvios absolutos médios dos teores das umidades, segundo as classes MCT, para energia normal	58
TABELA 5.2 – Teores de umidade médios pretendidos (mini-CBR) e obtidos (CBR) e desvios absolutos médios dos teores das umidades, segundo as classes MCT, para energia intermediária	58

TABELA 5.3 – Desvios dos guas de compactação médios e valores médios das massas específicas seca máxima e de moldagem segundo a classe MCT, para energia normal____ 60

TABELA 5.4 - Desvios dos guas de compactação médios e valores médios das massas específicas seca máxima e de moldagem segundo a classe MCT, para energia intermediária
____ 60

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AASHO – American Association of State Highway Officials

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society of Testing Materials

CBR – California Bearing Ratio

COPPE – Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia

COPPE-RJ - Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia do Rio de Janeiro

DER-M – Método do Departamento de Estradas de Rodagem

DER-SP - Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo

DCP – Dynamic Cone Penetrometer

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNER-ME – Método de Ensaio do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DPA – Dynamic Probing Type A

DPT M – Departamento de Pesquisa e Tecnologia - Materiais

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

GEIPOT – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

IPT/SP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica

MCT – Miniatura Compactado Tropical

MCV – Moisture Condition Value

MINI-CBR – CBR Miniatura

MINI-MCV – MCV Miniatura

PDL – Penetrômetro Dinâmico Leve

SPT – Standard Penetration Test

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

Ma	– Massa de água a adicionar (kg)
Mh	– Massa de solo seco (kg)
Hót	– Unidade ótima (%)
Hn	– Umidade higroscópica (%)
Mc	– Massa por camada (g)
γ_h	– Massa específica (g/cm^3)
γ	– Massa específica seca (g/cm^3)
Vc	– Volume do cilindro (cm^3)
GC	– Grau de compactação (%)
γ_{s1}	– Massa específica seca após a compactação (g/cm^3)
γ_{s2}	– Massa específica seca antes da compactação (g/cm^3)
$C_{2,50}$	– Carga equivalente a penetração de 2,50mm
$C_{5,00}$	– Carga equivalente a penetração de 5,00mm
C	– Carga (kg)
log	– Logaritmo
SN	– Números estruturais
a_1 e a_2	– Coeficientes estruturais
d_1 e d_2	– Espessura das camadas de sub-base e base
M_R	– Módulo de resiliência (kgf/cm^2)
k_1 , k_2 , k_3 e k_4	– Parâmetros de resiliência
σ_3	– Tensão confinante (kgf/cm^2)
σ_d	– Tensão desvio (kgf/cm^2)
G	– Solos de comportamento granular
I	– Solos de comportamento intermediário
C	– Solos de comportamento coesivo
S%	– Percentagem de silte
X	– Média dos resultados dos ensaios
σ	– Desvio padrão
n	– Número de amostras
c.v.	– Coeficiente de variação
c'	– Inclinação do segmento retilíneo mais inclinado da curva de compactação para mini-MCV = 10

PG – Penetração por golpe (mm/golpe)

MCBR – Valor do mini-CBR obtido a partir do PDL (%)

W – Umidade

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo rever as relações existentes entre os valores obtidos dos ensaios mini-CBR e CBR, a fim de tornar possível a utilização dos resultados de ensaios de mini-CBR no dimensionamento de pavimentos flexíveis, uma vez que este ensaio é mais prático, exige menor quantidade de amostra, é mais rápido para ser executado e exige menor esforço físico na sua realização, sendo, portanto, menos dispendioso que o ensaio de CBR.

No desenvolvimento dos ensaios, os resultados indicavam que essas relações não se mostravam adequadas para o universo em estudo, pois quando tentava-se relacionar, graficamente, os resultados dos ensaios tradicionais de CBR com os do mini-CBR, não se obtinham retas como era de se esperar e sim uma nuvem de pontos, indicando não haver correlação entre os dois índices.

Desta forma, tentou-se desenvolver novas relações, nos moldes do que fora feito originalmente por Nogami (1972), e correlacionar novamente os valores de carga do ensaio de CBR, para as penetrações de 2,5 e 5,0mm, com os valores de carga desenvolvidos nos ensaios padronizados de mini-CBR, para as penetrações de 2,0 e 2,5mm, respectivamente, nas energias de compactação normal e intermediária.

Nesta pesquisa são abordados os fundamentos, a descrição e algumas pesquisas realizadas com os ensaios de CBR e de mini-CBR.

Foram utilizadas nesta pesquisa 62 amostras de solos do município de São Carlos – SP, as quais foram submetidas ao ensaio de CBR, nas energias de compactação normal e intermediária, e os resultados foram comparados com os dos ensaios de mini-CBR. As amostras foram escolhidas considerando-se a proporcionalidade entre as áreas de ocorrência das classes pedológicas no município de São Carlos.

Por fim, apresentam-se as tentativas feitas para aproveitar ao máximo os resultados obtidos nos ensaios de CBR e de mini-CBR.

ABSTRACT

The objective of this work is to review the relation among the results of mini-CBR and CBR tests. This will make possible the use of mini-CBR test results in flexible pavements design, once this test is more practical, it demands smaller amount of samples, its execution is faster and it demands less physical effort, being, therefore, less expensive than CBR tests.

In the development of these tests, the results indicated that those relations not shown appropriate for the universe in study, therefore when it tried to relate, graphically, the results of the traditional CBR test with the one of the mini-CBR, not obtained straight line as it was of waiting and yes a cloud of points, indicating not to be correlation among the two indexes.

This form, tried to develop new relations, in the molds of what had been done originally by Nogami (1972), and to correlate the values of load CBR test, for the penetrations of 2,5 and 5,0mm, with the load values developed in the standardized mini-CBR test, for the penetrations of 2,0 and 2,5mm, respectively, in normal and intermediate compaction energies.

In these tests are foundations, the description and some researches realized are approached with the CBR and mini-CBR tests.

In these tests will be used, 62 soil samples from São Carlos - SP, will be submitted to CBR test, in normal and intermediate compaction energies, and the results will be compared with those ones from mini-CBR test. The samples were chosen considering the proportionality among pedologic class occurrence areas in São Carlos.

Finally, to show up the attempts done to utilize to the maximum the results obtained in the CBR and mini-CBR tests.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Entre 1928 e 1929, no *California Division of Highways*, Estado da Califórnia, EUA, iniciou-se uma investigação nos pavimentos que apresentavam falhas e foi constatado que elas, tanto poderiam estar diretamente ligadas a problemas de compactação durante a construção, como também poderiam ser causadas pelo dimensionamento insuficiente das camadas do pavimento ou pela utilização de materiais para bases inadequados para suportar a intensidade do tráfego. Foi nessa época que Porter, em 1929, desenvolveu um ensaio de índice de suporte na tentativa de providenciar um método rápido para avaliação dos materiais de base e sub-base com capacidade de suporte para reforçar o subleito. Este ensaio foi denominado de *CBR (California Bearing Ratio)* (Porter, 1950).

Em 1943, durante a 2ª Guerra Mundial, o *U. S. Corps of Engineers* adaptou o ensaio de CBR às necessidades de dimensionamento de pavimentos de aeroportos militares; desde então o método foi reconhecido pela AASHO e vem sendo utilizado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis em rodovias (Yoder e Witczak, 1975).

O ensaio de CBR é um dos mais adotados para avaliar a capacidade de suporte dos materiais utilizados em pavimentos e os principais métodos de dimensionamento são nele baseados. Tal fato ocorre, inclusive em países de clima tropical e sub-tropical como o Brasil, onde os solos de granulometria fina possuem propriedades e comportamentos peculiares e bem

diferentes dos solos de países com clima temperado, para os quais o ensaio de CBR foi elaborado.

Em 1963, a *Iowa State University*, desenvolveu um método de ensaio para compactação de corpos de prova de solos que utilizava equipamentos com 2'' de diâmetro e aproximadamente 2'' de altura e requeria apenas um décimo da massa de solo e um terço do tempo necessários para moldar corpos de prova, em comparação com o método estabelecido pela AASHO. Esse método foi desenvolvido para auxiliar os estudos de estabilização de solos com aditivos e para o controle da massa específica de construção no campo (O'Flaherty *et alli*, 1963).

No Brasil, a sistemática de estudos de solos tropicais, com uso de corpos de prova de dimensões reduzidas, foi introduzida em 1965 pelo Eng.º Carlos de Souza Pinto, para estudo da estabilização de solos com aditivos, sendo estendida por Nogami, em 1972, para determinação da capacidade de suporte com o ensaio em escala reduzida, designado de mini-CBR. Esse ensaio foi baseado no procedimento desenvolvido pela *Iowa State University* (Lafleur *et alii*, 1960¹ *apud* Nogami e Villibor, 1995) e foi adaptado para melhor atender às peculiaridades dos solos tropicais e à metodologia geralmente adotada no nosso país (Nogami e Villibor, 1981).

Esse ensaio é denominado mini-CBR por utilizar equipamentos de dimensões reduzidas (corpos de prova de 5,0cm de diâmetro, 5,0cm de altura e pistão de penetração de 16mm de diâmetro) e o procedimento de compactação é feito com uso de soquete de seção plena. O ensaio de mini-CBR proporciona reduções da quantidade de amostra necessária para a sua realização, do esforço físico despendido na compactação e dos custos, tornando o ensaio mais rápido e de fácil execução (Nogami, 1972).

Nogami (1972), visando a utilização do mini-CBR para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, estabeleceu uma relação entre o índice CBR e os valores das cargas obtidas durante a penetração no mini-CBR. No desenvolvimento da pesquisa, o autor utilizou apenas treze amostras de solos, consideradas típicas do Estado de São Paulo e as compactou na energia normal, para as condições de umidade ótima e massa específica seca máxima; logo após esta relação foi estendida para energia intermediária.

¹ Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. T., Gurland, J. (1960) Relationship Between the California Bearing Ratio and Iowa Bearing Value, in *Methods for Testing Engineering Soils*. *Iowa State University*. Ames, Iowa.

Em 1981, uma proposta para classificação dos solos tropicais foi apresentada por Nogami e Villibor que, preocupados em aproveitar melhor os recursos naturais disponíveis no Brasil, desenvolveram a metodologia MCT (de Miniatura, Compacto e Tropical) de classificação de solos. Atualmente, essa metodologia vem sendo usada por vários órgãos viários (DER-SP, DER-PR, DER-BA, DNER, Metrô-SP, DERSA, Prefeituras de São Paulo e de Diadema, etc.) e instituições de pesquisa e projetos relacionados com obras viárias (IPT, USP-EESC e EPUSP, COPPE, ITA, UFRGS, etc.) (Nogami e Villibor, 1995).

Apesar da metodologia MCT ser bastante eficaz na identificação das diferenças entre os diversos tipos de solos tropicais e ser capaz de prever, com precisão, suas qualidades, o uso da classificação, fora do âmbito das pesquisas relacionadas com obras viárias tem sido muito reduzido (Cozzolino e Nogami, 1993). Isso ocorre, provavelmente, pela falta de uma correlação entre os valores de mini-CBR e CBR suficientemente divulgada e aceita pela comunidade técnica, o que restringe a aplicação do ensaio de mini-CBR, não sendo possível sua utilização para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

1.2 OBJETIVO

Essa pesquisa tem como objetivo rever as correlações existentes entre os resultados dos ensaios de mini-CBR e CBR para um número grande de amostras de solos do município de São Carlos, Estado de São Paulo. Tem também, como objetivo secundário, caso seja necessário, estabelecer uma nova correlação que permita avaliar a real possibilidade de prever os valores de CBR através dos resultados de ensaios de mini-CBR e, efetivamente, simplificar as etapas de determinação da capacidade de suporte de solos para fins de utilização em pavimentos.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Essa pesquisa é apresentada em seis capítulos, sendo que o capítulo 1 refere-se à presente introdução. No capítulo 2 estão apresentados os fundamentos do ensaio de CBR, sua descrição e algumas pesquisas realizadas acerca do assunto. No capítulo 3 estão apresentados os fundamentos do ensaio de mini-CBR, sua descrição e algumas pesquisas realizadas com o mesmo. No capítulo 4 são descritos os materiais e métodos empregados para a execução da

pesquisa. O capítulo 5 é composto da apresentação e da discussão dos resultados dos ensaios. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas da pesquisa.

2. ENSAIO DE CBR (*California Bearing Ratio*)

2.1 INTRODUÇÃO

Segundo Hogentogler *et alli* (1937), um método de seleção de solos para fundações foi desenvolvido em 1927 pelo Prof. W. S. Housel, da *University of Michigan*. O método consistia da escavação de um buraco onde era colocada uma coluna de compressão, que descia até uma certa profundidade, colocava-se na extremidade inferior dessa coluna uma placa de suporte e na extremidade superior aplicavam-se cargas, as quais eram transferidas para a placa; mediam-se as cargas aplicadas e a deflexão provocada pelas mesmas. O método, estabelecido por Housel, relacionava esses valores das cargas com as deflexões medidas.

Após o método desenvolvido por Housel, entre 1928 e 1929, a *California Division of Highways* fez uma intensa investigação em todas as áreas, no estado da Califórnia, que tinham falhas nos pavimentos, a fim de determinar os fatores que afetavam a sua estabilidade. Essa investigação indicou três principais tipos de falhas dos pavimentos:

- Tipo 1 - deslocamento lateral do material de subleito, como resultado da absorção de água pelo pavimento e conseqüente amolecimento após a construção;
- Tipo 2 - recalque diferencial das camadas subjacentes do pavimento; e
- Tipo 3 - deflexão excessiva das camadas subjacentes do pavimento resultante das cargas por repetições.

Os tipos de falhas 1 e 2, poderiam estar diretamente ligadas a problemas de compactação durante a construção e o tipo de falha 3 poderia ser causada pela espessura insuficiente das camadas do pavimento ou pela existência de bases fracas, ou seja, inadequadas para suportar a intensidade exigida pelo tráfego (Porter, 1950).

Os pavimentos que não tinham falha, indicaram um aumento limitado da umidade, após a construção, devido ao grau de compactação do material. Mas, embora as condições de drenagem contribuíssem para o aumento da umidade dos materiais utilizados no pavimento, elas não eram consideradas.

A primeira tentativa para estabelecer a densidade que deveria ser usada na compactação dos materiais utilizados no subleito e avaliar a resistência requerida pelo tráfego, foram os ensaios estáticos de cargas, realizados em campo. Mas foi praticamente impossível definir a umidade do solo no campo, pois esta era afetada pelos ensaios de prova de carga, e como consequência, os resultados desses ensaios poderiam representar uma condição que não estivesse relacionada à condição definitiva, e portanto, não simulariam a reação do subleito durante o tempo de vida útil do pavimento (Franco e Lee, 1987).

Em 1929, Porter desenvolveu um ensaio de índice de suporte, na tentativa de eliminar algumas deficiências do ensaio de prova de carga em campo e para providenciar um método rápido para comparação dos materiais de base e sub-base que pudessem ser utilizados para reforçar o subleito. Este ensaio foi nomeado de *CBR (California Bearing Ratio)*. Depois, uma relação empírica foi estabelecida entre os resultados do ensaio e os materiais que seriam apropriados para base e subleito (Porter, 1950).

A *American Society of Civil Engineers* propôs um ensaio mais prático para determinação do valor de suporte dos solos para fundação que consistia da compactação de corpos de prova moldados em três camadas, cada uma com 25 golpes, por um soquete de 2,491kg caindo a uma altura de 30,5cm, em cilindros de 4" de diâmetro e aproximadamente 4 1/2" de altura, com um colar de 2" de altura. As amostras eram secadas, e determinava-se a umidade; depois ia-se acrescentando, aproximadamente, 1% de água até que a amostra ficasse úmida e existisse uma diferença significativa entre as massas específicas do solo. A resistência do solo era determinada pela medida da pressão requerida para a penetração de uma agulha que penetrava no solo a uma velocidade de 1,27mm/s (Hogentogler *et alli*, 1937).

O método de ensaio foi modificado em 1943, durante a 2ª Guerra Mundial, pelo *U. S. Corps of Engineers* que adaptou o ensaio de CBR às necessidades de pavimentos de aeroportos militares e, a partir daí, o ensaio foi reconhecido pela AASHO, tornando-se conhecido mundialmente. Entretanto, esse ensaio era bem diferente do proposto por Porter, uma vez que estabelecia um sistema dinâmico de compactação (Yoder e Witczak, 1975 e Senço, sem data).

Na década de 50, o Eng.º Murilo Lopes de Souza introduziu aperfeiçoamentos e adaptações ao método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER, que utiliza o CBR, tais como: utilização de gráficos para o dimensionamento do pavimento e a determinação das equivalências de operação entre diferentes cargas por eixo e a carga por eixo padrão, levando também em consideração fatores climáticos. Dessa forma, foi compensado, em parte, o empirismo importado, que não foi reavaliado à época com pesquisas (Medina, 1988). A partir daí, passou a ser o primeiro método nacional para determinar a capacidade de suporte do subleito e das camadas do pavimento e para dimensionar pavimentos flexíveis e semi-rígidos oficializado e adotado por um órgão rodoviário. O método baseia-se na carga por roda e no índice de suporte CBR do subleito (Zuppolini Neto, 1994).

O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração padronizada de um pistão também padronizado, numa amostra compactada de solo e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa amostra padrão de pedra britada, compactada nas mesmas condições. O valor CBR do subleito, expresso em percentagem, permite determinar, com o auxílio de curvas empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária, em função do tráfego, para uma determinada camada do pavimento não romper, ou seja, permite dimensionar um pavimento (DNER, 1996).

Segundo Nogami e Villibor (1995), embora alguns países mais desenvolvidos tenham substituído o ensaio de CBR por outros ensaios, ele continua sendo o ensaio adotado, praticamente com exclusividade, em nosso meio técnico.

2.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE CBR

A seguir será apresentado o ensaio de CBR, de acordo com o método do DNER – ME 50-64 (que é o ensaio mais utilizado pelos órgãos nacionais e estaduais para a obtenção dos dados

relativos às características dos materiais para o dimensionamento de pavimentos flexíveis). Ele compreende as seguintes etapas:

- a) Preparação da amostra: a amostra é seca ao ar, destorroada, homogeneizada e reduzida, por quarteamento, até se obter uma porção representativa de 6,0kg para solos siltosos ou argilosos e 7,0kg para solos arenosos ou pedregulhosos que passem na peneira de 19mm. Se 5% ou mais do material ficar retido na peneira, procede-se a substituição do mesmo por igual quantidade em peso do material passado na peneira de 19mm e retido na de 4,8mm, obtido de outra amostra representativa.
- b) Compactação dos corpos de prova: o cilindro de compactação possui as seguintes características: 152,4mm de diâmetro, 177,8mm de altura e colar de 50,8mm de altura. Utiliza também para moldagem um disco espaçador de 63,5mm de altura e 150,8mm de diâmetro. A moldagem do corpo de prova é realizada na umidade ótima obtida no ensaio de compactação, do DNER, que for adotado:

Caso I – Método DPT M47-64, ou

Caso II – Método DPT M48-64.

De acordo com estes métodos, os corpos de prova podem ser moldados da seguinte forma, para:

Caso I (Energia Normal) – a compactação é realizada em 5 camadas, cada uma com 12 golpes de soquete grande (4,536kg) e altura de queda constante e igual a 45,72cm.

Caso II (Energia Intermediária) – compactação em 5 camadas, cada uma com 26 golpes de soquete grande (4,536kg) e altura de queda constante e igual a 45,72cm.

Para conseguir que o teor de umidade para moldagem chegue próximo ao teor de umidade ótimo, deve-se adicionar água à amostra seca, sendo a quantidade de água calculada pela expressão 2.1:

$$Ma = \frac{Mh(Hot - Hn)}{100 + Hn} \quad (2.1)$$

Onde: M_a – massa de água a adicionar (kg);

M_h – massa de solo seco (kg);

H_{ot} – umidade ótima (%);

H_n – umidade higroscópica (%).

Em seguida calcula-se a quantidade de massa por camada, expressão 2.2:

$$M_c = (\gamma_h * V_c) / 5 \quad (2.2)$$

Onde: M_c – massa por camada (g);

γ_h – massa específica (g/cm^3);

V_c - volume do cilindro (cm^3).

Depois calcula-se a massa total que o corpo de prova deveria ter após a compactação, para com essa encontrar o grau de compactação (expressão 2.3) a ser atingido.

$$GC = (\gamma_{s1} / \gamma_{s2}) * 100 \quad (2.3)$$

Onde: GC – Grau de compactação (%);

γ_{s1} – massa específica seca após a compactação (g/cm^3);

γ_{s2} – massa específica seca antes da compactação (g/cm^3).

Durante a moldagem retiram-se duas cápsulas para conferir o teor de umidade da amostra, uma na segunda e outra na quarta camadas.

Após a compactação, retira-se o colar e rasa-se o corpo de prova. Em seguida retira-se o disco espaçador e pesa-se o conjunto de compactação mais amostra, verificando o peso total. Por último, coloca-se uma sobrecarga de 4,536Kg e um extensômetro para medida da expansão. Depois, procede-se a imersão de modo que o nível de água fique cerca de 1cm acima do bordo superior do cilindro. Mantém-se o cilindro imerso por 4 dias e efetua-se diariamente as leituras de expansão.

- c) Determinação do CBR: terminado o período de imersão, retira-se o corpo de prova e deixa-se escoar a água por 15min. Monta-se o cilindro na prensa, ajusta-se o pistão para que fique no centro do corpo de prova, e o extensômetro, para que fique perfeitamente

vertical e zerado. Executa-se a penetração do corpo de prova a uma velocidade constante de 1,27mm/min, fazendo-se leituras das cargas correspondentes às penetrações de 0,63; 1,25; 2,50; 5,00; 7,50; 10,00 e 12,5mm. Encontram-se os valores de carga, multiplicando-se as leituras efetuadas pela constante do anel de penetração.

- d) Curva carga - penetração: traça-se a curva carga – penetração. Para obter as cargas de penetração dos dados do ensaio, ajusta-se o ponto zero da curva. Se for necessário corrigir discontinuidades ou a forma inicial da curva, a figura 2.1 ilustra o método de correção, segundo o Manual do *Corps of Engineers U. S. Army* (1958). Se a curva for uniforme e não apresentar ponto de inflexão (curva A), obtém-se o índice de suporte Califórnia, correspondentes às penetrações de 2,50 e 5,00mm, aplicando as expressões 2.4 e 2.5. O valor de CBR será o maior dos dois valores. Caso haja necessidade de correções das discontinuidades (curva B ou curva C), deve-se traçar uma tangente pelo ponto de inflexão e considerar a origem das abcissas o ponto em que esta tangente corta o eixo das abcissas, obtendo-se assim as cargas corrigidas e então calcula-se os índices de CBR correspondentes às penetrações de 2,50 e 5,00mm, da maneira já citada.

$$CBR = (C_{2,50}) * 100 / 1350 \quad (2.4)$$

$$CBR = (C_{5,00}) * 100 / 2050 \quad (2.5)$$

Onde: CBR – índice de suporte Califórnia (%);

$C_{2,50}$ – Carga equivalente a penetração de 2,50mm;

$C_{5,00}$ – Carga equivalente a penetração de 5,00mm;

1350 e 2050 – valores das cargas correspondentes às penetrações da brita padrão.

FIGURA 2.1 – Correção das curvas carga x penetração do ensaio de CBR, segundo o Manual do *Corps of Engineers U. S. Army* (1958).

2.3 ENSAIO DE CBR: VANTAGENS, DESVANTAGENS E ALGUMAS PESQUISAS REALIZADAS

De acordo com Nogami e Villibor (1979), o ensaio de CBR é insuficiente para caracterização adequada dos solos destinados ao uso em pavimentação nas regiões tropicais úmidas, por limitar-se à obtenção do valor da expansão e de suporte para umidade ótima e massa específica máxima de uma determinada energia de compactação, para condição de 4 dias de imersão e uso de uma sobrecarga padrão. Os autores acreditam que para essas regiões é necessário efetuar as determinações de suporte e expansão para outras condições de umidade de compactação, imersão, sobrecarga e energias de compactação, o que exigiria, em média a moldagem de 15 corpos de prova, cerca de 100kg de amostra, além de um grande

desgaste físico. Nogami (1995) acha que os resultados do ensaio de CBR levam ao encarecimento das obras rodoviárias, pois o desempenho dos solos é freqüentemente subestimados.

Apesar das limitações do ensaio de CBR e de ter sido, em grande parte, substituído por outros ensaios nos países mais desenvolvidos, ele tem algumas vantagens bastante relevantes que são a simplicidade, não exigindo cálculos complicados, a importância no nosso meio técnico, pelo fato de fornecer resultados que são reconhecidos mundialmente, ou seja, que dão uma idéia do tipo de material e por ser ainda o ensaio mais utilizado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil. Dentre as desvantagens do ensaio, tem-se o alto grau de esforço físico exigido para a sua execução, a grande quantidade de amostra utilizada na moldagem dos corpos de prova, o tempo de saturação de 4 dias, que torna o ensaio muito lento e, conseqüentemente, dispendioso.

Pelo fato do ensaio de CBR ser o mais utilizado na fase de dimensionamento de pavimentos flexíveis, serão citadas algumas pesquisas que foram realizadas envolvendo o ensaio, para mostrar sua importância no meio rodoviário.

2.3.1 Determinação do Índice de Suporte Califórnia com Equipamento de Dimensões Reduzidas (Ensaio mini-CBR)

Nogami (1972), publicou os resultados de uma pesquisa que consistiu da utilização de equipamentos de dimensões reduzidas para prever o valor do índice de suporte Califórnia, a fim de empregá-lo no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Este trabalho restringiu-se ao estabelecimento da relação entre os valores de mini-CBR e os valores de CBR, em amostras compactadas na energia normal.

A pesquisa foi desenvolvida em duas fases, com treze amostras de solos consideradas típicas do Estado de São Paulo: na primeira fase, procurou estabelecer a relação entre resultados obtidos de amostras compactadas e encharcadas e na segunda fase, objetivando a verificação da possibilidade do emprego do ensaio de mini-CBR para determinação direta do CBR de solos de subleitos de pavimentos já submetidos à ação das intempéries, iniciou-se a determinação da relação entre amostras compactadas não submetidas ao encharcamento; esta fase não foi concluída na pesquisa, por estar, na época, em fase de execução o equipamento

necessário, mas os primeiros resultados, justificaram o prosseguimento da pesquisa para ensaios “in situ”.

Na primeira fase, foi desenvolvida uma relação entre os valores de CBR e as cargas de penetração obtidas através do ensaio em escala reduzida. Ao mesmo tempo, procurou relacionar as massas específicas e as umidades ótimas de compactação obtidas nas moldagens pelos dois processos.

Os ensaios de CBR foram realizados segundo o método descrito pelo DER – M 53 – 71. Foram feitos ensaios de cinco pontos (cinco teores de umidade) e as curvas de CBR em função do teor de umidade, foram representadas em gráficos monologarítmicos, a fim de evitar as influências pessoais no traçado, sendo considerados retilíneos tanto o ramo ascendente como o descendente. Segundo o autor, esse critério acentua as eventuais influências dos erros nos ensaios, o que é vantajoso quando se deseja verificar o grau de cuidado com que os mesmos foram executados.

No ensaio de mini-CBR utilizou-se uma aparelhagem semelhante àquela desenvolvida no *Iowa State University*, que consistiu de cilindros com 130mm de altura e 50mm de diâmetro, soquete de 2,27kg de massa e uma altura de queda de 30,5cm e pistão de penetração de 16mm de diâmetro. O processo de moldagem dos corpos de prova sofreu algumas modificações, caracterizadas por:

Moldagem de dois corpos de prova, para cada teor de umidade de compactação, mediante 5 golpes de cada lado para todos os solos com exceção dos solos arenosos, nos quais eram aplicados 8 golpes por lado. No processo original de *Iowa State University*, é recomendada a moldagem de três corpos de prova para cada teor de umidade.

As curvas de mini-CBR e de compactação em função do teor de umidade obtidas desse ensaio também foram representadas em gráficos monologarítmico, a fim de evitar as influências pessoais no traçado, considerando retilíneos tanto o ramo ascendente como o descendente, por motivos já citados.

Para as mesmas amostras, os valores de CBR correspondentes à penetração de 2,5mm (teor de umidade ótima) foram relacionados com os valores da carga correspondentes à penetração 2,0mm obtida do ensaio mini-CBR e os valores de CBR correspondentes à penetração de

5,0mm (teor de umidade ótima) foram relacionados com os valores da carga correspondente à penetração de 2,5mm obtida do ensaio mini-CBR. Observou-se que para alguns solos, havia uma diferença razoável nos teores de umidade dos ensaios.

Na figura 2.2 representam-se os pontos que geraram duas relações que estão, como pode ser observado, sensivelmente alinhados ao longo de uma reta média. Estas relações, são:

- A carga do ensaio de mini-CBR, correspondente à penetração de 2,0mm, com o valor de CBR, correspondente à penetração de 2,5mm, resultando na seguinte equação de regressão: $\log \text{CBR} = \log 0,896 * C - 0,254$, onde C é a carga em kg;
- A carga do ensaio de mini-CBR, correspondente à penetração de 2,5mm, com o valor de CBR, correspondente à penetração de 5,0mm, resultando na seguinte equação de regressão: $\log \text{CBR} = \log 0,937 * C - 0,356$, onde C é a carga em kg.

FIGURA 2.2 – Valores de CBR x cargas dos ensaios de mini-CBR, obtidos na energia normal, segundo Nogami (1972).

Na figura 2.3, pode-se verificar a qualidade da relação desenvolvida, de acordo com Nogami (1972). Os valores de CBR correspondem àqueles obtidos graficamente, mediante a construção da curva CBR máximo (o maior dos valores referentes às penetrações de 2,5 e 5,0mm) em função do teor de umidade de moldagem, foi adotado o valor correspondente ao teor de umidade ótimo de compactação. Os valores de mini-CBR foram obtidos da mesma maneira, só que mediante a construção da curva mini-CBR máximo (o maior dos valores referentes às penetrações de 2,0 e 2,5mm) em função do teor de umidade de moldagem.

FIGURA 2.3 – Relações entre valores de CBR e mini-CBR, correspondentes ao teor de umidade ótimo de compactação (NOGAMI, 1972).

Na segunda fase, os ensaios foram realizados sem encharcamento, para as mesmas amostras e mesmos teores de umidade; os valores de CBR correspondentes às penetrações de 2,5 e 5,0 mm foram correlacionados com os valores das cargas de penetração obtidas no ensaio de mini-CBR correspondentes às penetrações de 2,0 a 2,5mm. Nestas condições, obtiveram-se

retas de relação com dispersões maiores que as obtidas na primeira fase. Por esse motivo, o autor julgou não ter significado a obtenção de uma nova relação.

Em suas conclusões, Nogami (1972) constata a existência de uma excelente relação entre os valores de CBR, obtidos segundo o método do DER-SP (para amostras compactadas na energia normal e encharcamento de 4 dias), e os valores obtidos através da execução do ensaio de mini-CBR e utilização das equações de regressão desenvolvidas. Isso foi verificado, mesmo havendo diferenças entre as respectivas curvas de compactação.

2.3.2 Estudos dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza

Barroso (2002), tentou estabelecer relações entre valores de mini-CBR após 24h de imersão e CBR; na pesquisa a autora utilizou sessenta amostras de solos coletadas em número proporcional à ocorrência das classes pedológicas da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Para cada amostra foram realizados ensaios de mini-CBR e CBR nas energias de compactação normal e intermediária. O ensaio de CBR foi determinado conforme a norma DNER ME 50-94, para umidade ótima e o ensaio de mini-CBR foi realizado de acordo com o método de ensaio DER M 192-88.

Após a tentativa de relacionar os valores de mini-CBR após 24h de imersão com os valores de CBR, Barroso (2002) notou que não há relação entre essas duas propriedades, nem para energia normal e nem para intermediária.

Sem uma boa concordância entre os valores de mini-CBR e CBR, a autora testou a possibilidade de relacionar carga do mini-CBR, para penetração de 2,00mm, com CBR calculado para penetração de 2,50mm e carga do mini-CBR, para penetração de 2,50mm, com CBR calculado para penetração de 5,00mm, ambas na energia de compactação normal, nos moldes do que fora originalmente usado por Nogami em 1972. Nas figuras 2.4 e 2.5, são apresentados os resultados destas relações, codificados segundo a classe MCT dos solos.

FIGURA 2.4 – Relação entre os valores de carga de mini-CBR para penetração de 2,0mm e os valores de CBR para penetração de 2,5mm para energia normal (Barroso, 2002).

FIGURA 2.5 – Relação entre os valores de carga de mini-CBR para penetração de 2,5mm e os valores de CBR para penetração de 5,0mm para energia normal (Barroso, 2002).

Essa autora concluiu que para os solos da RMF, parece não haver possibilidade de estimar o valor de CBR, a partir da execução do ensaio de mini-CBR, pois não foi possível estabelecer nenhuma relação quando se considerou a carga do mini-CBR correspondente à penetração de 2,00mm com CBR de 2,50mm e nem quanto se considerou a carga do mini-CBR correspondente à penetração de 2,50mm com CBR de 5,00mm, na umidade ótima para energia normal.

2.3.3 CBR do *Kentucky* e o Índice de Suporte Califórnia

Hopkins e Deen (1973), na tentativa de relacionar o ensaio de CBR, utilizado pela AASHO, com o ensaio de CBR desenvolvido pelo *Kentucky Department of Highways*, executaram alguns ensaios de CBR do *Kentucky*, para uma amostra de solo de fundação da pista da AASHO, quatro amostras de solos do Estado do *Kentucky* e uma amostra de solo do Estado de *Ohio*, em diferentes umidades de moldagem e energias de compactação utilizadas pela AASHO, e compararam os resultados com os obtidos dos ensaios de CBR padronizados.

O método para determinação do CBR utilizado no Estado do *Kentucky* foi produzido inicialmente por Stanton, em 1944, depois foi modificado por Baker e Drake em 1948, sendo esse o adotado para execução dos ensaios.

As características dos equipamentos, dos números de camadas, da compactação dos corpos de prova e dos materiais, utilizados nos diferentes métodos considerados na pesquisa desses autores, estão apresentadas na tabela 2.1.

O método 1 (AASHO T99-61, método A) foi usado para determinar as relações umidade - massa específica de cada solo investigado.

TABELA 2.1 – Métodos de compactação usados para preparar os corpos de prova
(Hopkins e Deen, 1973).

Item	AASHO T 99-61, ASTM D 698-66T			AASHO T 180-51, ASTM D 1557-66T	Ensaio de CBR do Kentucky Padrão Método 5	Ensaio de CBR do Kentucky Alterado Método 6
	Método A Método 1	Método B Método 2	Método B Método 3	Método B Método 4		
Cilindro						
Diâmetro(cm)	10,16	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24
Altura(cm)	11,70	11,70	12,70	11,70	Variável	Fixo
Volume(cm³)	943,90	2124,30	2296,581	2124,30	Variável	Fixo
Soquete						
Peso(kg)	2,50	2,50	2,50	4,54	-	-
Altura de queda(cm)	30,48	30,48	30,48	45,72	-	-
Diâmetro(cm)	5,08	5,08	5,08	5,08	-	-
Camadas						
Número total	3	3	3	5	1	1
Área(cm²)	81,10	182,39	182,39	182,39	182,39	182,39
Espessura(cm)	4,32	4,32	4,32	2,54	Variável	Fixo
Compactação						
Golpes/camada	25	56	56	56	2,000psi	Variável
Energia(J/m³)	592,52	589,74	541,10	2680,62	Compressão Estática	Compressão Estática
Material						
Tamanho máximo(mm)	4,76	4,76	4,76	4,76	19	19
Correção do tamanho	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim

No final da pesquisa os autores desenvolveram três diferentes relações entre os resultados dos ensaios utilizados no experimento.

A primeira relação foi produzida em escala logarítmica e aceita a relação entre os valores de CBR do *Kentucky* de 5,2 a 100, correspondentes aos valores de suporte do solo variando de 3 a 10, conforme mostrado na figura 2.6, curva A.

A segunda relação obtida, também em escala logarítmica, aceita valores de CBR do *Kentucky* entre 5,2 e 90, correspondentes aos valores de suporte do solo de 3 a 10, representada pela curva B, na figura 2.6.

A terceira relação foi construída da seguinte forma: adotaram-se valores de CBR do *Kentucky* variando de 3 a 90 e números equivalentes de solicitação (EAL) de acordo com as condições de tráfego representadas nas curvas do *Kentucky*. Os valores de EAL adotados foram convertidos para números de eixos equivalentes da AASHO. Esses valores, juntamente com os valores de CBR do *Kentucky* e as curvas do *Kentucky*, utilizadas para projetos de pavimentos flexíveis, foram usados para gerar várias combinações de espessura de pavimentos. Determinaram-se os números estruturais (SN) dos sistemas de pavimentos, pela expressão 2.6.

$$SN = a_1 d_1 + a_2 d_2 \quad (2.6)$$

Onde: a_1 e a_2 – coeficientes estruturais;

d_1 e d_2 – espessura das camadas de sub-base e base.

Adotando $a_1 = 0,36$ e $a_2 = 0,18$ (valores freqüentemente usados no *Kentucky* na análise de pavimentos), encontraram-se os valores dos números estruturais. Com esses valores e os números equivalentes de solicitação adotados, considerando, de acordo com a AASHO, um índice de serventia ($P_1 = 2,5$) para projetos de pavimentos flexíveis, foi possível determinar os valores de CBR do solo correspondentes a cada CBR do *Kentucky* assumido. Os resultados desse procedimento estão expressos pela curva C, na figura 2.6.

FIGURA 2.6 – Curvas CBR x CBR do *Kentucky* (Hopkins e Deen, 1973).

2.3.4 Módulo de Resiliência e CBR

Tanto o DNER como a AASHTO realizaram vários estudos com o módulo de resiliência (M_R) e com o valor de índice de suporte califórnia dos solos (CBR), na tentativa de prever os valores de M_R utilizando o ensaio de CBR. A seguir são mostrados alguns desses trabalhos.

De acordo com DNER (1996), os estudos da resiliência de materiais para pavimentos tiveram início na década de 70, quando foi observado que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais, gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego. Esses estudos permitiram avaliar comportamentos estruturais até então não explicáveis pelos procedimentos clássicos e efetuar uma abordagem mais realista dos problemas que ocorrem nas rodovias brasileiras.

Os primeiros resultados de ensaios de compressão diametral, realizados na COPPE, foram divulgados em 1980, por Pinto e Preussler. Posteriormente, o GEIPOT conduziu a Pesquisa de Inter-Relacionamento de Custos Rodoviários, que envolveu a realização de diversos ensaios para caracterização dos solos tropicais (Medina, 1988). Na tabela 2.2 tem-se um resumo dos resultados onde se observa valores de módulos de resiliência altos e valores dos

graus de saturação relativamente baixos e com grande variação, contrastando com os valores encontrados nos países de clima frio e temperado (Queiróz *et alli*, 1981¹ *apud* Franzoi, 1990).

TABELA 2.2 – Resumo das características dos materiais estudados na Pesquisa de Inter-Relacionamento de Custos Rodoviários (Queiróz *et alli*, 1981).

	Número de observações	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Teor de umidade <i>in-situ</i> (%)	75	20,8	5,6	8,6	31,2
Densidade <i>in-situ</i> (g/cm ³)	75	1,52	215	1,05	1,98
CBR <i>in-situ</i> (%)	75	14,2	8,3	2	34
Grau de saturação (%)	75	49,6	11,4	28,4	83,2
Módulo de resiliência (kgf/cm ²), para tensão confinante de 0,14 kgf/cm ² e tensão desvio (kgf/cm ²) de:					
0,14	50	2353	1936	134	10194
0,28	74	3401	3646	124	14800
0,42	75	2782	3132	116	16000
0,56	75	2465	2973	110	17000
0,70	25	4764	3758	281	17100

Segundo DNER (1996), os estudos de mecânica dos pavimentos iniciados na COPPE/RJ, em 1976, por Pinto e Preussler, sob a orientação do Prof. Medina, possibilitaram o desenvolvimento de uma classificação de solos baseada nas propriedades resiliêntes (M_R), classificando-os como:

- a) Solos Granulares, para fins de classificação quanto à resiliência, são aqueles que apresentam menos de 35% em peso de material passado na peneira de 0,075mm; o modelo que representa o comportamento desse tipo de solo pode ser visto na expressão 2.7.

¹ Queiróz, C. A. V., Visser, A. T., Hudson, W. R.. (1981). Previsão de Módulos de Resiliência de Subleitos Tropicais a partir de Ensaíos Tradicionais. In. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia* – ABMS, pp. 591-614, 1981, Rio de Janeiro, RJ.

$$M_R = K_1 * \sigma_3^{K_2} \quad (2.7)$$

Onde: K_1 e K_2 – parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais com carregamento repetido sob tensões de confinamento σ_3 .

Os grupos de solos granulares são:

Grupo A: solos com grau de resiliência elevado, não devem ser empregados em estruturas de pavimentos e constituem subleitos de péssima qualidade.

Grupo B: solos com grau de resiliência intermediário, podem ser empregados em estrutura de pavimentos como base, sub-base e reforço do subleito, ficando seu comportamento dependente das seguintes condições:

$K_2 \leq 0,50$ (bom comportamento)

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

Grupo C: solos com baixo grau de resiliência, podem ser empregados em todas as camadas do pavimento, resultando em estruturas de baixas deflexões.

Na figura 2.7 apresentam-se os grupos de solos granulares (A, B e C), que retratam o comportamento dos solos, definido pelo modelo da expressão 2.7.

FIGURA 2.7 – Classificação resiliente de solos granulares, segundo DNER (1996).

- b) Solos finos, para fins de classificação quanto à resiliência, são aqueles que apresentam mais de 35% em peso de material passando na peneira de 0,075mm. Os modelos que representam o comportamento desses solos são apresentados nas expressões 2.8 e 2.9.

$$M_R = K_2 + K_3(K_1 - \sigma_d), \text{ para } \sigma_d < K_1 \quad (2.8)$$

$$M_R = K_2 + K_4(\sigma_d - K_1) \text{ para } \sigma_d > K_1 \quad (2.9)$$

Onde: K_1 , K_2 , K_3 e K_4 – parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais com carregamento repetido e tensões-desvio σ_d .

Os grupos de solos finos são:

Solos do tipo I, que têm bom comportamento quanto à resiliência para subleito e reforço do subleito, podendo também serem utilizados como camadas de sub-base.

Solos do tipo II, que têm comportamento regular quanto à resiliência para subleito e reforço do subleito.

Solos do tipo III, que possuem comportamento ruim quanto à resiliência, não sendo aconselhado seus empregos em camadas de pavimento.

Na impossibilidade de determinar os valores de M_R , pode-se estimar a classificação indiretamente, a partir da percentagem de silte (S%) na fração que passa na peneira de 0,075mm e do CBR (tabela 2.3).

TABELA 2.3 – Classificação dos solos finos, segundo DNER (1996).

Silte (%) \ CBR (%)	≤ 35	35-65	≥ 65
≤ 5	III	III	III
6-9	II	II	III
≥ 10	I	II	III

Solo tipo I – $M_R = 4874\sigma_d^{-1,129}$

Solo tipo II – $M_R = 1286\sigma_d^{-0,5878}$

Solo tipo III – $M_R = 530\text{kgf/cm}^2$

Em função das diferentes características granulométricas, os solos tendem a apresentar comportamentos mecânicos variados, por isso espera-se que a relação M_R/CBR para solos finos coesivos (resistência à penetração baixa) seja mais elevada que no caso dos solos granulares (resistência à penetração elevada), uma vez que o módulo de resiliência mede a deformabilidade elástica do solo, enquanto que o CBR está relacionado com a resistência do solo saturado (DNER, 1996).

A relação M_R/CBR pode ser um parâmetro bem mais indicativo da natureza dos solos que o valor de M_R ou do CBR isoladamente, sendo mais capaz de diferenciar grupos ou tipos de solos existentes (DNER, 1996).

Segundo o DNER (1996), colocando-se a relação M_R/CBR no ábaco da classificação MCT, obtêm-se os resultados mostrados na figura 2.8, que indicam relações características para cada região delimitada.

FIGURA 2.8 – Variação das relações M_R/CBR em função da classificação MCT dos solos, segundo DNER (1996).

De acordo com o DNER (1990 e 1996), o parâmetro dominante que afeta a relação M_R /CBR é a percentagem de argila; com essa indicação, foram analisados os resultados dessas relações e os valores médios foram colocados numa figura % de argila versus CBR. Essa análise permitiu a definição de três regiões distintas, como se pode ver na figura 2.9, de acordo com as características indicadas. Estes grupos de solos tanto podem ser utilizados em projetos de pavimentos novos para a previsão do M_R a partir do ensaio de CBR, que é considerado pelos autores um ensaio simples, como podem também ser usados na avaliação estrutural de pavimentos existentes, para estimativa do valor de CBR do solo de subleito a partir do módulo de resiliência “*in situ*” e foram designados pelas letras:

- G – solos de comportamento granular
- I - solos de comportamento intermediário
- C - solos de comportamento coesivo

FIGURA 2.9 – Relações M_R /CBR em função do teor de argila e do CBR dos solos (DNER, 1996).

Um resumo dos valores médios das relações M_R /CBR, para os três grupos de solos pode ser visto na tabela 2.4.

TABELA 2.4 – Relação M_R – CBR (DNER, 1996).

Grupo	CBR/(%argila)	M_R /CBR (Valor médio)
G	$> 0,474$	40
I	entre 0,202 e 0,474	120
C	$< 0,202$	440
Solo Arenoso Fino	-	700

Em 1982, Preussler e Pinto apresentaram um método de dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis baseado na deflexão atual e na deflexão admissível, que foi designado de “método da resiliência”, e consiste, simplificada, na comparação das deflexões calculadas com as medidas (Medina, 1988).

A AASHTO (1993) usa o módulo de resiliência para avaliar os solos utilizados em projetos de pavimentos. O guia relata que o módulo de resiliência pode ser utilizado diretamente em projetos de pavimentos flexíveis ou pode ser convertido para representar o módulo de reação do subleito (*k-value*) para os casos dos pavimentos rígidos.

O guia da AASHTO utiliza o módulo de resiliência para representar o valor de suporte do solo pelas seguintes razões:

- a) Os valores do M_R obtidos por ensaios triaxiais dinâmicos possibilitam a análise e a previsão dos estados de tensão-deformação de estruturas de pavimentos através de programas computacionais;
- b) O M_R é reconhecido internacionalmente como capaz de caracterizar os materiais utilizados em projetos de pavimentação;
- c) Ensaios locais, não destrutivos, são capazes de estimar os valores de M_R dos vários materiais.

Segundo a AASHTO (1993), Heukelom and Klomp estabeleceram, em 1963, a expressão 2.10. para a previsão do valor do M_R a partir do CBR.

$$M_R = 105 * (CBR) \quad (2.10)$$

Onde: 105 – coeficiente que pode variar de 52,5 a 210;

MR – módulo de resiliência *in-situ* (kgf/cm²);

CBR – índice de suporte Califórnia (%).

Essa relação tem sido usada extensivamente em projetos de pavimentos, pois, fornece resultados aceitáveis para CBR < 10%.

Van Til *et alli*, em 1972, realizaram estudos extensivos para relacionar M_R , bem como outros parâmetros de ensaios, como o índice de suporte do solo ou o coeficiente estrutural empregado na equação de dimensionamento das camadas do pavimento da AASHO. Na figura 2.10, tem-se as relações do M_R com o valor R , com o CBR, com o triaxial do Texas e com o índice de grupo. Essas relações são válidas para as condições estabelecidas nos ensaios e podem ser usadas como um guia, se outras informações mais confiáveis não forem disponíveis (Huang, 1993).

FIGURA 2.10 – Relação gráfica para estimativa dos módulos de resiliência do solo (Huang, 1993).

Os estudos realizados por Van Til *et alli*, em 1972 procuraram estabelecer relações entre o M_R e os resultados de ensaios que fossem mais facilmente executados, pois os autores consideram que o ensaio triaxial dinâmico, utilizado para a obtenção do módulo de resiliência dos solos, é bastante trabalhoso (Soares, 1998).

2.3.5 Ensaios com Penetrômetros e o Ensaio de CBR *In-Situ*

Devido à publicação de vários artigos apresentando relações entre o *dynamic cone penetrometer* (DCP), o *dynamic probing type A* (DPA), o *standard penetration test* (SPT) e o CBR *in-situ*, Livneh (1989) fez um estudo da validade dessas relações através da investigação da capacidade de suporte de subleito e de camadas do pavimento de rodovias e pistas de aeroportos de Israel.

Os ensaios de penetração são utilizados para determinar, entre outras coisas, a capacidade de suporte de subleitos. O DCP é usado também para avaliar as condições das camadas do pavimento. Apresentam-se, a seguir, as pesquisas realizadas com cada um dos penetrômetros citados.

Livneh (1989) apresentou uma expressão 2.11 que previa os valores de CBR através de ensaio de DCP. Essa expressão mostra a relação do CBR com o DCP que utiliza ponta de penetração com ângulo de 30°.

$$\log CBR = 2,20 - 0,71(\log DCP)^{1,5} \quad (2.11)$$

Onde: DCP – relação entre a profundidade de penetração, em milímetros, e o número de golpes requeridos para alcançar tal penetração;

CBR – índice de suporte Califórnia, dado em percentagem.

Harison (1987), para verificar a relação estabelecida entre o ensaio de CBR e o DCP, realizou estudos e os resultados indicaram que existe uma boa relação entre esses ensaios. O autor usou o DCP de ponta cônica com ângulo de 60° e 20mm de diâmetro e percebeu que esse pode penetrar até 800mm, dependendo do solo.

De acordo com Livneh (1989), estudos realizados por McElvaney *et alli*, em 1985, e por Harison, em 1987, resultaram numa relação entre o CBR com o DCP com ponta de 60°, que é apresentada na expressão 2.12.

$$\log CBR = 2,81 - 1,32(\log DCP) \quad (2.12)$$

Na tabela 2.5 são apresentadas as comparações dos CBR calculados para valores típicos de DCP. Percebe-se que os valores de CBR obtidos pelo DCP com ponta de 30° (expressão 2.11) são aproximadamente 15% maiores do que os encontrados utilizando o DCP com ponta de 60° (expressão 2.12); essa diferença ocorre, provavelmente, devido a diferença na forma das pontas cônicas desse tipo de penetrômetro.

TABELA 2.5 – Comparação dos valores de CBR estimados pelo valor do DCP utilizando as expressões 2.11 e 2.12 (Livneh, 1989).

DCP (mm/golpes)	CBR (%) calculados segundo	
	Expressão 2.11	Expressão 2.12
100	1,6	1,5
50	4,2	3,7
25	10,6	9,2
15	19,7	18,1
10	30,9	30,9
5	61,0	77,2
1	158,5	645,7

O teste SPT é freqüentemente usado na investigação geotécnica para construção de fundações, é um teste de fácil execução e bastante usado, principalmente, em casos onde a penetração do DCP é difícil, ou seja, quando a espessura das camadas do pavimento excede 800mm (espessura máxima que o DCP pode ser aplicado) (Livneh, 1989).

Livneh e Ishai apresentaram, em 1987, uma relação entre os valores de CBR e os valores de SPT. Posteriormente, eles mesmos aperfeiçoaram a relação que é dada pela expressão 2.13.

$$\log CBR = -5,13 + 6,55(\log SPT)^{-0,26} \quad (2.13)$$

Onde: SPT – relação entre a profundidade de penetração, em milímetros, e o número de golpes requeridos para alcançar tal penetração.

Na figura 2.11 estão apresentados os resultados dos ensaios de CBR *in-situ* e os obtidos pela expressão 2.13. Os valores de CBR calculados com os dados obtidos no ensaio de SPT são aproximadamente 15% maiores do que os valores obtidos diretamente em campo.

FIGURA 2.11 – Relação entre CBR calculado pelo ensaio de SPT e o ensaio de CBR *in-situ* (Livneh, 1989).

Segundo Livneh (1989), o ensaio de DPA é também usado “*in-situ*” para investigar a construção de fundações. A descrição desse ensaio foi apresentada por Bergdahl, em 1979. A expressão recomendada para fazer a transformação do valor de DPA para CBR foi apresentada por Livneh e Ishai em 1988, conforme apresentado na expressão 2.14.

$$\log CBR = 2,20 - 0,45[\log(3,47 * DPA)]^{1,5} \quad (2.14)$$

Onde: DPA – relação entre a profundidade de penetração, em milímetros, e o número de golpes requeridos para alcançar tal penetração.

Notou-se que os valores de CBR obtidos em campo são aproximadamente 20% menores que os calculados a partir do ensaio de DPA, utilizando a expressão 2.14.

Para testar a validade das relações citadas, Livneh, em 1989, primeiramente investigou uma pista de aterrissagem de aeronaves leves. Os resultados de CBR obtidos diretamente no campo, com uma sobrecarga de 409N, foram comparados com os resultados computados a partir dos vários ensaios de penetração usando as expressões 2.11, 2.13 e 2.14. Essa comparação pode ser vista na figura 2.12.

FIGURA 2.12 – Comparação dos valores de CBR calculados através os vários testes de penetração e os valores de CBR *in-situ* (Livneh, 1989).

Livneh (1989), a fim de examinar as dispersões existentes, realizou um teste estatístico *t* para determinar a identidade ou não dos resultados dos vários ensaios propostos. Os resultados desse teste *t* indicaram que é possível, nas condições em que os ensaios foram realizados, estabelecer um nível de confiança de 0,05 entre os ensaios, ou seja, os resultados do ensaio de CBR *in-situ* são idênticos aos resultados dos ensaios de DCP, SPT e DPA.

Depois Livneh (1989) estudou a validade das relações para pistas de aterrissagem de aeronaves pesadas. Na tabela 2.6 são apresentados os resultados dessa nova pesquisa.

TABELA 2.6 – Comparação dos resultados de CBR *in-situ* e os obtidos a partir de vários ensaios realizados em pistas de aterrissagem de aeronaves pesadas (Livneh, 1989).

Profundidade (m)	Valor	CBR <i>in-situ</i> (%)	CBR obtido pelos seguintes ensaios (%)			
			DPA	DCP (todas as leituras)	DCP 1ª leituras	DCP 2ª leituras
0	$\bar{x}$	6,14	8,86	6,80	6,80	-
	σ	4,05	4,17	3,45	3,45	-
	n	14	5	11	11	-
	c.v.	0,66	0,47	0,51	0,51	-
0,5	$\bar{x}$	12,10	10,50	16,50	14,90	17,37
	σ	4,82	2,76	5,46	4,29	6,02
	n	14	5	17	6	11
	c.v.	0,40	0,26	0,33	0,29	0,35
1,0	$\bar{x}$	11,02	10,32	13,01	12,96	13,05
	σ	2,11	2,61	3,06	3,75	2,73
	n	11	5	11	5	6
	c.v.	0,21	0,25	0,24	0,29	0,21
1,5	$\bar{x}$	8,39	10,92	11,06	7,88	14,24
	σ	3,62	3,96	7,90	3,23	10,23
	n	10	5	10	5	5
	c.v.	0,42	0,36	0,71	0,41	0,72

Onde: $\bar{x}$ – média dos resultados dos ensaios

σ - desvio padrão

n – número de amostras

c.v. – coeficiente de variação

A diferença significativa entre os valores foi examinada por um teste estatístico t , que permitiu extrair algumas conclusões. A primeira foi que os valores de DPA e os valores de DCP (todas as leituras e apenas a 2ª leitura), para uma profundidade de 0,5m são idênticos; outra conclusão foi que os valores de DCP (apenas na 1ª leitura) são idênticos; estatisticamente, aos valores de CBR, também a uma profundidade de 0,5m. Os resultados mostram que para comparar os valores de CBR obtidos de ensaios tradicionais e os obtidos dos ensaios de penetração em campo, é necessário que se faça mais de um ensaio de penetração para que se tenham resultados confiáveis (Livneh, 1989).

Por último, Livneh estudou as vias urbanas de média a alta intensidade de tráfego, correlacionando resultados dos ensaios de CBR de campo com os de DCP. Na figura 2.13 percebe-se a dispersão dos resultados; o autor acredita que isso ocorreu devido à considerável heterogeneidade do subleito.

FIGURA 2.13 – Comparação dos resultados de CBR *in-situ* e os calculados pelo ensaio de DCP realizado em vias urbanas (Livneh, 1989).

Dentre as várias conclusões apresentadas por Livneh (1989), no fim da pesquisa, destaca-se aquela que permite a utilização, com uma razoável confiança, das relações entre os valores de CBR obtidos a partir dos ensaios de DCP, SPT e DPA (expressões 2.11, 2.13 e 2.14) e os obtidos diretamente do ensaio executado no campo.

3. ENSAIO DE MINI-CBR

3.1 INTRODUÇÃO

Vallerga *et alli* (1969) apresentaram as características dos solos lateríticos usados nas construções rodoviárias da Tailândia e observaram que a performance desses solos é satisfatória como componentes da estrutura dos pavimentos, sendo que eles são utilizados, extensivamente, na construção de rodovias naquele país.

Segundo Nogami e Villibor (1995), a conscientização das peculiaridades dos solos tropicais como material de construção rodoviária tornou-se importante, no Brasil, no fim da década de 30, quando foi criada a Seção de Solos de Fundação no IPT/SP, que iniciou os primeiros trabalhos no campo rodoviário em convênio com o DER-SP. Entretanto, os resultados dos programas de estabilização de solos não foram muito satisfatórios, provavelmente pelo fato de usar procedimentos para estudos geotécnicos e de construção baseados na tecnologia norte-americana, pelas peculiaridades dos solos tropicais, pela falta de materiais granulares e pelo clima tropical.

Em 1963, foram apresentadas relações entre as massas específicas obtidas pelos métodos de compactação tipo proctor, padronizados pela AASHO T 180-57 e pela ASTM D 698-58T com o método de compactação desenvolvido pela *Iowa State University*, que utilizava equipamentos de dimensões reduzidas. O método, desenvolvido para auxiliar os estudos de estabilização de solos com aditivos e para o controle da massa específica no campo, utilizava equipamentos para compactação dos corpos de prova com 2'' de diâmetro e

aproximadamente 2'' de altura, requerendo apenas um décimo de material e um terço do tempo necessários para moldagem dos corpos de prova, em relação ao método estabelecido pela AASHO (O'Flaherty *et alli*, 1963).

No Brasil, em 1965, o Eng.º Carlos de Souza Pinto introduziu a sistemática de ensaios de solos com uso de corpos de prova de dimensões reduzidas, para estudo de sua estabilização com aditivos. Em 1972, Nogami estendeu o uso desses ensaios para determinação da capacidade de suporte com o ensaio em escala reduzida (corpos de prova de 5cm de diâmetro, pistão de penetração de 16mm de diâmetro), que ele designou de mini-CBR. Esse ensaio foi baseado no procedimento desenvolvido pela *Iowa State University* (Lafleur *et alii*, 1960¹ *apud* Nogami e Villibor, 1995), que emprega equipamentos de dimensões reduzidas e foi adaptado para melhor atender às peculiaridades dos solos tropicais, visando gerar alternativas aos ensaios de proctor e CBR geralmente adotados no nosso país (Nogami e Villibor, 1981 e 1988). Ainda em 1972, Nogami desenvolveu uma sistemática de ensaios mais abrangente, que compreendia as determinações da permeabilidade, da penetração d'água, da contração e da penetração de imprimadura betuminosa (Nogami e Villibor, 1993).

A possibilidade de tornar esta sistemática mais abrangente, surgiu com aplicação do ensaio de MCV (*Moisture Condition Value*), que foi desenvolvido por Parsons, do *Transport and Road Research Laboratory* da Grã Bretanha, em 1976. Os resultados desse ensaio permitiram estabelecer uma classificação de solos mais eficiente que as que utilizavam processos tradicionais (Nogami e Villibor, 1982).

Nogami e Villibor , em 1981, preocupados em aproveitar melhor os recursos naturais disponíveis no Brasil, desenvolveram o sistema MCT (de Miniatura, Compacto e Tropical) de classificação de solos tropicais. Esta classificação leva em consideração os comportamentos dos solos, quando compactados, em lateríticos e não lateríticos (Nogami e Villibor, 1995).

Em 1985, Nogami e Villibor propuseram uma adaptação do ensaio de MCV, para o estudo de solos tropicais, com utilização de corpos de prova de dimensões reduzidas. Esse ensaio,

¹Lafleur, J. D. , Davidson, D. T. , Katti, R. T. , Gurland, J. (1960) Relationship Between the California Bearing Ratio and Iowa Bearing Value, in *Methods for Testing Engineering Soils. Iowa State University*. Ames, Iowa

denominado mini-MCV, seria realizado com equipamento de compactação e cilindro do ensaio de mini-CBR (Santana, 1998).

Cozzolino e Nogami (1993) constataram que apesar da metodologia MCT ser bastante eficaz na identificação das diferenças entre os diversos tipos de solos tropicais e ser capaz de prever suas qualidades com precisão, o seu uso fora do âmbito das pesquisas e projetos relacionados com obras viárias e a pavimentação tem sido muito reduzido. Para essas finalidades, o fornecimento de dados utilizáveis diretamente para o projeto, e mesmo para o controle tecnológico na fase executiva, tais como a capacidade de suporte mini-CBR, a expansão sob condições padronizadas, o coeficiente c' , a perda de massa por imersão etc, é mais importante do que a classificação MCT. Acredita-se que isto acontece devido a aparente complexidade e ineditismo do procedimento utilizado para classificação dos solos.

De acordo com Nogami e Villibor (1995), é possível obter várias propriedades dos solos a partir da classificação MCT, dentre elas destaca-se o valor de mini-CBR. Na tabela 3.1 encontram-se os dados qualitativos sobre as propriedades consideradas mais significativas dos grupos MCT e na tabela 3.2 têm-se as faixa de variação dos valores dessas propriedades. Os autores organizaram essa tabela para orientar a utilização rodoviária dos solos da classificação MCT.

TABELA 3.1 – Dados qualitativos das propriedades mecânicas e hidráulicas da classificação MCT, segundo Nogami e Villibor (1995).

GRANULOMETRIAS TÍPICAS			Argilas, siltes(q,s)	Areias siltosas	Siltes(k,m)	Siltes arenosos	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos	Areias siltosas	Areias argilosas	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos
Designações do T1-71 do DER-SP										
k=caolinitico m=micáceo s=sericítico q=quartzoso										
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico					L = Laterítico		
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'		LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR	Sem imersão	M, E	E	M, E	E		E	E, EE	E
		Perda por imersão	B, M	B	E	E		B	B	B
	EXPANSÃO		B	B	E	M, E		B	B	B
	CONTRAÇÃO		B	B, M	M	M, E		B	B, M	M, E
	COEF. DE PERMEABILIDADE(k)		M, E	B	B, M	B, M		B, M	B	B
	COEF. DE SORÇÃO (s)		E	B, M	E	M, E		B	B	B
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = Muito elevado M = médio E = Elevado B = Baixo					Vide Tabela 3.2 para equivalente numérico		
Utilização	Base de pavimento		n	4º	n	n		2º	1º	3º
	Ref. do subleito compactado		4º	5º	n	n		2º	1º	3º
	Subleito compactado		4º	5º	7º	6º		2º	1º	3º
	Aterro compactado		4º	5º	6º	7º		2º	1º	3º
	Proteção à erosão		n	3º	n	n		n	2º	1º
	Revestimento primário		5º	3º	n	n		4º	1º	2º
			n = não recomendado							
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas		USCS	SP SM	MS SC ML	SM CL ML MH	MH CH		SP SC	SC	MH ML CH
		AASHTO	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5 A-7-5		A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

TABELA 3.2 – Faixas de variação dos valores das propriedades mecânicas e hidráulicas da classificação MCT (Nogami e Villibor, 1995).

Suporte mini-CBR (%), com sobrecarga padrão	Muito elevado	> 30
	Elevado	12 a 30
	Médio	4 a 12
	Baixo	< 4
Expansão (%)	Elevada	> 3
	Média	0,5 a 3
	Baixa	< 0,5
Coeficiente de sorção – s Log (cm/ $\sqrt{\text{min}}$)	Elevado	> (-1)
	Médio	(-1) a (-2)
	Baixo	< (-2)
Perda de suporte mini-CBR por imersão (%)	Elevada	> 70
	Média	40 a 70
	Baixa	< 40
Contração (%)	Elevada	> 3
	Média	0,5 a 3
	Baixa	< 0,5
Coeficiente de Permeabilidade – k Log (cm/s)	Elevado	> (-3)
	Médio	(-3) a (-6)
	Baixo	< (-6)

3.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE MINI-CBR

A seguir, apresentam-se, resumidamente, as etapas que devem ser seguidas para realizar o ensaio de mini-CBR, segundo o método do DER – SP M 192-88:

- a) Preparação da amostra: o solo é colocado ao ar, em bandejas, para secagem, até que atinja um teor de umidade que se aproxime da umidade higroscópica; depois deve ser destorroado e homogeneizado. Separam-se 3,0kg de material; em seguida faz-se o quartearmento, dividindo em seis porções de 500g de solo, que deverão ser convenientemente umedecidas e ensacadas para evitar a perda de umidade. Os ensaios de mini-CBR só podem ser executados para solos que possuam, no máximo, 5% de material retido na peneira de 2,0mm de diâmetro.

- b) Compactação dos corpos de prova: os corpos de prova devem ser compactados em cilindros vaselinados de 50mm diâmetro, com soquete de seção plena (o golpe cobre integralmente toda a área do topo do corpo de prova) e massa variável, dependendo da energia de compactação.

Adapta-se o cilindro à base de compactação; intercalando o espaçador entre eles; coloca-se a porção de solo e dá-se um golpe com soquete de 2,27kg a uma altura de queda de 30,5cm; em seguida retira-se o espaçador e dão-se mais quatro golpes, vira-se o corpo de prova, e dão-se mais 5 golpes, no caso da moldagem na energia normal. Para moldagem na energia intermediária, aplicam-se 6 golpes de soquete com 4,54kg (30,5 cm de altura de queda) por face do corpo de prova. Os corpos de prova devem ter 50mm de altura, com variação admissível de ± 1 mm. Na figura 3.1 apresenta-se o equipamento de compactação com o cilindro e dispositivo de medida de altura dos corpos de prova.

FIGURA 3.1 – Equipamento utilizado para compactação dos corpos de prova de mini-CBR.

Após a compactação, os corpos de prova podem ser submetidos à determinação do mini-CBR na unidade de moldagem (penetração imediatamente após a compactação) ou após 24h de imersão em água. Para os ensaios com 24h de imersão, utiliza-se sobrecarga de 0,454kg, medindo-se, durante o período de imersão, a expansão (figura 3.2).

FIGURA 3.2 – Ilustração da montagem para medição da expansão do solo no cilindro de mini-CBR.

- c) Determinação do mini-CBR: utiliza-se um pistão para penetração com 16mm de diâmetro, à velocidade de 1,27mm/min e sobrecarga de 0,454kg, determinando-se as cargas para penetrações de 0,5 em 0,5mm, até 5,0mm. No processo de determinação do mini-CBR, à semelhança com o procedimento utilizado no ensaio de CBR, determinam-se, através das duas relações (para 2,0 e 2,5mm de penetração), os valores do mini-CBR, e utiliza-se o maior dos dois.

Segundo Cozzolino e Nogami (1993), o ensaio de mini-CBR permite alterar algumas das variáveis que influenciam o valor da capacidade de suporte. Isto possibilita a determinação

da capacidade de suporte, com e sem imersão em água, com vários tipos de sobrecarga, com diferentes teores de umidade e energias de compactação etc., tornando possível uma melhor caracterização das peculiaridades dos solos tropicais.

3.3 ENSAIO DE MINI-CBR: VANTAGENS, DESVANTAGENS E ALGUMAS PESQUISAS REALIZADAS

De acordo com Nogami e Villibor (1994), podem-se citar algumas vantagens e desvantagens do ensaio de mini-CBR. Dentre as vantagens, tem-se a possibilidade de atribuir aos solos tropicais qualidades correspondentes ao seu desempenho real, possibilitando uma melhor hierarquização para uso em pavimentação; a utilização de uma menor quantidade de material para realização dos ensaios; menor esforço físico e facilidade de execução devido às pequenas dimensões dos corpos de prova e ao número reduzido de golpes; custos menores e rapidez na obtenção dos resultados por ter tempo de imersão reduzido para 24 horas. Algumas desvantagens do ensaio são as dificuldades laboratoriais no uso do procedimento de compactação mini-Proctor, que requer quantidades diferentes de massa úmida para cada teor de umidade, que não podem ser prefixadas, e a necessidade de aquisição de aparelhagem especial.

Algumas pesquisas que foram realizadas utilizando o ensaio de mini-CBR serão apresentadas a seguir, a fim de se ter uma idéia da importância do ensaio para caracterização dos solos tropicais.

3.3.1 Classificação Resiliente e Ensaio de mini-CBR

No Brasil, a partir de 1972, desenvolveu-se na COPPE/UFRJ um forte interesse pelo estudo da deformabilidade dos pavimentos; com o apoio do IPR/DNER, a partir de 1977, fez-se a montagem do equipamento a ar comprimido do ensaio de compressão triaxial de amostras de solo de 5cm de diâmetro e 10cm de altura, dando início às pesquisas de resiliência. Em 1981 foi publicada a classificação resiliente, a partir de estudos de Mecânica dos Pavimentos iniciados por Pinto e Preussler, na mesma universidade, sob a orientação de Medina (Medina, 1988).

Em 1990, o DNER publicou um relatório final de pesquisa realizada pela equipe técnica do Metrô-SP sobre solos tropicais que, no intuito de reavaliar a classificação resiliente, analisou o módulo de resiliência (M_R), obtido em laboratório, à luz de várias classificações de solos. Dentre esses destaca-se a análise feita para verificar a relação entre a classificação resiliente e a classificação MCT.

De acordo com as relações desenvolvidas por Medina *et alii*, 1981² *apud* DNER (1990), a seguir apresentadas, é possível preverem-se os módulos de resiliência em função da tensão desvio dos solos $M_R = f(\sigma_d)$, que limitam o comportamento dos solos classificados como tipo I, II ou III. O comportamento dos solos pode ser representado por vários modelos, desta forma, têm-se os seguintes valores:

$$K_1 = 0,7 \text{ a } 1,1$$

$$K_2 = 326 + 67*(CBR) - K_4*(2 - K_1)$$

$$K_3 = 2282*(CBR) - 7559$$

$$K_4 = 2000 \text{ a } 3000$$

Onde: K_1 , K_2 , K_3 e K_4 - parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais com carregamento repetido sob tensões-desvio σ_d ;

CBR - índice de suporte Califórnia $\geq 10\%$ (mínimo valor para solo tipo I)

Na figura 3.3, a linha B representa o modelo de comportamento dos solos para: $K_1 = 0,8$ e $K_4 = -2000$, resultando em $K_2 = 3396$ e $K_3 = 15260$.

Este modelo mostra compatibilidade com o limite estabelecido com base nos resultados experimentais dos ensaios realizados no laboratório do ITA e no IPR.

² Medina, J., Pinto, S., Preussler, E. S. (1981) Resiliência de Solos Tropicais e sua Aplicação à Mecânica dos Pavimentos, in Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Anais, ABMS, pp. 591-614, Rio de Janeiro, RJ.

TABELA 3.3 – Classificação MCT x classificação resiliente e o comportamento dos solos quanto ao grau de resiliência (DNER, 1990).

MCT	RESILIENTE	COMPORTAMENTO
NA	III	Grau de resiliência alto
LA	III	Grau de resiliência alto
LA'	II – I	Grau de resiliência médio a baixo
LG'	I – II	Grau de resiliência baixo
NA'	II – III	Grau de resiliência médio a alto
NG'	II – I	Grau de resiliência médio a baixo
NS'	II - III	Grau de resiliência médio a alto

O módulo de resiliência dos solos estudados pela equipe técnica do Metrô-SP, 355 amostras no total, foram colocados no ábaco da classificação MCT. Verifica-se, na figura 3.4, que não há qualquer associação entre os valores de M_R e a classificação MCT, exceto a tendência para concentração dos valores mais elevados de M_R no grupo LG' para $c' > 2,2$ (DNER, 1990).

FIGURA 3.4 – Distribuição dos valores de M_R (kgf/cm²) na classificação MCT, segundo o DNER (1990).

A equipe técnica do Metrô-SP, distribuindo os tipos de solos no ábaco da classificação MCT, observou que:

- a) os solos do tipo I (bom comportamento quanto à resiliência) concentraram-se no grupo LG', com $c' > 2,2$;
- b) os solos do tipo II (comportamento regular quanto à resiliência) distribuem-se por todos os grupos, com exceção de LA e NA; e
- c) os solos do tipo III (comportamento ruim quanto à resiliência) localizaram-se nos grupos LG' e NG'.

Nessa pesquisa realizada pelo DNER (1990) concluiu-se que não há uma relação clara e simples entre as classificações resiliente e MCT, o que pode indicar serem estes sistemas complementares.

3.3.2 Algumas Peculiaridades Resilientes de Solos Lateríticos e Saprolíticos

Em 1990, Franzoi fez uma abordagem sobre o comportamento resiliente de solos lateríticos e saprolíticos com o objetivo de apresentar algumas peculiaridades resilientes dos solos tropicais e eventuais relações com propriedades obtidas a partir do uso da metodologia MCT, tendo em vista a importância das propriedades resilientes dos solos na solução de problemas relacionados à pavimentação.

Franzoi (1990), realizou ensaios triaxiais de carga repetida, no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP, e ensaios de mini-CBR com e sem imersão. Para a realização desses ensaios foram utilizadas seis amostras de solos de comportamento laterítico e quatro de comportamento não laterítico; para cada amostra de solo, foram moldados de 3 a 4 corpos de prova, variando o teor de umidade.

Segundo Motta *et alii*, 1985³ *apud* Franzoi (1990), é necessário dividir o comportamento resiliente dos solos em dois outros comportamentos, além dos conhecidos (granular e fino), que seriam:

³ Motta, L. M. G., Aranovich, L. A. S., Ceratti, J. A. P. (1985) Comportamento Resiliente de Solos Utilizados em Pavimentos de Baixo Custo, in Solos e Rochas, Vol. 8, nº 3, pp. 15-42, Rio de Janeiro, RJ.

- a) Comportamento combinado, em que o módulo de resiliência depende simultaneamente da pressão confinante (σ_3) e da tensão-desvio (σ_d);
- b) Comportamento constante, em que o módulo de resiliência independe do estado de tensões.

Os resultados confirmaram o elevado valor do módulo de resiliência dos solos de comportamento laterítico quando compactado nas condições de umidade ótima e massa específica seca máxima, geralmente adotadas nas obras rodoviárias e de pavimentação, independente de suas peculiaridades granulométricas.

Franzoi, na figura 3.5, mostra os resultados da relação para o módulo de resiliência, determinado para o par de tensões: tensão confinante (σ_3) igual a 0,2kgf/cm² e tensão desvio (σ_d) igual a 0,3kgf/cm², e os valores de suporte expressos em termos de mini-CBR sem imersão. Segundo a autora, este tipo de relação seria mais coerente, uma vez que, ambos os ensaios de MR e de mini-CBR, foram determinados em condições não imersas. Da análise dessa figura a autora pode tirar algumas conclusões, que foram:

- a) Localização, predominante, dos solos lateríticos acima da linha de relação de Heukelom and Foster (expressão 3.1), utilizada internacionalmente para valores de CBR baixos, enquanto que os solos saprolíticos localizaram-se abaixo dessa linha de relação;
- b) Elevados módulos de resiliência para solos lateríticos, confirmando o excelente desempenho que esses têm tido como subleito, sub-base e mesmo base de pavimentos;
- c) Tendência de relação retilínea para vários solos, com inclinação predominantemente menor que a relação de Heukelom and Foster (expressão 3.1), concordando, em parte, com a validade dessa relação, apenas para baixos valores de suporte.

$$M_R = 100 * CBR \quad (3.1)$$

FIGURA 3.5 – Variação do módulo de resiliência em função do mini-CBR para alguns solos (FRANZOI, 1990).

3.3.3 Determinação de mini-CBR com Penetrômetro Dinâmico Leve PDL

Nogueira e Röhm (1993) demonstram interessante na utilização de penetrômetros dinâmicos leves (PDL), como uma alternativa de baixo custo, segura e rápida para medir propriedades de engenharia (teores de umidade e massas específicas secas dos solos) *in situ*, por serem portáteis e apresentarem características fundamentais a um instrumento de medidas (fidelidade, sensibilidade e seletividade).

Para mostrar o potencial dos penetrômetros dinâmicos leves no controle e avaliação de camadas de pavimentos com solos arenosos finos, os autores apresentam uma relação entre os resultados de ensaios de penetração dinâmica e os resultados de ensaios de mini-CBR.

O PDL é um equipamento que consegue penetrar nas camadas compactadas de alta resistência com facilidade, tornando-se, portanto, uma alternativa potencial para controlar a construção das camadas de pavimento de solo arenoso fino, desde que seja realizado um estudo comparativo de campo e padronize-se o momento mais adequado para efetuar o

ensaio de penetração *in situ*. Serve também para avaliar as condições das camadas de um pavimento, pois pode alcançar até o subleito. Com a análise das medidas efetuadas pode-se concluir qual é a camada que, eventualmente, está comprometendo o bom desempenho do pavimento.

A metodologia utilizada para relacionar os dois ensaios constituiu-se da compactação de quatro amostras de solos arenosos finos lateríticos nas energias de compactação normal e modificada, conforme o método da ABNT (MB-33/77) e do DER-SP (M13-71). Foram compactados cinco corpos de prova com diferentes teores de umidade, para cada amostra e em seguida realizou a determinação de três mini-CBR e uma penetração dinâmica com PDL, ambos sem imersão, para se reproduzir a situação de campo.

O valor de mini-CBR adotado foi a média das três determinações e o parâmetro de penetração por golpe, obtido no ensaio de penetração dinâmica, foi definido como o valor médio das penetrações ao longo do corpo de prova, desprezando-se os primeiros golpes. Dessa forma foram obtidos quarenta pares de valores, com os quais estabeleceram a equação de regressão 3.2, que relaciona ambas as variáveis a um nível de significância de 5%, com um coeficiente de determinação igual a 0,67, mostrada na figura 3.6.

$$\log MCBR = 2,4386(\pm 0,0029) - 0,9733(\pm 0,0029) \log PG \quad (3.2)$$

Onde: MCBR – valor do mini-CBR obtido a partir do PCL (%);

PG – penetração por golpe, em milímetros por golpe, com uma casa decimal.

Foram desprezados os pontos que se afastavam do teor de umidade ótimo, para tentar melhorar o coeficiente de determinação de 0,67. Dessa forma, determinaram uma nova relação, agora baseada em vinte e seis pontos, com um nível de significância de 5%, representada pela equação de regressão 3.3, com um coeficiente de determinação igual a 0,89, também mostrada na figura 3.6.

$$\log MCBR = 2,6060(\pm 0,0302) - 1,1136(\pm 0,0280) \log PG \quad (3.3)$$

Na figura 3.6 são apresentadas as equações de regressão 3.2 e 3.3. Percebe-se que quando o coeficiente de determinação se aproxima da unidade (equação de regressão 3.2), a relação, para as condições reinantes durante os ensaios, é boa.

FIGURA 3.6 – Representação gráfica das equações de regressão (3.2) e (3.3), que relacionam os valores de penetração do PDL e os valores de mini-CBR, segundo Nogueira e Röhm (1993).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as amostras utilizadas no trabalho, assim como os métodos de ensaio empregados para seu estudo. As amostras são parte das utilizadas por Rodgher (2002), que as coletou em função da área de ocorrência pedológica das classes de solo no município de São Carlos e executou os ensaios de caracterização e classificação MCT.

4.2 SOLOS UTILIZADOS

Foram utilizadas 62 amostras de solos coletadas no município de São Carlos. O número de amostras coletadas foi determinado proporcionalmente às áreas de ocorrência pedológica das principais classes de solo (Rodgher e Fabbri, 1998), em relação à área total do município. As classes MCT das amostras foram obtidas por Rodgher (2002), através da execução de ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão.

As principais classes pedológicas de solos do município de São Carlos, segundo Prado *et alii* (1981), o número de solos de cada classe que foram utilizados neste trabalho e as respectivas classificações MCT encontradas por Rodgher (2002) estão apresentadas na tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Distribuição das amostras de solos de acordo a ocorrência das classes pedológicas no município de São Carlos e as respectivas classes MCT encontradas por Rodgher (2002).

Classe Pedológica	Classificação MCT							Total
	LA	LA'	LG'	NA	NA'	NG'	NS'	
Latossolo Vermelho-Amarelo	01	14	09	-	02	01	-	27
Areia Quartzosa	01	01	-	04	02	-	-	08
Latossolo Roxo	-	01	10	-	01	-	-	12
Latossolo Vermelho-Escuro	-	02	04	-	01	-	-	07
Litólico	-	-	-	-	-	-	03	03
Podzólico Vermelho-Amarelo	-	-	01	-	-	01	01	03
Terra Roxa Estruturada	-	-	02	-	-	-	-	02
Total	02	18	26	04	06	02	04	62

Distribuindo-se a quantidade das amostras na carta da MCT (figura 4.1), percebe-se claramente a diversificação dessas e a ocorrência predominante dos solos LA' e LG'.

FIGURA 4.1 - Distribuição das amostras de solos utilizadas na carta da classificação MCT.

Os locais no município de São Carlos, onde as amostras estudadas foram coletadas estão relacionados no anexo A.

4.3 ENSAIOS DE MINI-CBR

Rodgher (2002) executou os ensaios de mini-CBR nas energias normal e intermediária, segundo o método de ensaio do DER-SP M 192-88, o procedimento para execução desde ensaio está descrito detalhadamente no capítulo 3. Para cada energia foram moldados, no mínimo, cinco corpos de prova e determinados: umidade ótima, massa específica seca máxima, valores de mini-CBR imediato e após 24h de imersão, contração e expansão. No presente trabalho são utilizados os resultados de mini-CBR imediato e após 24h de imersão, os valores das cargas dos mini-CBR para penetrações de 2,0 e 2,5mm, para as umidade ótima e de moldagem do ensaio de CBR, as expansões, as umidades ótimas e as massas específicas secas máximas.

4.4 ENSAIOS DE CBR

A capacidade de suporte foi determinada através de ensaios CBR, realizados de acordo com o procedimento descrito pelo método de ensaio do DNER-ME 50-64 (detalhado no capítulo 2). Os corpos de prova foram moldados nas condições de umidade ótima e da massa específica seca máxima das energias normal e intermediária, obtidas dos ensaios de mini-CBR. Foi utilizado esse procedimento uma vez que, segundo Vilar e Röhm (1994), os valores de massa específica seca máxima e umidades ótimas obtidas do ensaio de compactação normal são apenas 1,7% menores que os valores obtidos no ensaio de mini-CBR, o que justifica a possível utilização dos resultados do ensaio de mini-CBR para realização dos ensaios de CBR.

Foram moldados 124 corpos de prova no ensaio de CBR, sendo 62 na energia normal e 62 na energia intermediária. Na compactação foram tolerados desvios de até 0,5% dos teores de umidades de moldagem dos ensaios de CBR em relação às umidades ótimas obtidas dos ensaios de mini-CBR e pretendia-se admitir desvios de 1,5% no grau de compactação, mas durante a moldagem dos corpos de prova percebeu-se que, para os solos NA', NG' e NS', todos na energia intermediária, isso não seria possível, por isso foram admitidos desvios maiores, o que será discutindo posteriormente no capítulo de apresentação e discussão dos resultados.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Os resultados dos ensaios de mini-CBR e de CBR, realizados para as energias de compactação normal e intermediária, estão apresentados neste capítulo. Com estes resultados, foram realizados os seguintes confrontos:

- a) Umidade ótima do ensaio de mini-CBR versus umidade de moldagem do ensaio de CBR;
- b) Massa específica seca máxima do ensaio de mini-CBR versus massa específica de moldagem do ensaio de CBR;
- c) Valores de mini-CBR imediato versus CBR;
- d) Valores de mini CBR após 24h de imersão versus CBR;
- e) Valores de carga de mini-CBR após 24h de imersão versus carga de CBR nas umidades de moldagem e ótima;
- f) Valores de carga de mini-CBR após 24h de imersão versus valor de CBR nas umidades de moldagem e ótima;
- g) Distribuição dos valores de CBR no ábaco da classificação MCT;
- h) Expansão do ensaio de CBR versus expansão do ensaio de mini-CBR.

Para averiguar possíveis influências das classes dos solos nessas relações, elas estão codificadas segundo a classificação MCT. As comparações têm o objetivo de rever as relações existentes entre os resultados dos ensaios de mini-CBR e CBR, para um número grande de amostras de solos do município de São Carlos, Estado de São Paulo.

Os ensaios de CBR realizados consistiram da compactação de 62 amostras de solos, nas energias normal e intermediária, distribuídos segundo sua classe MCT, da seguinte forma: 02 amostras de LA, 18 amostras de LA', 26 amostras de LG', 04 amostras de NA, 06 amostras de NA', 02 amostras de NG' e 04 amostras de NS'. A seguir, são apresentados os resultados dos confrontos.

5.2 UMIDADE ÓTIMA DO ENSAIO DE MINI-CBR VERSUS UMIDADE DE MOLDAGEM DO ENSAIO DE CBR

Nas figuras 5.1 e 5.2 são apresentadas as umidades ótimas do ensaio mini-CBR versus as umidades de moldagem obtidas nos ensaios de CBR, para as energias normal e intermediária, respectivamente, com os pontos codificados segundo as classes da MCT.

FIGURA 5.1 – Umidade ótima dos ensaios de mini-CBR x umidade de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia normal, segundo classe MCT.

FIGURA 5.2 – Umidade ótima dos ensaios de mini-CBR x umidade de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia intermediária, segundo classe MCT.

Comparando-se os resultados, com o auxílio de linhas de igualdade, pode-se observar que os teores de umidade obtidos foram muito próximos dos pretendidos, independentemente da classe de solo ensaiada.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam, para as classes MCT dos solos ensaiados, os teores de umidades ótimas médios dos ensaios de mini-CBR (pretendidos), os teores de umidade de moldagem médios dos ensaios de CBR (obtidos) e os desvios absolutos médios entre os teores de umidade ótimas dos ensaios de mini-CBR e da umidade de moldagem dos ensaios de CBR, para as energias normal e intermediária, respectivamente.

TABELA 5.1 – Teores de umidade médios pretendidos (mini-CBR) e obtidos (CBR) e desvios absolutos médios dos teores das umidades, segundo as classes MCT, para a energia normal.

Classe MCT	Teores de umidade ótima médios – mini-CBR (%)	Teores de umidade de moldagem médios – CBR (%)	Desvios absolutos médios entre os teores das umidades (%)
LA	8,78	8,46	0,32
LA'	13,35	13,07	0,28
LG'	20,40	20,23	0,17
NA	7,80	7,82	0,02
NA'	14,06	13,85	0,21
NG'	18,18	17,9	0,28
NS'	9,94	9,86	0,08

TABELA 5.2 – Teores de umidade médios pretendidos (mini-CBR) e obtidos (CBR) e desvios absolutos médios dos teores das umidades, segundo as classes MCT, para a energia intermediária.

Classe MCT	Teores de umidade ótima médios – mini-CBR (%)	Teores de umidade de moldagem médios – CBR (%)	Desvios absolutos médios entre os teores das umidades (%)
LA	7,64	7,20	0,44
LA'	11,42	11,28	0,14
LG'	18,23	18,09	0,14
NA	5,64	5,57	0,07
NA'	11,67	11,55	0,12
NG'	15,73	15,68	0,05
NS'	7,92	7,94	0,02

5.3 MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA DO ENSAIO DE MINI-CBR VERSUS MASSA ESPECÍFICA SECA DE MOLDAGEM DO ENSAIO DE CBR

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, as massas específicas secas máximas, dos ensaios de mini-CBR, e de moldagem, dos ensaios de CBR, com os pontos codificados segundo as classes MCT dos solos, para as energias normal e intermediária.

Observando-se os resultados das massas específicas pretendidas e obtidas dos ensaios de mini-CBR e CBR, nota-se que a dispersão dos resultados é um pouco maior, em torno da linha de igualdade, do que o dos teores das umidades, mas também não chega a ser expressivo. Isso demonstra que é possível, para as energias de compactação utilizadas, reproduzir os resultados de massa específica seca dos ensaios de mini-CBR com ensaios tipo CBR e vice-versa.

FIGURA 5.3 – Massa específica seca máxima dos ensaios de mini-CBR x massa específica seca de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia normal.

FIGURA 5.4 – Massa específica seca máxima dos ensaios de mini-CBR x massa específica seca de moldagem dos ensaios de CBR, para a energia intermediária.

Nas tabelas 5.3 e 5.4, são apresentadas, para as classes MCT dos solos, as médias dos desvios dos graus de compactação e das massas específicas secas máximas, dos ensaios de mini-CBR, e de moldagem dos ensaios de CBR, nas energias normal e intermediária, respectivamente.

TABELA 5.3 - Desvios dos graus de compactação médios e valores médios das massas específicas secas máximas e de moldagem segundo a classe MCT, para energia normal.

Classe MCT	Massas específicas secas máximas médias(%)	Massas específicas secas de moldagem médias (%)	Desvios dos graus de compactação médios (%)
LA	1,922	1,946	1,30
LA'	1,862	1,836	1,39
LG'	1,702	1,683	1,11
NA	1,845	1,856	0,58
NA'	1,824	1,809	0,81
NG'	1,677	1,663	0,83
NS'	1,684	1,682	0,13

TABELA 5.4 - Desvios dos graus de compactação médios e valores médios das massas específicas secas máximas e de moldagem segundo a classe MCT, para energia intermediária.

Classe MCT	Massas específicas secas máximas médias(%)	Massas específicas secas de moldagem médias (%)	Desvios dos graus de compactação médios (%)
LA	1,988	1,984	0,23
LA'	1,957	1,928	1,50
LG'	1,793	1,774	1,09
NA	1,939	1,916	1,17
NA'	1,950	1,907	2,20
NG'	1,862	1,828	1,88
NS'	1,771	1,730	2,32

5.4 VALORES DE MINI-CBR IMEDIATO VERSUS VALORES DE CBR

Nas figuras 5.5 e 5.6, são apresentados os valores de mini-CBR imediato (sem imersão), obtidos na umidade ótima, versus os valores de CBR, com os pontos codificados segundo a classe MCT dos solos, para as energias normal e intermediária, respectivamente.

Observando-se essas duas figuras, nota-se que há grande diferença entre os valores de mini-CBR e CBR (ver linha de igualdade) e que também não há uma relação clara entre esses dois índices, independentemente da classe MCT dos solos considerada. Percebe-se também que os valores de CBR são, para a maioria das amostras, maiores que os valores de mini-CBR imediato, para as duas energias.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam os mesmos resultados apresentados nas figuras 5.5 e 5.6, porém com as amostras codificadas segundo suas classes pedológicas. Nelas nota-se também, que não há relação clara entre os valores de mini-CBR imediato e os valores de CBR, independentemente da classe pedológica e da energia de compactação considerada.

FIGURA 5.5 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe MCT.

FIGURA 5.6 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe MCT.

FIGURA 5.7 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe pedológica.

FIGURA 5.8 – Valores de mini-CBR imediato x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe pedológica.

As figuras 5.9 e 5.10, apresentam, respectivamente, os valores de mini-CBR imediato médios para as classes da MCT, para as energias normal e intermediária.

FIGURA 5.9 – Variação dos valores de mini-CBR imediato, para a energia normal.

FIGURA 5.10 – Variação dos valores de mini-CBR imediato, para a energia intermediária.

Observando-se as figuras 5.9 e 5.10, nota-se que, para a energia normal, os valores médios dos mini-CBR imediatos são semelhantes para todas as classes da MCT, com valores um pouco maiores para os solos da classe LA (22%) e os menores para os da classe NS' (10%), estando as demais classes compreendidas nesse intervalo. Já para a energia de compactação intermediária, nota-se uma diferenciação maior entre os valores médios dos mini-CBR imediatos, sendo os solos NG' os que apresentaram maiores valores médios (52%), seguidos pelos LA', NA' e LG' (37, 36 e 30%, respectivamente), depois pelos LA, NS' e NA (29, 24 e 21%, respectivamente).

Para melhor visualização, as figuras 5.11 e 5.12 apresentam, respectivamente, os valores de mini-CBR imediato, para as classes da MCT, nas energias normal e intermediária.

FIGURA 5.11 – Distribuição dos valores de mini-CBR imediato, para a energia normal.

FIGURA 5.12 – Distribuição dos valores de mini-CBR imediato, para a energia intermediária.

Ainda com intenção de explorar melhor os resultados desses ensaios, foram elaboradas as figuras 5.13 e 5.14 que apresentam, respectivamente, os valores médios das relações CBR/mini-CBR imediato em função das classes da MCT dos solos, para as energias de compactação normal e intermediária.

FIGURA 5.13 – Relações CBR/mini-CBR imediato, para a energia normal.

FIGURA 5.14 – Relações CBR/mini-CBR imediato, para a energia intermediária.

Observando-se as duas figuras anteriores, nota-se que para as duas energias, as relações CBR/mini-CBR imediato têm valores desde menores que 1,0 para a classe dos NG' na energia intermediária, ou seja o valor do mini-CBR é maior que o do CBR correspondente, até valores maiores ou iguais a 2,0, para as classes dos NA e LA, em ambas as energias. É interessante perceber também que há uma certa proximidade dos valores das relações para mesmas classes MCT, independente da energia de compactação, a menos da classe NG' que apresentou essa relação igual a 1,34 para a energia normal e igual a 0,69 para a intermediária. Vale, nesse caso, ressaltar que só foram ensaiados dois solos da classe dos NG', o que pode, de alguma forma, ter comprometido a representatividade dos resultados.

5.5 VALORES DE MINI-CBR APÓS 24h DE IMERSÃO VERSUS VALORES DE CBR

Nas figuras 5.15 e 5.16 são apresentados os valores de mini-CBR imersos (24h de imersão), obtidos na umidade ótima, versus os valores de CBR, para as energias normal e intermediária, respectivamente, com os pontos codificados segundo suas classes MCT.

Observa-se nessas figuras que, para as duas energias de compactação, praticamente todos os valores de CBR são maiores ou iguais aos mini-CBR imersos (uma exceção na energia normal e duas na energia intermediária). Nota-se que não há relação clara entre os valores de CBR e mini-CBR imersos, pois pode-se encontrar, a título de exemplo, mini-CBR iguais a 10% que correspondem a valores de CBR entre 10 e 46% na energia normal. Percebe-se também que não há tendência de relações entre o CBR e o mini-CBR imerso, mesmo considerando-se, isoladamente, solos de mesma classe MCT.

De uma certa forma, esses resultados são surpreendentes pois, mesmo que as relações originais entre CBR e mini-CBR não fossem adequadas para o universo de solos estudados, imaginava-se que seriam encontradas outras relações e não um comportamento tão imprevisível, indicando a possível não existência de uma relação entre esses dois índices.

FIGURA 5.15 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe MCT.

FIGURA 5.16 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe MCT.

Com intenção de verificar se existe alguma relação entre os valores de CBR e mini-CBR imerso em função das classes pedológicas a que os solos pertencem, foram elaboradas as

figuras 5.17 e 5.18, que apresentam, essencialmente, os dados das duas figuras anteriores, só que agora com os pontos codificados dessa outra forma.

Nota-se também, nessas duas figuras, que não há relações claras entre os dois índices, mesmo considerando-se as classes pedológicas isoladamente.

FIGURA 5.17 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia normal, segundo classe pedológica.

FIGURA 5.18 – Valores de mini-CBR após 24h de imersão x valores de CBR, para a energia intermediária, segundo classe pedológica.

Nas figuras 5.19 e 5.20, apresentam-se, respectivamente, os valores de mini-CBR imerso médios para as classes da MCT, para as energias normal e intermediária.

FIGURA 5.19 – Variação dos valores de mini-CBR imerso, para a energia normal.

FIGURA 5.20– Variação dos valores de mini-CBR imerso, para a energia intermediária.

Observando-se as figuras 5.19 e 5.20 nota-se que, para a energia normal, os valores médios dos mini-CBR imersos são semelhantes para todas as classes da MCT, com valores um pouco maiores para os solos da classe LA, LA', NA' e NG' (12, 11, 10 e 10%) e os menores

Ainda, com intenção de explorar melhor os resultados desses ensaios, foram elaboradas as figuras 5.23 e 5.24, que apresentam, respectivamente, os valores médios das relações CBR/mini-CBR imerso em função das classes da MCT dos solos, para as energias de compactação normal e intermediária.

FIGURA 5.23 – Relações CBR/mini-CBR imerso, para a energia normal.

FIGURA 5.24 – Relações CBR/mini-CBR imerso, para a energia intermediária.

Percebe-se nas duas figuras anteriores, que para as duas energias as relações CBR/mini-CBR imerso o valor do mini-CBR é menor que o valor do CBR correspondente. É interessante notar também, que existe uma certa proximidade dos valores das relações para mesmas classes MCT, independente da energia de compactação, a mesmos das classes NA, NS', NA' e NG' que apresentaram essa relação igual a 3,07, 2,77, 2,57 e 2,00, respectivamente, para a energia normal e igual a 2,50, 2,10, 1,72 e 1,32 para a intermediária, respectivamente. Vale, nesses casos, ressaltar que a diferença entre as relações não é significativa.

5.6 VALORES DAS CARGAS DOS ENSAIOS MINI-CBR APÓS 24h DE IMERSÃO VERSUS VALORES DAS CARGAS DOS ENSAIOS DE CBR

Uma vez que não se conseguiu estabelecer nenhum tipo de relação entre os valores de CBR e de mini-CBR após 24h de imersão, resolveu-se lançar em gráficos os valores das cargas desenvolvidas nos ensaios de CBR, para as penetrações padrão (2,5 e 5,0mm), versus as correspondentes dos ensaios de mini-CBR (2,0 e 2,5mm), respectivamente. Entretanto, como os teores de umidade de moldagem dos ensaios de CBR foram os correspondentes aos teores de umidade ótimos dos ensaios de mini-CBR e, visto que, houve pequenos desvios entre os teores de umidade obtidos e os pretendidos, resolveu-se explorar todas as possibilidades e decidiu-se, então, determinar as cargas dos ensaios de mini-CBR em dois teores de umidade distintos, a saber: no correspondente ao teor de umidade de moldagem do ensaio de CBR e no teor ótimo do ensaio de compactação do ensaio de mini-CBR. A seguir são apresentados os resultados.

5.6.1. CARGAS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR DETERMINADAS PARA AS UMIDADES DE MOLDAGEM DOS ENSAIOS DE CBR

Nas figuras 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28 são apresentados os valores das cargas dos ensaios de mini-CBR imerso, correspondentes às umidades de moldagem dos ensaios de CBR, para as penetrações de 2,0 e 2,5mm versus os valores correspondentes das cargas do ensaio de CBR, para as penetrações de 2,5 e 5,0mm, para as energias normal e intermediária, respectivamente, com os pontos codificados segundo a classe MCT dos solos.

FIGURA 5.25 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x carga do CBR (2,5mm), para a unidade de moldagem do CBR, energia normal.

FIGURA 5.26 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x carga do CBR (5,0mm), para a unidade de moldagem do CBR, energia normal.

FIGURA 5.27 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x carga do CBR (2,5mm), para a umidade de moldagem do CBR, energia intermediária.

FIGURA 5.28 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x carga do CBR (5,0mm), para a umidade de moldagem do CBR, energia intermediária.

Observando-se essas quatro últimas figuras, percebe-se, novamente, que não há nenhum tipo explícito de relação entre as cargas dos ensaios de mini-CBR imerso e CBR, independentemente da consideração do nível de penetração (2,0 ou 2,5 mm no mini-CBR), das energias de compactação ou ainda das classes MCT dos solos.

5.6.2. CARGAS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR DETERMINADAS PARA AS UMIDADES ÓTIMAS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR

Nas figuras 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32 apresentam-se confrontados os valores das cargas dos ensaios de mini-CBR imerso para 2,0 e 2,5mm de penetração, obtidas na umidade ótima dos ensaios de mini-CBR, versus os valores das cargas dos ensaios de CBR, para 2,5 e 5,0mm de penetração, nas energias normal e intermediária, respectivamente, com os pontos codificados segundo a classe MCT dos solos.

FIGURA 5.29 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x carga do CBR (2,5mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia normal.

FIGURA 5.30 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x carga do CBR (5,0mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia normal.

FIGURA 5.31 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x carga do CBR (2,5mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária.

FIGURA 5.32 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x carga do CBR (5,0mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária.

Também no caso dessas últimas quatro figuras, nota-se que não existe nenhum tipo de relação entre as cargas dos ensaios de mini-CBR imerso e CBR, independentemente da consideração do nível de penetração (2,0 ou 2,5 mm no mini-CBR), da energia de compactação ou ainda das classes MCT dos solos, mesmo considerando-se neste caso, as penetrações terem sido determinadas para as umidades ótimas dos ensaios de mini-CBR.

5.7 VALORES DAS CARGAS DOS ENSAIOS MINI-CBR APÓS 24h DE IMERSÃO VERSUS VALORES DE CBR

Na tentativa de reavaliar a relação encontrada por Nogami em 1972 resolveu-se lançar em gráficos os valores de CBR, para as penetrações padrão (2,5 e 5,0mm), versus as correspondentes dos ensaios de mini-CBR (2,0 e 2,5mm), respectivamente. Como foi dito no item 5.6, teores de umidade de moldagem dos ensaios de CBR foram os correspondentes aos teores de umidade ótimos dos ensaios de mini-CBR e, visto que, houve pequenos desvios entre os teores de umidade obtidos e os pretendidos, resolveu-se explorar todas as possibilidades e decidiu-se, então, determinar as cargas dos ensaios de mini-CBR em dois teores de umidade distintos, a saber: no correspondente ao teor de umidade de moldagem do

ensaio de CBR e no teor ótimo do ensaio de compactação do ensaio de mini-CBR. A seguir são apresentados os resultados.

5.7.1. CARGAS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR DETERMINADAS PARA AS UMIDADES DE MOLDAGEM DOS ENSAIOS DE CBR VERSUS VALORES DE CBR

Nas figuras 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36 são apresentados os valores das cargas dos ensaios de mini-CBR imerso, correspondentes às unidades de moldagem dos ensaios de CBR, para as penetrações de 2,0 e 2,5mm versus os valores correspondentes de CBR, para as penetrações de 2,5 e 5,0mm, para as energias normal e intermediária, respectivamente, com os pontos codificados segundo a classe MCT dos solos.

FIGURA 5.33 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x CBR (2,5mm), para a unidade de moldagem do CBR, energia normal.

FIGURA 5.34 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x CBR (5,0mm), para a unidade de moldagem do CBR, energia normal.

FIGURA 5.35 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x CBR (2,5mm), para a unidade de moldagem do CBR, energia intermediária.

FIGURA 5.36 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x CBR (5,0mm), para a unidade de moldagem do CBR, energia intermediária.

Percebe-se, observando essas quatro últimas figuras, que não há uma relação clara entre as cargas dos ensaios de mini-CBR imerso e os valores de CBR, independentemente da consideração do nível de penetração (2,0 ou 2,5 mm no mini-CBR), das energias de compactação ou ainda das classes MCT dos solos.

5.7.2. CARGAS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR DETERMINADAS PARA AS UMIDADES ÓTIMAS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR VERSUS VALORES DE CBR

Nas figuras 5.37, 5.38, 5.39 e 5.40 apresentam-se confrontados os valores das cargas dos ensaios de mini-CBR imerso para 2,0 e 2,5mm de penetração, obtidas na umidade ótima dos ensaios de mini-CBR, versus os valores de CBR, para 2,5 e 5,0mm de penetração, nas energias normal e intermediária, respectivamente, com os pontos codificados segundo a classe MCT dos solos.

FIGURA 5.37 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x CBR (2,5mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia normal.

FIGURA 5.38 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x CBR (5,0mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia normal.

FIGURA 5.39 – Carga do mini-CBR imerso (2,0mm) x CBR (2,5mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária.

FIGURA 5.40 – Carga do mini-CBR imerso (2,5mm) x CBR (5,0mm), para a umidade ótima do mini-CBR, energia intermediária.

Também no caso dessas últimas quatro figuras, nota-se que não existe uma relação bem definida entre as cargas dos ensaios de mini-CBR imerso e os valores de CBR, independentemente da consideração do nível de penetração (2,0 ou 2,5 mm no mini-CBR), da energia de compactação ou ainda das classes MCT dos solos, mesmo considerando-se neste caso, as penetrações terem sido determinadas para as umidades ótimas dos ensaios de mini-CBR.

5.8 VALORES MÉDIOS DOS CBR DOS SOLOS EM FUNÇÃO DE SUAS CLASSES MCT

Nas figuras 5.41 e 5.42 são apresentados na carta da classificação MCT, respectivamente, os valores médios de CBR dos solos ensaiados para as energias de compactação normal e intermediária.

FIGURA 5.41. – Valores médios de CBR na energia normal, em função da classe MCT dos solos.

FIGURA 5.42. – Valores médios de CBR na energia intermediária, em função da classe MCT dos solos.

Observa-se nas figuras 5.41 e 5.42 que, tanto para a energia normal como para a intermediária, os valores médios dos CBR apresentaram-se em três níveis: o inferior compreendendo os solos das classes NG', NS' e LG' (médias em torno de 15 e 33%, para as energias normal e intermediária, respectivamente); o intermediário com as classes NA, NA' e LA' (médias da ordem de 24 e 43%, para as energias normal e intermediária, respectivamente) e o superior com a classe LA (médias de 46 e 62%, para as energias normal e intermediária, respectivamente). Outro fato interessante de se notar é que os valores médios de CBR na energia intermediária são, aproximadamente, o dobro dos valores médios obtidos na energia normal, para todas as classes MCT dos solos.

Nas figuras 5.43 e 5.44 apresentam-se os valores de CBR na carta MCT, para as energias normal e intermediária, respectivamente.

FIGURA 5.43. – Valores de CBR na energia normal, em função da classe MCT dos solos.

FIGURA 5.44. – Valores de CBR na energia intermediária, em função da classe MCT dos solos.

5.9 EXPANSÕES DOS ENSAIOS DE MINI-CBR VERSUS EXPANSÕES DOS ENSAIOS DE CBR

Nas figuras 5.45 e 5.46, apresentam-se as expansões obtidas nos ensaios de CBR e mini-CBR, para as energias de compactação normal e intermediária, respectivamente, codificadas segundo a classe MCT.

FIGURA 5.45 – Expansão na unidade ótima do ensaio de mini-CBR x expansão do ensaio de CBR, para a energia normal.

FIGURA 5.46 – Expansão na unidade ótima do ensaio de mini-CBR x expansão do ensaio de CBR, para a energia intermediária.

Percebe-se nas figuras 5.45 e 5.46, que os valores das expansões dos ensaios de mini-CBR e dos ensaios de CBR possuem uma grande diferença, independentemente da classe MCT dos solos. Isso ocorre, provavelmente, pela dificuldade de medir a expansão no ensaio de CBR.

6. CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, esse trabalho tinha como objetivo avaliar a adequação das relações vigentes para a “determinação” do índice CBR através do ensaio de mini-CBR, quando utilizada para solos característicos do município de São Carlos, interior de São Paulo.

Com o desenrolar dos ensaios, notou-se que os resultados indicavam que essas relações não se mostravam adequadas para o universo em estudo, pois quando tentava-se relacionar, graficamente, os resultados dos ensaios tradicionais de CBR com os do mini-CBR, não se obtinham retas como era de se esperar e sim uma nuvem de pontos, indicando não haver relação entre os dois índices.

Assim, decidiu-se tentar desenvolver novas relações, nos moldes do que fora feito originalmente por Nogami (1972) e relacionar novamente os valores de carga do ensaio de CBR, para as penetrações de 2,5 e 5,0mm, com os valores de carga desenvolvidos nos ensaios padronizados de mini-CBR, para as penetrações de 2,0 e 2,5mm, respectivamente, nas energias de compactação normal e intermediária.

Entretanto, como resultado final, obteve-se que, para os materiais ensaiados, representativos do município de São Carlos, não foi possível o estabelecimento de relações satisfatórias que permitissem a determinação do “suporte” CBR dos solos a partir da execução de ensaios de dimensão reduzida do tipo mini-CBR.

6.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do trabalho:

- a) constatou-se que a bibliografia sobre o ensaio de mini-CBR é bastante extensa, apesar de se tratar de um assunto relativamente novo. De forma contrária, a literatura sobre o ensaio de CBR, que é tradicional e ainda muito utilizado, é escassa;
- b) é possível, com os ensaios de compactação tipo mini-CBR, reproduzir, com precisão aceitável (ver tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4), os parâmetros de compactação dos ensaios de CBR convencional (umidade ótima e massa específica seca); tanto para a energia normal quanto intermediária, ou seja, presume-se que seja possível substituir os ensaios convencionais pelos de dimensões reduzidas para a determinação dos parâmetros ótimos de compactação dos solos;
- c) não há uma relação clara entre os valores de CBR e os valores de mini-CBR imediato (penetração sem imersão), independentemente da consideração isolada ou conjunta das classes pedológicas ou MCT dos solos, ou ainda, da energia de compactação ser a normal ou a intermediária;
- d) os valores médios das relações CBR/min-CBR imediato são “parecidos” quando se varia a energia de compactação considerando-se mesmas classes MCT dos solos, a menos dos solos da classe NG’, apesar de não haver uma relação clara entre esses índices;
- e) também não há uma relação clara entre os valores de CBR e os valores de mini-CBR após 24h de imersão, independentemente da consideração isolada ou conjunta das classes pedológicas ou MCT dos solos, ou ainda, da energia de compactação ser a normal ou a intermediária. Observa-se, porém que os valores de CBR, em quase sua totalidade, são maiores que os valores de mini-CBR após 24h de imersão, para ambas as energias utilizadas nesse trabalho.
- f) também são parecidos os valores médios das relações CBR/mini-CBR após 24h de imersão, quando se varia a energia de compactação, considerando-se mesmas classes

MCT dos solos, com exceção dos solos das classes NA, NS' e NG'. Porém não existe relação entre os índices;

- g) não foi possível estabelecer novas relações entre os valores das cargas do ensaio de CBR e os valores das cargas desenvolvidas no ensaio de mini-CBR para as penetrações padronizadas, independentemente das classes dos solos ou das energias de compactação utilizadas;
- h) não foi possível validar a relação existente entre os valores das cargas desenvolvidas no ensaio de mini-CBR e os valores de CBR, para as penetrações padronizadas, independentemente das energias de compactação utilizadas;
- i) observa-se que os valores médios de CBR na energia intermediária são, aproximadamente, o dobro dos valores médios obtidos na energia normal, para todas as classes MCT dos solos, contudo não se pode considerar uma relação clara;
- j) não existe relação entre os valores das expansões dos ensaios, talvez isto ocorrendo pela dificuldade de medir a expansão no ensaio de CBR.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos resultados dessa pesquisa terem, de uma certa maneira, contrariado as expectativas, uma vez que não se conseguiu, nem validar as relações existentes e tão pouco estabelecer novas relações entre o CBR tradicional e o mini-CBR para os solos analisados, por outro lado permitiu conhecer melhor as características de “suporte” dos solos da região, tanto à luz dos ensaios tradicionais quanto dos miniaturas.

Por outro lado, o fato de não haver relação entre os índices CBR e o mini-CBR não invalida a utilização dos ensaios em corpos de prova miniatura, pois esses substituem, com algumas vantagens, os ensaios tradicionais de compactação, como outros autores já constataram e, também já se criou, ao longo dos anos, um “conhecimento” acerca dos valores de “suporte” obtidos desses ensaios, que permite aos profissionais avaliarem a qualidade dos solos a partir dos seus resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO–*American Association of State Highway and Transportation Officials* (1993).
Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D. C. (1993).
- BARROSO, S.H.A. (2002). *Estudo dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia Rodoviária*. São Carlos. 178p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, SP.
- COZZOLINO, V.M.N., NOGAMI, J.S. (1993). *Classificação Geotécnica MCT para Solos Tropicais*. Solos e Rochas, ABMS – ABGE, V16, nº2: p.77-91, São Paulo, SP.
- DER-SP M - 192/89. *Determinação do Índice de Suporte Mini-CBR e da Expansão de Solos Compactados com Equipamento Miniatura* – Departamento de Estradas e Rodagem. São Paulo, SP.
- DER-SP M 53 - 71. *Ensaio de Suporte Califórnia, de Amostras Compactadas em Laboratório* – Departamento de Estradas e Rodagem. São Paulo, SP.
- DNER (1990). *Relatório Final da Pesquisa Sobre Solos Tropicais* – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 95p., Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1996). *Manual de Pavimentação* – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 320p. - 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER – ME 50-64. *Materiais para Obras Rodoviárias* – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- FRANCO, C. A., LEE K. W. (1987). *An Improved California Bearing Ratio Test Produce*. Transportation Research Record, Vol. 1119, 1987, pp. 91-97.

- FRANZOI, S. (1990). *Algumas Peculiaridades Resilientes de Solos Lateríticos e Saprolíticos*. São Paulo. 187p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.
- HARISON, J. A. (1987). *Correlation between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strenght Measurement of Soils. Produce*. Institution of Civil Engineers, Part. 2, n 83, 1987, pp. 833-844.
- HOGENTOGLER C. A., AARON H., THOREEN R. C., WILLIS E. A., WINTERMYER A. M. (1937). *Engineering Properties of Soil, U. S. Bureau of Public Roads*, 1ª Edição, 1937, New York.
- HOPKINS, T. C., DEEN, R.C. (1973). *Correlation of Kentucky CBR'S and Soil Support Values*. Highway Research Record, nº 466, 1973, pp. 70–81, Washington, D. C.
- HUANG, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*, Editora Prentice-Hall do Brasil, LTDA, Rio de Janeiro, RJ, 1ª Edição, 1993, Englewood Cliffs, New Jersey.
- LIVNEH, M. (1989). *Validation of Correlations between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests*. Transportation Research Record, Vol. 1219, 1989, pp. 56-67, Washington, D. C.
- MANUALS – CORPS OF ENGINEERS U. S. ARMY (1958). *Engineering and Design Flexible Airfield Pavements Air Force* (1958), Apêndice I, pp. 30-32.
- MEDINA, J. (1988). *Notas Históricas acerca da Mecânica dos Pavimentos – 23ª Reunião Anual de Pavimentação*, Florianópolis, RS.
- NOGAMI, J. S. (1972). *Determinação do Índice de Suporte Califórnia com Equipamentos de Dimensões Reduzidas (Ensaio Mini-CBR) – II Reunião das Organizações Rodoviárias*, Brasília, BR.
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. (1979). *Soil characterization of Mapping Units for Highway Purposes in a Tropical Area*. Ulletin of the International Association of Engineering Geology, nº 19, 1979, pp. 196–199.

- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. (1981). *Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias* – Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. (1982). *Algumas Comparações entre uma Nova Classificação de Solos e as Tradicionais, Principalmente para Finalidades Rodoviárias* – VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 1982, Olinda, PE.
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. (1988). *Nova Metodologia (MCT) de Estudos Geotécnicos e suas Aplicações em Rodovias Vicinais* – I SENAVI, São Paulo, SP.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D. F. (1993). Novos Rumos dos Estudos Geotécnicos para Obras Viárias pela Identificação Expedita dos grupos MCT. VII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Vol. 2, 1993, São Paulo, SP.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D. F. (1994). Ampliação do uso da Metodologia MCT no Estudo de Solos Tropicais para Pavimentação. In: ANAIS DA XVIII REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPV, 1994. *Anais*. Belo Horizonte, MG.
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. (1995). *Pavimento de Baixo Custo com Solos Lateríticos* – Editora Vilibor, São Paulo, SP.
- NOGUEIRA, J. B., RÖHM, S. A. (1993). Determinação de mini-CBR com o Penetrômetro Dinâmico Leve PDL. In: *Solos e Rochas*, ABMS – ABGE, v. 16, n. 3, pp. 199-206.
- O'FLAHERTY, C. A., EDGAR, C. E., DAVIDSON, D. T. (1963). *Iowa State Compaction Apparatus for Measurement of Small Soil Samples*. Highway Research Record, nº 22, 1963, Washington, D. C.
- PORTER O. J. (1950). *Development of the Original Method for Highway Design*. Transactions, ASCE, Vol. 115, 1950, pp. 461-467.
- PRADO, H.; ALMEIDA C. L. P. e OLIVEIRA J. B. (1981). *Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Folha de Brotas, Descalvado e São Carlos*. Convênio EMBRAPA/CPA/IA, esc: 1:1.000.000, Campinas, SP.

- RODGHER, S. F. (2002). *Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Previsão de Propriedades dos Solos Tropicais*. São Carlos. 306p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, SP.
- RODGHER, S. F., FABBRI G. T. (1998). *Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Previsão de Propriedades dos Solos Tropicais* – XII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensaio em Transportes, p. 177-181, Fortaleza, CE.
- SANTANA, J.A. (1998). *Estudo do Comportamento de Solos Artificiais em Função da Variação das Características de sua fração grossa*. São Carlos. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, SP.
- SENÇO, W. (SEM DATA). *Pavimentação* – 1ª Edição, Editora Bisordi, São Paulo, SP.
- SOARES, J. B. (1998). *Curso de Especialização em Engenharia Rodoviária*. Projeto de Pavimentos Flexíveis – UFCE – Departamento de Engenharia de Transportes, Fortaleza, CE.
- VALLERGA, B. A., Inc. Woodward-Clyde and Associates, Nibon Rananandana (1969). *Characteristics of Lateritic Soils Used in Thailand Road Construction*. Highway Research Record, nº 284, 1969, Washington, D. C.
- VILAR, O. M., ROHM, S. A. (1994). *Comparação entre um Ensaio de Compactação de Solos em Molde de Dimensões Reduzidas e o Ensaio Proctor Normal* – X COBRAMSEF - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos de Engenharia de Fundações, p. 373-380, Fortaleza, CE.
- ZUPPOLINI, A. N. (1994). *Pavimentação Urbana no Estado de São Paulo: Novas Considerações*. São Carlos. 125p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, SP.
- YODER, E. J., WITCZAK M. W. (1975). *Principles of Pavement Design* (2ª ed.) – Wiley-Interscience Publication, USA.

ANEXO A - Local onde as amostras estudadas foram coletadas, no município de São Carlos-SP.

Amostras	Classe pedológica	Classe MCT	Trecho	Margem	c'	e'
01	LE	LA'	SC – Babilônia Km 2	esquerda	1,200	0,990
02	LV	LG'	SC – Babilônia km 4	esquerda	2,030	0,810
03	LR	LA'	SC – Babilônia km 6	direita	1,350	1,070
04	TE	LG'	SC – Babilônia km 7	esquerda	1,540	1,110
05	LE	LG'	SC – Babilônia km 10	esquerda	1,700	1,040
06	AQ	NA'	Babilônia – Represa do 29 km 15	esquerda	1,110	1,210
10	LV	LG'	Trevo do Condomínio Samambaia (talude)	direita	1,900	0,620
11	LV	NA'	Trevo do Condomínio Samambaia (talude)		1,300	1,220
12	LV	LA'	Estrada acima do Condomínio Samambaia à 500 m da Fazenda Floresta	direita	1,400	1,050
15	LE	LA'	Tibaia de São Fernando próximo a Chácara Primavera	esquerda	1,400	0,970
18	AQ	LA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto próximo à Chácara Santa Cecília	direita	1,020	1,130
19	LR	NA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto próximo à Fazenda Alamo	direita	1,280	1,160
22	AQ	NA	SP 318 SC – Ribeirão Preto próximo ao Córrego do Santa Cândida	direita	0,340	1,580
23	PV	NG'	SP 318 SC – Ribeirão Preto próximo à Fazenda Dallas	esquerda	1,670	1,220
24	PV	LG'	SP 318 SC - Ribeirão Preto próximo à Fazenda Dallas	esquerda	1,540	0,740
26	AQ	NA	SP-310 SC-SP km 222+800 m (pista norte)	direita	0,320	1,405
28	LV	LG'	Estrada SC-Descalvado à 4,5 km do Trevo	direita	1,870	1,060
29	LV	NG'	Estrada Descalvado-SC à 8,5 km do Trevo	direita	1,770	1,700
30	AQ	LA	SP-215 SC-RB à 8 km do Trevo	direita	0,520	1,330
32	LV	LA	SP-215 SC-RB à 18 km do Trevo	direita	0,580	1,200
33	LV	LA'	SP-215 SC-RB à 22 km do Trevo	direita	0,930	0,860
34	LV	LA'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 2 km do Trevo	direita	1,120	1,110
35	LE	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 6 km do Trevo	direita	1,550	1,110
36	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 8,5 km do Trevo	esquerda	2,170	1,000
37	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 11 km do Trevo	direita	1,750	1,130
38	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 14 km do Trevo	direita	1,560	1,140
39	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 17 km do Trevo	direita	1,530	1,100
40	LE	NA'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 19 km do Trevo	direita	1,370	1,150

ANEXO A - Local onde as amostras estudadas foram coletadas, no município de São Carlos-SP.

Amostras	Classe pedológica	Classe MCT	Trecho	Margem	c'	e'
42	TE	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 30 km do Trevo	esquerda	2,190	1,110
43	Li	NS'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 31 km do Trevo	esquerda	1,280	1,420
44	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 26 km do Trevo	direita	1,570	1,030
45	LV	LA'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 29 km do Trevo	esquerda	1,140	1,020
46	LV	LA'	Estrada da Faz. Canchin à 2 km do Trevo da UFSCar	direita	1,498	0,930
47	LV	LA'	Estrada da Faz. Canchin à 5 km do Trevo da UFSCar	direita	1,390	0,790
48	LV	LA'	Estrada da Faz. Canchin à 7 km do Trevo da UFSCar	direita	1,120	1,060
49	LR	LG'	Estrada da Faz. Canchin à 8 km do Trevo da UFSCar	direita	2,110	1,040
51	AQ	NA'	Estrada da Faz. Canchin à 12 km do Trevo da UFSCar	direita	0,600	1,600
52	LE	LG'	Estrada da Faz. Canchin à 16 km do Trevo da UFSCar	esquerda	1,880	1,060
53	LR	LG'	Estrada da Faz. Canchin à 25 km do Trevo da UFSCar	esquerda	1,510	1,090
56	LV	LA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto à 2 km do Trevo	direita	1,480	1,060
58	LV	LG'	SP 318 SC – Ribeirão Preto à 10 km do Trevo	direita	1,610	0,880
59	LV	LA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto à 14 km do Trevo	direita	1,400	0,630
60	LV	LG'	SP 318 SC – Ribeirão Preto à 16 km do Trevo	direita	1,700	0,930
61	LV	LA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto à 28 km do Trevo	direita	0,780	0,990
62	LV	LA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto (entrada da Fazenda Faroeste) à 31,5 km do Trevo	direita	0,810	1,120
63	LV	NA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto (entrada da Fazenda Faroeste) à 35 km do Trevo	direita	0,720	1,150
64	LV	LA'	SP 318 SC – Ribeirão Preto (entrada da Fazenda Faroeste) à 39 km do Trevo	direita	1,230	1,010
68	AQ	NA	SP-215 SC-RB à 2 km do Trevo	direita	0,400	1,750
69	AQ	NA	SP-215 SC-RB à 4,5 km do Trevo	direita	0,340	1,800
71	LV	LG'	SP-215 SC- Descalvado à 6,5 km do Trevo	direita	1,513	0,990
74	LV	LG'	SP-215 SC- Descalvado à 16 km do Trevo	direita	1,516	1,090
75	LV	LG'	SP-310 SC-AQA à 1,5 km do Trevo	direita	1,680	1,000
77	LV	LA'	SP-310 SC-AQA à 10 km do Trevo	direita	1,400	1,020
78	LV	LG'	SP-310 SC-AQA à 12 km do Trevo	direita	1,670	1,050
79	LV	LA'	SP-310 SC-AQA à 15 km do Trevo	direita	1,390	0,770
86	PV	NS'	Estrada para Brotas à 10,3 m do entroncamento (SP-215 SC-RB)	esquerda	0,690	1,740

ANEXO A - Local onde as amostras estudadas foram coletadas, no município de São Carlos-SP.

Amostras	Classe pedológica	Classe MCT	Trecho	Margem	c'	e'
87	Li	NS'	Estrada para Brotas à 11,6 km do entroncamento (SP-215 SC-RB)	esquerda	0,940	1,570
89	Li	NS'	Estrada para Brotas à 14,1 km do entroncamento (SP-215 SC-RB)	esquerda	0,840	1,620
91	LE	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 6 km do Trevo de acesso	direita	2,130	1,120
92	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 9 km do Trevo de acesso	direita	1,700	1,130
93	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 12 km do Trevo de acesso	direita	1,660	1,090
94	LR	LG'	Estrada Água Vermelha-Santa Eudóxia à 14 km do Trevo de acesso	direita	2,020	1,080

ANEXO B - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de CBR para Energia Normal de Compactação

Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm³)	γ moldagem (g/cm³)	Valor de CBR (%)	Valor de CBR (%)		Carga do CBR (kgf)		Grau de Compactação (%)
	MCT	Pedológica						2,5mm	5,0mm	2,5mm	5,0mm	
30	LA	AQ	8,00	7,93	1,862	1,900	35	35	0	469	-	102
32	LA	LV	9,55	9,00	1,981	1,993	56	52	56	700	1150	103
1	LA'	LE	12,82	12,45	1,901	1,844	26	26	24	350	501	99
3	LA'	LR	15,00	14,59	1,830	1,793	15	13	15	180	300	101
12	LA'	LV	18,47	18,74	1,715	1,693	19	19	19	255	387	98
15	LA'	LE	14,50	14,21	1,828	1,791	31	31	25	420	505	103
18	LA'	AQ	10,00	9,46	1,815	1,794	21	21	16	278	332	98
33	LA'	LV	10,52	10,56	2,008	1,986	39	31	39	414	796	99
34	LA'	LV	13,80	13,24	1,870	1,824	23	23	21	316	439	98
45	LA'	LV	13,50	13,04	1,891	1,844	21	19	21	250	420	98
46	LA'	LV	15,00	14,67	1,850	1,810	12	10	12	132	255	98
47	LA'	LV	14,21	13,76	1,819	1,804	17	12	17	159	357	99
48	LA'	LV	11,68	11,35	1,887	1,889	39	37	39	500	800	100
56	LA'	LV	16,00	15,60	1,820	1,805	11	11	11	145	230	99
59	LA'	LV	16,00	15,65	1,860	1,816	6	5	6	68	114	98
61	LA'	LV	8,50	8,48	1,870	1,892	30	27	30	369	619	100
62	LA'	LV	9,68	9,59	1,834	1,834	30	30	30	405	610	99
64	LA'	LV	11,70	11,33	1,973	1,958	21	16	21	210	440	97
77	LA'	LV	15,50	15,28	1,840	1,818	15	15	12	205	241	99
79	LA'	LV	13,50	13,21	1,900	1,851	40	40	36	537	737	98
2	LG'	LV	17,02	16,68	1,780	1,753	24	24	22	323	448	101
4	LG'	TE	28,20	27,89	1,478	1,455	11	11	10	146	209	100
5	LG'	LE	29,80	29,54	1,494	1,470	11	11	10	150	200	100
10	LG'	LV	17,49	17,44	1,745	1,736	22	20	22	275	445	98
24	LG'	PV	13,47	13,68	1,767	1,726	22	22	17	291	350	98
28	LG'	LV	17,97	18,03	1,760	1,745	32	32	29	437	592	99
35	LG'	LE	19,00	18,82	1,700	1,703	10	8	10	105	200	99

ANEXO B - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de CBR para Energia Normal de Compactação

Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm³)	γ moldagem (g/cm³)	Valor de CBR (%)	Valor de CBR (%)		Carga do CBR (kgf)		Grau de Compactação (%)
	MCT	Pedológica						2,5mm	5,0mm	2,5mm	5,0mm	
36	LG'	LR	18,90	18,67	1,772	1,744	19	19	18	250	378	97
37	LG'	LR	27,50	27,37	1,572	1,555	12	10	12	137	241	98
38	LG'	LR	28,50	28,01	1,550	1,536	11	11	10	150	210	101
39	LG'	LR	26,20	25,95	1,650	1,605	6	6	6	75	125	98
42	LG'	TE	24,50	24,22	1,720	1,708	11	11	9	146	189	98
44	LG'	LR	20,11	20,69	1,751	1,714	8	7	8	91	155	101
49	LG'	LR	25,90	25,72	1,516	1,536	23	23	22	305	453	99
52	LG'	LE	23,82	23,38	1,667	1,637	21	21	17	278	350	102
53	LG'	LR	15,00	14,60	1,940	1,908	13	12	13	165	265	99
58	LG'	LV	16,50	16,09	1,840	1,780	23	23	18	309	359	97
60	LG'	LV	12,00	12,33	1,800	1,778	29	29	28	391	564	99
71	LG'	LV	15,80	15,46	1,819	1,798	31	31	27	423	546	98
74	LG'	LV	19,70	19,62	1,701	1,689	7	7	7	96	137	98
75	LG'	LV	15,20	15,20	1,840	1,810	10	10	9	137	187	99
78	LG'	LV	13,30	13,15	1,940	1,905	16	16	16	214	334	99
91	LG'	LE	16,20	16,01	1,668	1,678	16	14	16	190	325	99
92	LG'	LR	17,90	17,56	1,760	1,733	15	15	15	200	300	100
93	LG'	LR	22,50	22,05	1,484	1,500	14	14	13	191	262	98
94	LG'	LR	28,00	27,75	1,536	1,558	7	7	7	91	141	99
22	NA	AQ	5,80	5,50	1,770	1,773	11	11	10	155	205	100
26	NA	AQ	9,80	9,38	1,880	1,901	34	33	34	450	690	101
68	NA	AQ	6,00	5,71	1,810	1,825	27	27	23	360	-	102
69	NA	AQ	9,60	10,70	1,920	1,924	21	15	21	200	440	101
6	NA'	AQ	16,40	16,11	1,802	1,787	15	15	12	205	241	103
11	NA'	LV	19,20	19,17	1,703	1,693	34	34	28	464	569	103
19	NA'	LR	16,20	15,84	1,834	1,803	16	16	16	210	325	102
40	NA'	LE	14,60	14,12	1,860	1,848	15	11	15	150	300	99

ANEXO B - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de CBR para Energia Normal de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm ³)	γ moldagem (g/cm ³)	Valor de CBR (%)	Valor de CBR (%)		Carga do CBR (kgf)		Grau de Compactação (%)
	MCT	Pedológica						2,5mm	5,0mm	2,5mm	5,0mm	
51	NA'	AQ	8,07	8,09	1,794	1,843	39	31	39	425	800	101
63	NA'	LV	9,90	9,78	1,950	1,880	43	43	37	575	751	101
23	NG'	PV	13,40	13,15	1,744	1,727	17	17	15	228	300	99
29	NG'	LV	22,95	22,65	1,610	1,599	16	16	15	214	312	99
43	NS'	Li	17,20	17,15	1,693	1,693	18	15	18	200	375	100
86	NS'	PV	8,25	8,23	1,651	1,638	8	8	6	105	130	100
87	NS'	Li	8,30	8,02	1,709	1,714	12	12	12	160	250	100
89	NS'	Li	6,00	6,05	1,684	1,683	8	7	7	100	141	102

ANEXO C - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de mini-CBR para Energia Normal de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm ³)	γ moldagem (g/cm ³)	Valor de mini-CBR (%)		Carga do mini-CBR na Wmoldagem (kgf)		Carga do mini-CBR na Wótima (kgf)	
	MCT	Pedológica					após 24h de imersão	imediato	2,0mm	2,5mm	2,0mm	2,5mm
30	LA	AQ	8,00	7,93	1,862	1,900	10	14	24	24	24	24
32	LA	LV	9,55	9,00	1,981	1,993	13	30	30	32	33	35
1	LA'	LE	12,82	12,45	1,901	1,844	17	22	43	49	44	49
3	LA'	LR	15,00	14,59	1,830	1,793	12	14	30	34	30	35
12	LA'	LV	18,47	18,74	1,715	1,693	12	17	32	36	32	36
15	LA'	LE	14,50	14,21	1,828	1,791	10	15	34	39	34	38
18	LA'	AQ	10,00	9,46	1,815	1,794	10	17	25	30	28	30
33	LA'	LV	10,52	10,56	2,008	1,986	23	37	63	67	63	67
34	LA'	LV	13,80	13,24	1,870	1,824	9	16	22	24	21	23
45	LA'	LV	13,50	13,04	1,891	1,844	11	19	26	29	28	30
46	LA'	LV	15,00	14,67	1,850	1,810	11	16	31	33	28	30
47	LA'	LV	14,21	13,76	1,819	1,804	9	14	23	23	23	23
48	LA'	LV	11,68	11,35	1,887	1,889	16	20	39	46	39	46
56	LA'	LV	16,00	15,60	1,820	1,805	8	11	25	28	21	23
59	LA'	LV	16,00	15,65	1,860	1,816	6	14	19	21	17	20
61	LA'	LV	8,50	8,48	1,870	1,892	10	18	26	28	26	28
62	LA'	LV	9,68	9,59	1,834	1,834	9	18	23	23	23	23
64	LA'	LV	11,70	11,33	1,973	1,958	15	20	40	44	38	42
77	LA'	LV	15,50	15,28	1,840	1,818	8	10	21	23	20	23
79	LA'	LV	13,50	13,21	1,900	1,851	10	15	26	28	26	28
2	LG'	LV	17,02	16,68	1,780	1,753	10	17	31	35	23	28
4	LG'	TE	28,20	27,89	1,478	1,455	9	14	21	26	21	26
5	LG'	LE	29,80	29,54	1,494	1,470	9	13	28	30	27	30
10	LG'	LV	17,49	17,44	1,745	1,736	9	22	28	30	26	29
24	LG'	PV	13,47	13,68	1,767	1,726	7	18	16	16	15	15
28	LG'	LV	17,97	18,03	1,760	1,745	21	24	58	63	58	63
35	LG'	LE	19,00	18,82	1,700	1,703	4	6	9	10	9	10

ANEXO C - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de mini-CBR para Energia Normal de Compactação

Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm³)	γ moldagem (g/cm³)	Valor de mini-CBR (%)		Carga do mini-CBR na Wmoldagem (kgf)		Carga do mini-CBR na Wótima (kgf)	
	MCT	Pedológica					após 24h de imersão	imediato	2,0mm	2,5mm	2,0mm	2,5mm
36	LG'	LR	18,90	18,67	1,772	1,744	14	18	34	38	33	38
37	LG'	LR	27,50	27,37	1,572	1,555	7	9	17	18	17	18
38	LG'	LR	28,50	28,01	1,550	1,536	6	8	14	14	14	14
39	LG'	LR	26,20	25,95	1,650	1,605	4	7	9	11	8	11
42	LG'	TE	24,50	24,22	1,720	1,708	8	20	19	21	18	20
44	LG'	LR	20,11	20,69	1,751	1,714	9	13	26	28	28	30
49	LG'	LR	25,90	25,72	1,516	1,536	6	10	15	17	13	16
52	LG'	LE	23,82	23,38	1,667	1,637	11	16	28	33	26	30
53	LG'	LR	15,00	14,60	1,940	1,908	8	11	17	21	17	21
58	LG'	LV	16,50	16,09	1,840	1,780	15	21	42	47	36	43
60	LG'	LV	12,00	12,33	1,800	1,778	12	26	30	32	30	32
71	LG'	LV	15,80	15,46	1,819	1,798	15	25	37	41	36	41
74	LG'	LV	19,70	19,62	1,701	1,689	5	8	12	14	12	14
75	LG'	LV	15,20	15,20	1,840	1,810	9	14	23	23	23	23
78	LG'	LV	13,30	13,15	1,940	1,905	10	12	27	29	26	28
91	LG'	LE	16,20	16,01	1,668	1,678	7	11	16	18	17	19
92	LG'	LR	17,90	17,56	1,760	1,733	8	15	20	23	19	22
93	LG'	LR	22,50	22,05	1,484	1,500	6	8	12	14	13	15
94	LG'	LR	28,00	27,75	1,536	1,558	6	12	-	-	-	-
22	NA	AQ	5,80	5,50	1,770	1,773	7	11	17	19	16	19
26	NA	AQ	9,80	9,38	1,880	1,901	9	12	23	25	20	23
68	NA	AQ	6,00	5,71	1,810	1,825	6	8	11	15	13	17
69	NA	AQ	9,60	10,70	1,920	1,924	10	12	16	18	23	26
6	NA'	AQ	16,40	16,11	1,802	1,787	8	12	25	28	19	19
11	NA'	LV	19,20	19,17	1,703	1,693	11	20	35	39	35	39
19	NA'	LR	16,20	15,84	1,834	1,803	9	11	23	26	23	26
40	NA'	LE	14,60	14,12	1,860	1,848	9	14	23	27	22	24

ANEXO C - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de mini-CBR para Energia Normal de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm ³)	γ moldagem (g/cm ³)	Valor de mini-CBR (%)		Carga do mini-CBR na Wmoldagem (kgf)		Carga do mini-CBR na Wótima (kgf)	
	MCT	Pedológica					após 24h de imersão	imediato	2,0mm	2,5mm	2,0mm	2,5mm
51	NA'	AQ	8,07	8,09	1,794	1,843	10	13	23	28	23	28
63	NA'	LV	9,90	9,78	1,950	1,880	14	19	35	41	36	42
23	NG'	PV	13,40	13,15	1,744	1,727	6	9	12	16	12	16
29	NG'	LV	22,95	22,65	1,610	1,599	14	23	28	30	28	30
43	NS'	Li	17,20	17,15	1,693	1,693	9	12	23	25	23	25
86	NS'	PV	8,25	8,23	1,651	1,638	2	3	5	5	5	5
87	NS'	Li	8,30	8,02	1,709	1,714	4	15	6	9	8	10
89	NS'	Li	6,00	6,05	1,684	1,683	4	8	3	5	3	5

ANEXO D - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaios de CBR para Energia Intermediária de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm³)	γ moldagem (g/cm³)	Valor de CBR (%)	Valor de CBR (%)		Carga do CBR (kgf)		Grau de Compactação (%)
	MCT	Pedológica						2,5mm	5,0mm	2,5mm	5,0mm	
30	LA	AQ	6,80	6,52	1,930	1,939	41	41	36	550	737	100
32	LA	AQ	8,49	7,89	2,046	2,028	82	82	81	850	-	99
1	LA'	LV	12,05	11,74	1,985	1,924	44	44	44	790	1175	97
3	LA'	AQ	12,30	11,70	1,940	1,898	39	39	28	605	664	98
12	LA'	AQ	17,20	16,77	1,810	1,797	44	44	37	496	828	99
15	LA'	LV	13,50	13,25	1,862	1,856	55	55	47	500	750	100
18	LA'	LE	8,80	8,86	2,080	2,060	45	45	32	600	900	99
33	LA'	LV	9,50	9,11	2,070	2,015	62	62	60	837	1224	97
34	LA'	LV	10,20	10,10	1,956	1,937	48	48	37	646	764	99
45	LA'	LV	10,50	10,05	1,983	1,923	46	46	32	623	646	97
46	LA'	LV	12,30	12,23	1,960	1,946	45	45	42	610	865	99
47	LA'	LV	11,94	11,59	1,943	1,888	39	38	39	510	801	97
48	LA'	LV	10,23	10,08	1,964	1,960	72	68	72	915	1474	100
56	LA'	LV	14,08	13,86	1,956	1,925	34	34	33	455	678	98
59	LA'	LV	14,90	14,78	1,881	1,856	11	9	11	125	225	99
61	LA'	LR	6,23	7,33	1,899	1,925	45	45	32	774	928	102
62	LA'	LV	8,60	8,50	1,880	1,841	35	34	35	605	655	98
64	LA'	LV	9,93	9,66	2,068	2,039	70	70	70	460	710	99
77	LA'	LV	12,00	12,26	1,948	1,909	45	45	32	605	655	98
79	LA'	LV	11,22	11,15	2,045	1,999	81	81	67	950	1425	98
2	LG'	LE	16,26	16,15	1,851	1,827	33	33	32	605	723	99
4	LG'	LR	25,50	25,25	1,630	1,603	23	23	22	600	805	98
5	LG'	LR	26,50	26,65	1,600	1,579	17	17	17	837	1010	99
10	LG'	LR	14,41	14,41	1,867	1,842	56	56	41	457	614	99
24	LG'	LR	13,20	12,97	1,940	1,904	51	51	41	260	340	98
28	LG'	LR	16,30	16,10	1,843	1,823	61	61	48	405	610	99
35	LG'	TE	17,60	17,13	1,778	1,732	33	33	29	305	441	97
36	LG'	PV	16,30	16,16	1,900	1,887	44	44	40	690	850	99

ANEXO D - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de CBR para Energia Intermediária de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm³)	γ moldagem (g/cm³)	Valor de CBR (%)	Valor de CBR (%)		Carga do CBR (kgf)		Grau de Compactação (%)
	MCT	Pedológica						2,5mm	5,0mm	2,5mm	5,0mm	
37	LG'	LV	24,00	23,71	1,670	1,633	32	32	28	819	983	98
38	LG'	LE	24,90	24,91	1,630	1,600	26	26	24	450	600	98
39	LG'	LR	23,35	23,02	1,728	1,703	22	22	22	600	810	99
42	LG'	LR	22,10	21,90	1,780	1,765	24	24	21	175	260	99
44	LG'	LR	17,66	17,84	1,860	1,831	35	35	30	437	571	98
49	LG'	LR	23,96	23,51	1,669	1,660	27	27	20	350	491	99
52	LG'	LV	21,50	21,23	1,758	1,725	35	35	24	750	850	98
53	LG'	LV	13,30	12,85	1,940	1,871	53	30	30	719	842	96
58	LG'	LR	13,20	13,14	2,025	1,988	30	53	41	300	460	98
60	LG'	LV	11,76	11,96	1,960	1,919	59	56	59	750	1200	98
71	LG'	LV	14,24	14,11	1,893	1,866	49	49	40	501	560	99
74	LG'	LV	17,00	16,79	1,760	1,799	36	36	26	890	1190	102
75	LG'	LV	13,30	13,16	1,965	1,931	66	66	58	664	819	98
78	LG'	LV	12,11	12,04	2,031	1,992	37	37	27	487	541	98
91	LG'	LV	14,01	13,88	1,680	1,691	45	45	35	441	651	101
92	LG'	TE	15,40	15,57	1,790	1,808	34	34	30	319	432	101
93	LG'	LR	20,08	20,22	1,500	1,522	19	19	17	478	619	102
94	LG'	LE	26,00	25,87	1,582	1,621	13	13	13	350	600	103
22	NA	AQ	4,36	4,41	1,810	1,817	31	31	23	1250	-	100
26	NA	AQ	8,45	8,08	2,007	1,962	49	49	41	525	569	98
68	NA	AQ	4,25	4,38	1,965	1,944	41	41	34	525	687	99
69	NA	AQ	5,50	5,39	1,974	1,942	39	39,00	34,00	419	478	98
6	NA'	LE	13,67	13,33	1,912	1,864	38	33	38	425	720	98
11	NA'	LE	16,70	16,65	1,825	1,801	50	50	36	1150	1840	99
19	NA'	Li	13,82	13,23	1,971	1,931	27	27	23	205	241	98
40	NA'	LE	12,00	11,99	1,980	1,923	35	31	36	500	900	97
51	NA'	AQ	6,00	6,20	2,045	2,022	41	41	33	450	775	99
63	NA'	LE	7,80	7,92	1,966	1,900	56	56	0	500	760	97

ANEXO D - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de CBR para Energia Intermediária de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm ³)	γ moldagem (g/cm ³)	Valor de CBR (%)	Valor de CBR (%)		Carga do CBR (kgf)		Grau de Compactação (%)
	MCT	Pedológica						2,5mm	5,0mm	2,5mm	5,0mm	
23	NG'	LV	12,73	12,35	1,943	1,913	41	41	31	423	516	99
29	NG'	PV	18,72	19,01	1,782	1,742	31	31	25	550	630	98
43	NS'	Li	14,00	14,01	1,788	1,740	45	45	32	610	664	97
86	NS'	LR	6,45	6,32	1,792	1,739	10	10	8	490	900	97
87	NS'	PV	6,20	6,37	1,803	1,764	32	32	23	132	159	98
89	NS'	Li	5,01	5,04	1,701	1,677	18	18	14	432	469	99

ANEXO E - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaios de mini-CBR para Energia Intermediária de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm ³)	γ moldagem (g/cm ³)	Valor de mini-CBR (%)		Carga do mini-CBR na Wmoldagem (kgf)		Carga do mini-CBR na Wótima (kgf)	
	MCT	Pedológica					após 24h de imersão	imediate	2,0mm	2,5mm	2,0mm	2,5mm
30	LA	AQ	6,80	6,52	1,930	1,939	14	24	47	44	44	44
32	LA	AQ	8,49	7,89	2,046	2,028	18	34	29	30	33	35
1	LA'	LV	12,05	11,74	1,985	1,924	32	35	28	33	30	36
3	LA'	AQ	12,30	11,70	1,940	1,898	22	39	33	35	34	37
12	LA'	AQ	17,20	16,77	1,810	1,797	20	30	21	26	21	26
15	LA'	LV	13,50	13,25	1,862	1,856	32	35	68	73	57	62
18	LA'	LE	8,80	8,86	2,080	2,060	14	22	92	105	83	97
33	LA'	LV	9,50	9,11	2,070	2,015	32	70	70	76	88	100
34	LA'	LV	10,20	10,10	1,956	1,937	38	49	97	100	100	107
45	LA'	LV	10,50	10,05	1,983	1,923	40	45	44	58	97	102
46	LA'	LV	12,30	12,23	1,960	1,946	21	26	76	83	69	76
47	LA'	LV	11,94	11,59	1,943	1,888	23	44	68	71	63	65
48	LA'	LV	10,23	10,08	1,964	1,960	23	50	63	67	63	67
56	LA'	LV	14,08	13,86	1,956	1,925	17	17	46	48	44	46
59	LA'	LV	14,90	14,78	1,881	1,856	21	24	55	62	53	60
61	LA'	LR	6,23	7,33	1,899	1,925	17	38	28	30	28	30
62	LA'	LV	8,60	8,50	1,880	1,841	8	35	42	44	40	45
64	LA'	LV	9,93	9,66	2,068	2,039	23	29	22	24	21	23
77	LA'	LV	12,00	12,26	1,948	1,909	32	46	80	90	80	88
79	LA'	LV	11,22	11,15	2,045	1,999	31	40	70	72	65	67
2	LG'	LE	16,26	16,15	1,851	1,827	16	23	35	39	34	37
4	LG'	LR	25,50	25,25	1,630	1,603	17	22	5	7	5	7
5	LG'	LR	26,50	26,65	1,600	1,579	18	32	97	115	97	115
10	LG'	LR	14,41	14,41	1,867	1,842	26	43	38	41	39	42
24	LG'	LR	13,20	12,97	1,940	1,904	24	32	14	18	14	18
28	LG'	LR	16,30	16,10	1,843	1,823	35	52	41	49	40	47
35	LG'	TE	17,60	17,13	1,778	1,732	12	16	42	45	42	44
36	LG'	PV	16,30	16,16	1,900	1,887	24	38	50	57	57	64

ANEXO E - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaios de mini-CBR para Energia Intermediária de Compactação												
Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm³)	γ moldagem (g/cm³)	Valor de mini-CBR (%)		Carga do mini-CBR na Wmoldagem (kgf)		Carga do mini-CBR na Wótima (kgf)	
	MCT	Pedológica					após 24h de imersão	imediate	2,0mm	2,5mm	2,0mm	2,5mm
37	LG'	LV	24,00	23,71	1,670	1,633	14	17	104	114	104	114
38	LG'	LE	24,90	24,91	1,630	1,600	22	23	39	43	29	35
39	LG'	LR	23,35	23,02	1,728	1,703	12	23	67	74	63	70
42	LG'	LR	22,10	21,90	1,780	1,765	16	30	23	23	23	23
44	LG'	LR	17,66	17,84	1,860	1,831	25	30	38	36	38	37
49	LG'	LR	23,96	23,51	1,669	1,660	23	27	30	33	30	33
52	LG'	LV	21,50	21,23	1,758	1,725	19	30	72	79	72	79
53	LG'	LV	13,30	12,85	1,940	1,871	39	48	115	125	115	123
58	LG'	LR	13,20	13,14	2,025	1,988	17	36	32	36	30	35
60	LG'	LV	11,76	11,96	1,960	1,919	42	71	116	126	118	130
71	LG'	LV	14,24	14,11	1,893	1,866	29	33	77	88	74	84
74	LG'	LV	17,00	16,79	1,760	1,799	28	31	85	97	83	95
75	LG'	LV	13,30	13,16	1,965	1,931	30	33	79	88	79	88
78	LG'	LV	12,11	12,04	2,031	1,992	28	31	41	50	40	49
91	LG'	LV	14,01	13,88	1,680	1,691	11	20	42	44	42	44
92	LG'	TE	15,40	15,57	1,790	1,808	15	23	38	45	37	43
93	LG'	LR	20,08	20,22	1,500	1,522	7	11	49	55	51	58
94	LG'	LE	26,00	25,87	1,582	1,621	9	16	32	37	25	32
22	NA	AQ	4,36	4,41	1,810	1,817	18	26	31	33	35	37
26	NA	AQ	8,45	8,08	2,007	1,962	17	23	30	38	35	42
68	NA	AQ	4,25	4,38	1,965	1,944	16	20	37	39	37	39
69	NA	AQ	5,50	5,39	1,974	1,942	14	15	49	51	49	51
6	NA'	LE	13,67	13,33	1,912	1,864	24	26	53	61	53	61
11	NA'	LE	16,70	16,65	1,825	1,801	35	55	17	19	17	19
19	NA'	Li	13,82	13,23	1,971	1,931	25	34	7	10	5	8
40	NA'	LE	12,00	11,99	1,980	1,923	20	33	35	38	31	34
51	NA'	AQ	6,00	6,20	2,045	2,022	25	28	66	74	63	70
63	NA'	LE	7,80	7,92	1,966	1,900	20	41	16	17	15	15

ANEXO E - Relação dos Resultados Obtidos nos Ensaio de mini-CBR para Energia Intermediária de Compactação

Amostras	Classificação		W ótima (%)	W moldagem (%)	γ máxima (g/cm³)	γ moldagem (g/cm³)	Valor de mini-CBR (%)		Carga do mini-CBR na Wmoldagem (kgf)		Carga do mini-CBR na Wótima (kgf)	
	MCT	Pedológica					após 24h de imersão	imediato	2,0mm	2,5mm	2,0mm	2,5mm
23	NG'	LV	12,73	12,35	1,943	1,913	26	53	72	82	77	86
29	NG'	PV	18,72	19,01	1,782	1,742	29	52	64	75	67	79
43	NS'	Li	14,00	14,01	1,788	1,740	23	40	-	-	-	-
86	NS'	LR	6,45	6,32	1,792	1,739	6	10	7	8	7	7
87	NS'	PV	6,20	6,37	1,803	1,764	13	30	8	11	7	9
89	NS'	Li	5,01	5,04	1,701	1,677	8	15	33	35	33	35