

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DIEGO PEREIRA EMÍLIO

**ESTUDOS SOBRE SOLOS LATERÍTICOS PARA
PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA METODOLOGIA MCT**

ANÁPOLIS / GO

2015

DIEGO PEREIRA EMÍLIO

**ESTUDOS SOBRE SOLOS LATERÍDICOS PARA
PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA METODOLOGIA MCT**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: BENJAMIM JORGE RODRIGUES DOS
SANTOS**

ANÁPOLIS / GO: 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

EMÍLIO, DIEGO PEREIRA.

Estudos sobre solos lateríticos para pavimentação através da metodologia MCT

57P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2015).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Solos lateríticos

2. Ensaio laboratoriais

3. Pavimentação

4. Mecânica dos solos

I. ENC/UNI

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

EMÍLIO, D. P. Estudos sobre solos lateríticos para pavimentação através da metodologia MCT. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 57P. 2015.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Diego Pereira Emílio

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudos sobre solos lateríticos para pavimentação através da metodologia MCT

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2015

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

Diego Pereira Emílio

E-mail: diego_emilio@hotmail.com

DIEGO PEREIRA EMÍLIO

**ESTUDOS SOBRE SOLOS LATERÍTICOS PARA
PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA METODOLOGIA MCT**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:

**BENJAMIM JORGE RODRIGUES DOS SANTOS, Doutor (UniEvangélica)
(ORIENTADOR)**

**ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestra (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANDRÉA LÚCIO QUEIROZ, Especialista (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 26 de NOVEMBRO de 2015.

À minha família: Cleiber, Elza e Augusto.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser tão bom comigo, e pela oportunidade de contribuir de alguma forma para a sociedade e para meu próprio crescimento.

Aos meus pais e meu irmão, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem, em todas as etapas da minha vida.

À minha namorada, Taísa, meu porto seguro, pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos meus colegas (e amigos) inseparáveis: Júnior, Daniella e Tayssa, pelo companherismo de sempre e por dividir comigo esses anos de dificuldades e alegrias.

À minha vó Terezinha, Americano do Brasil, Sebastião, Alarme, e todos os amigos que me apoiam e me acompanham sempre, apesar de não pertencerem mais ao número dos vivos.

À MEAB, minha segunda família, pelos incontáveis momentos de alegria e aprendizado, e por me ajudarem a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Aos meus melhores amigos, Paulo, Igor, Aurélio, Rogger, Jeanne, Júlia e Lawanda, por tudo que já fizeram e fazem por mim.

“Na vida, não importa tanto o que temos, nem tanto o que somos. Vale o que realizamos com aquilo que possuímos e, acima de tudo, importa o que fazemos de nós!” – Chico Xavier

RESUMO

O presente trabalho analisa o comportamento mecânico de solos lateríticos para uso em pavimentação, através da Metodologia MCT (Miniatura compactada tropical), desenvolvida por Villibor e Nogami. O estudo sobre os solos lateríticos começou com o Plano de Pavimentação, nas décadas de 50 e 60, com o governo Jânio Quadros, quando houve-se uma necessidade de utilizar métodos mais econômicos que os tradicionais. Os ensaios tradicionais não se mostravam eficientes para solos tropicais, por esse motivo foi desenvolvida a sistemática MCT, com ensaios específicos para esses tipos de solo, e a classificação MCT. Esses ensaios determinam a capacidade de suporte, permeabilidade do solo, curva de compactação, contração, perda de massa por imersão, entre outros. Os ensaios apresentados no trabalho encontram-se na obra Pavimentos Econômicos (2009), que é um resumo de vários estudos sobre solos lateríticos desenvolvidos por Villibor e Nogami. A análise dos resultados mostra que os solos de comportamento lateríticos são mais eficientes que os solos de comportamento não laterítico, pois apresentam peculiaridades como: capacidade de suporte mais elevada, baixa expansibilidade, baixa permeabilidade e maior contração axial, que são requisitos necessários para a escolha do solo para pavimentação.

Palavras-chave: Solos lateríticos. Metodologia MCT.

ABSTRACT

This paper analyzes the mechanical behavior of lateritic soils for use in paving through the MCT Methodology (tropical compressed thumbnail), developed by Villibor and Nogami. The study on lateritic soils began with the Plano de Pavimentação, in the 50s and 60s, with the government Quadros, when there is a need to use more economical than traditional methods. Traditional tests showed not efficient for tropical soils, therefore was developed systematic MCT, with specific tests for these soil types and classification MCT. These tests determine the carrying capacity, soil permeability, compaction curve, contraction, mass loss by immersion, among others. Assays presented in the study are in the works Pavimentos Econômicos (2009), which is a summary of several studies on lateritic soils developed by Villibor and Nogami. The analysis shows that the lateritic behavior soils are more efficient than non-lateritic soils that have peculiarities as higher bearing capacity, low expansion, low permeability and increased axial contraction, which are necessary requirements for choice soil paving.

Keywords: Lateritic Soil. MCT methodology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil Esquemático de Ocorrência de Solos em Ambiente Tropical	19
Figura 2 – Corte rodoviário, com uma camada laterítica sobrejacente e uma camada saprolítica subjacente, e suas microestruturas	19
Figura 3 – Incidência de solos de comportamento laterítico no Brasil	21
Figura 4 – Jazida de solo de comportamento laterítico	22
Figura 5 – Programa Interlaboratorial: valores de LL e IP de 3 amostras	27
Figura 6 – Microfábrica do solo L, aumento 10.000X	35
Figura 7 – Microfábrica do solo N, aumento 10.000X	35
Figura 8 – Figura 8: Relação RIS, em função da porcentagem que passa na peneira 0,075 mm	37
Figura 9 – Posição dos solos no gráfico classificatório MCT	38
Figura 10 – Exemplo de curvas de deformabilidade obtidas através do ensaio Mini-MCV	39
Figura 11 – Esquema comparativo dos aparelhos de compactação	41
Figura 12 – Compactador Miniatura	42
Figura 13 – Macaco mecânico e corpo de prova imerso em água	43
Figura 14 – Esquema de montagem para ensaio de contração	44
Figura 15 – Esquema de montagem para Ensaio de Infiltrabilidade	45
Figura 16 – Montagem para Ensaio de Permeabilidade	46
Figura 17 – Esquema de Ensaio de Penetração Betuminosa	47
Figura 18 – Penetrômetro	48
Figura 19 – Ensaio de Perda de Massa por Imersão	50
Figura 20 – Resultado de dois solos compostos, na energia Intermediária	51
Figura 21 – Gráfico resumo dos solos compostos	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de resultados de LL, LP e IP (%) em ensaios de 5 amostras de SAFL	29
Tabela 2 – Variação do CBR segundo Peltier, Souza Pinto e Nogami	30
Tabela 3: Características dos solos L e N, que forneceram as frações da 1ª série de amostras (solos compostos)	34
Tabela 4 – Resultados da fração fina dos solos L e N	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaio e determinações da Sistemática MCT, e também suas associações com as propriedades físicas das bases de SAFL e com os principais problemas e defeitos construtivos dessas bases	31
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo;
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte;
c'	Coeficiente de deformabilidade da Classificação MCT;
CBR	Califórnia Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia);
CFT	Cota Final de Terraplanagem;
Cp	Corpo de Prova;
Ct	Contração Axial;
Ff	Fração Fina;
Fg	Fração Grossa;
HBR	Highway Research Board;
Ho	Umidade ótima de compactação;
IP	Índice de Plasticidade;
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
ISSMEF	Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações;
K	Coeficiente de Permeabilidade;
LL	Limite de Liquidez;
MCT	Miniatura Compactada Tropical;
MEAS	Massa Específica Aparente Seca;
Mini-MCV	Ensaio MCV ou valor de MCV da Metodologia MCV;
Pi	Coeficiente que caracteriza a perda de massa por imersão, na Classificação MCT;
S	Coeficiente de Sorção;
SAFL	Solo Arenoso Fino Laterítico;
USCS	Unified Soil Classification System;
VDM	Volume Diário Médio.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo geral	16
1.3.2 Objetivo específico	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 SOLOS TROPICAIS	18
2.1.1 Conceituação	18
2.1.2 Solos de comportamento laterítico	20
2.1.2.1 Conceituação	20
2.1.2.2 Solos lateríticos em pavimentação	22
2.1.3 Solos de comportamento não laterítico	24
2.2 PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO	25
2.3 METODOLOGIA PARA SOLOS LATERÍTICOS	26
2.3.1 Dificuldades das metodologias tradicionais	26
2.3.1.1 Introdução	26
2.3.1.2 Limites de consistência	26
2.3.1.3 Ensaio de CBR	28
2.3.2 Metodologia MCT	29
3 PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM A SISTEMÁTICA MCT	33
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	33
3.2 DIFERENÇAS DE PROPRIEDADES ENTRE SOLOS DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO E NÃO LATERÍTICO	33
3.3 PREPARAÇÃO DOS SOLOS COMPOSTOS E ENSAIOS	36
3.4 VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO LATERÍTICO DO SOLO	36
3.4.1 Método utilizado na MCT	36
3.4.2 Método utilizado pelo DNIT	40
4 ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT	41

4.1 INTRODUÇÃO	41
4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO MINI-PROCTOR E MINI MCV	42
4.2.1 Características	42
4.2.2 Aparelhagem	42
4.2.3 Aplicações dos Resultados	43
4.3 ENSAIO MINI-CBR E EXPANSÃO	43
4.3.1 Características	43
4.3.2 Aparelhagem	43
4.3.3 Aplicações dos Resultados	44
4.4 ENSAIO DE CONTRAÇÃO	44
4.4.1 Características	44
4.4.2 Aparelhagem	44
4.4.3 Aplicações dos Resultados	45
4.5 ENSAIO DE INFILTRABILIDADE	45
4.5.1 Características	45
4.5.2 Aparelhagem	45
4.5.3 Aplicações dos Resultados	45
4.6 ENSAIO DE PERMEABILIDADE	46
4.6.1 Características	46
4.6.2 Aparelhagem	46
4.6.3 Aplicações dos Resultados	47
4.7 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DA IMPRIMADURA BETUMINOSA	47
4.7.1 Características	47
4.7.2 Aparelhagem	47
4.7.3 Aplicações dos Resultados	47
4.8 ENSAIO DE MINI-CBR DE CAMPO POR PENETRAÇÃO DINÂMICA	48
4.8.1 Características	48
4.8.2 Aparelhagem	48
4.8.3 Aplicações dos Resultados	49
4.9 ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO	49
4.9.1 Características	49
4.9.2 Aparelhagem	50
4.9.3 Aplicações dos Resultados	50

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS	51
5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	51
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
5.2.1 Capacidade de Suporte de Expansão	53
5.2.2 Características de Compactação	53
5.2.3 Contração Axial	54
5.2.4 Coeficientes de Sorção d'água e de Permeabilidade	54
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A relação entre qualidade e custo é a maior preocupação da Engenharia Civil. E se tratando de rodovias, não é diferente. Os engenheiros buscam sempre o melhor solo para atender as normas com um baixo custo. Assim, após pesquisas e análises do comportamento dos mais variados tipos de solos, descobriram um solo bastante útil aos interesses da engenharia rodoviária: os solos lateríticos.

Os solos lateríticos são um tipo de solo tropical, e cobrem grande parte do Brasil. Segundo o Committee on Tropical Soils of ISSMFE (1985) *apud* Nogami e Villibor (1995) o solo tropical é aquele que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação de processos geológicos e/ou pedológicos nos solos, típicos das regiões tropicais úmidas.

No início da década de 70, graças ao bom desempenho de bases executadas com solos locais, houve um incremento no emprego da tecnologia de pavimentação de baixo custo, por meio de um programa de estradas vicinais desenvolvido pelo DER/SP. Os solos locais utilizados para bases de pavimentos, existentes em grande parte do interior do estado de São Paulo, são solos arenosos lateríticos de granulação fina, denominados Solos Arenosos Finos Lateríticos (SAFL) (VILLIBOR, 2007).

A denominação de lateríticos se incorporou à terminologia dos engenheiros, apesar de não ser mais usada nas classificações pedológicas. Os solos lateríticos têm sua fração argila constituída predominantemente de minerais cauliníticos e apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, por isso sua peculiar coloração avermelhada (PINTO, 2006).

Os solos lateríticos, quando compactados, garantem uma elevada resistência. Além disso, segundo Villibor (2000) o uso de solos lateríticos em pavimentação tem garantido às obras vantagens como: deflexões pequenas, ausência ou baixa incidência de ruptura da base, entre outras.

Por esses motivos, os solos lateríticos têm se mostrado bastante úteis na aplicação em pavimentos. O pavimento é um sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre o subleito, um semi-espaço infinito que exerce a função de fundação da estrutura (Senço, 2007).

1.2 JUSTIFICATIVA

Pavimentação significa o fim da convivência diária com os adventos dos efeitos climáticos, onde ora os moradores convivem com a poeira, ora com a lama. O pó, além do incômodo da sujeira, pode intensificar problemas respiratórios. No período de chuvas as estradas sofrem com o tráfego, possíveis erosões, o que pode resultar até mesmo trechos intransitáveis, comprometendo a locomoção dos moradores das pequenas comunidades e do escoamento do pequeno produtor, além de dificultar enormemente o acesso dos alunos às escolas (MENDES, 2010).

Segundo Villibor (2007) o desenvolvimento de pavimentos regionalizados e com tecnologia nacional, é de suma importância, devido à grande extensão do território brasileiro, aos diferentes tipos de solos que ocorrem no país, às condições climáticas típicas de ambientes tropicais, ao grande déficit de pavimentos a serem implantados e, principalmente, à escassez de recursos financeiros.

Portanto, além da óbvia importância de se pavimentar as estradas, há uma grande importância em se utilizar solos locais, como citado acima. Por estes motivos, foi escolhido esse tema para o trabalho.

1.3 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é provar que os solos lateríticos atendem os requisitos necessários para a execução de uma pavimentação satisfatória. Mostrar que eles são uma escolha bastante interessante na construção de pavimentos no Brasil, devido às suas propriedades e baixo custo.

1.2.2 Objetivos específicos

a) apresentar a conceituação dos solos tropicais, através de revisão bibliográfica, focando os solos lateríticos.

b) analisar esses solos quanto às suas características, funcionalidades e peculiaridades, através da metodologia MCT.

c) observar os resultados e verificar se atendem as necessidades de Engenharia Rodoviária propostas no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS TROPICAIS

2.1.1 Conceituação

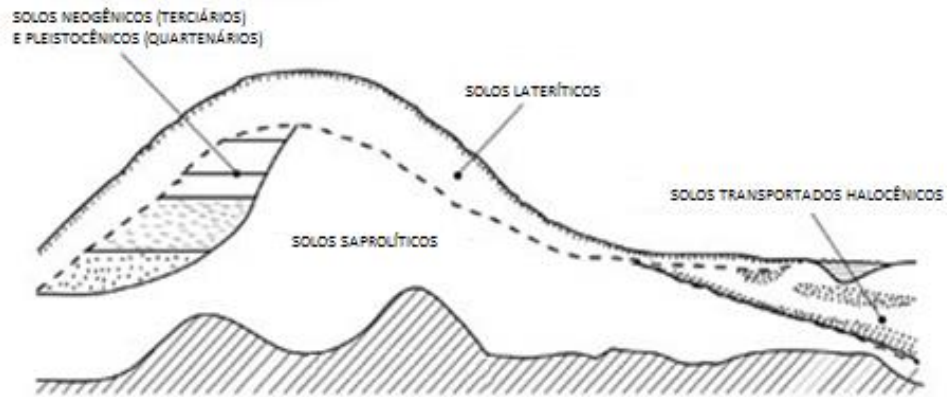
Solo é um material natural não consolidado, isto é, constituído de grãos que podem ser separados por processos mecânicos e hidráulicos relativamente suaves, como dispersão em água com uso de aparelho dispersor de laboratório, e que podem também ser escavados com aparelhos comuns de terraplanagem. Constitui a parte mais superficial da crosta terrestre (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Os solos das regiões tropicais apresentam uma série de peculiaridades decorrente das condições ambientais, por esse motivo, é necessário se conceituar os solos Peculiares Tropicais, ou seja, os tipos genéticos de solos encontrados em regiões tropicais (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

Neste trabalho adotou-se o conceito de Solos Tropicais frequentemente adotado em pesquisas de pavimentação e descrito pelo Committee on Tropical Soils of ISSMFE (1985) e por Nogami e Villibor (1995). Segundo os autores citados, Solos Tropicais são aqueles que apresentam comportamento e peculiaridades decorrentes da atuação de processos geológicos e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas. Assim, para que um solo seja considerado tropical, não basta que tenha sido formado em regiões de clima tropical úmido, é necessário que apresente peculiaridades de interesse geológico. Essa definição é essencialmente tecnológica, e não necessariamente científica. Dentre os solos tropicais, destacam-se duas grandes classes: os solos de comportamento laterítico e os solos de comportamento não laterítico.

Ainda segundo Villibor e Nogami (2009), são encontrados em regiões tropicais os seguintes solos: lateríticos, saprolíticos e transportados. A Figura 1 mostra um perfil esquemático da ocorrência destes solos.

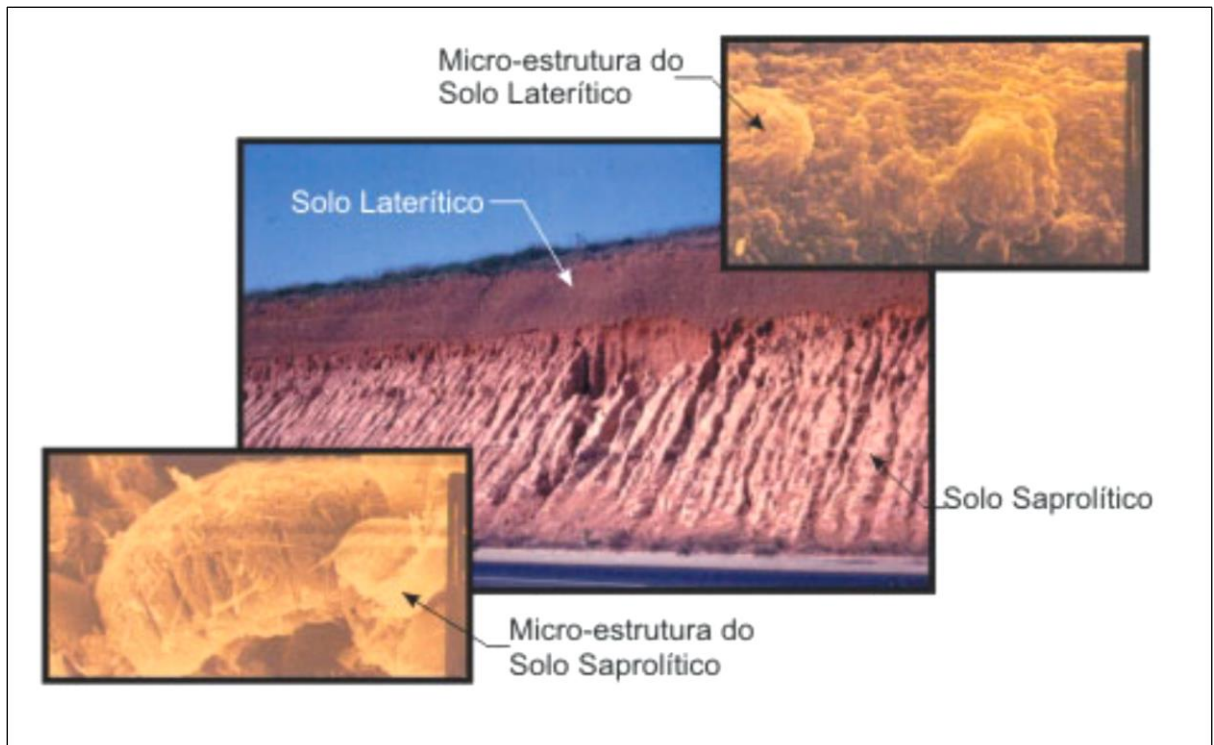
FIGURA 1 – Perfil Esquemático de Ocorrência de Solos em Ambiente Tropical



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2007.

Para melhor entendimento prático, a obra citada mostra também um corte feito em uma rodovia (Figura 2), onde se pode observar a camada superficial de solo laterítico e a camada subjacente de solo saprolítico, assim como suas respectivas microfábricas.

FIGURA 2 – Corte rodoviário, com uma camada laterítica sobrejacente e uma camada saprolítica subjacente, e suas microestruturas



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2007.

2.1.2 Solos de comportamento laterítico

2.1.2.1 Conceituação

Os solos lateríticos (later, do latim: tijolo) são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação por processo denominado laterização, da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo. Várias peculiaridades se associam ao processo de laterização, sendo que as mais importantes, do ponto de vista tecnológico, são o enriquecimento no solo de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a permanência da caulinita como argila-mineral predominante e quase sempre exclusivo. Os minerais citados proporcionam ao solo de comportamento laterítico a cor típica: vermelho, amarelo, marrom e alaranjado (VILLIBOR, 2007).

Segundo Nogami (1995), solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais translocados), de perfis bem drenados, desenvolvidos sob atuação de clima tropical úmido. Possuem sua fração argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinas e de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio, o que confere à estrutura poros e agregações altamente estáveis. Estes solos têm tendência a possuírem uma grande parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro, e em alguns locais podem apresentar, inseridos na sua constituição, pedregulhos lateríticos denominados de laterita, que são massas consolidadas, maciças ou porosas, de mesma mineralogia dos solos lateríticos e que tem sido aproveitados como materiais de construção rodoviária.

Os solos superficiais lateríticos uma mineralogia relativamente simples. O quartzo é um mineral encontrado quase sempre predominantemente na fração areia e pedregulho desses solos, como também acontece em solos não tropicais. Outros minerais resistentes à ação de intempéries podem ocorrer também nesses solos. Destacam-se dentre eles, genericamente designados, os minerais pesados, dos quais são encontrados com maior frequência: magnetita, ilmenita, rutilo, turmalina, zircão etc. Um mineral que também ocorre com frequência nos solos superficiais lateríticos, principalmente na fração pedregulho, é a laterita ou concreção laterítica, constituída essencialmente de óxidos hidratados de ferro e de alumínio (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Os solos lateríticos estão presentes na maior parte do Brasil. A Figura 3, que é encontrada no livro Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas, Villibor (2007), mostra as áreas de incidência destes solos.

FIGURA 3 – Incidência de solos de comportamento laterítico no Brasil



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2007.

Um solo pode ter comportamento laterítico sem pertencer a um perfil pedológico laterítico e eventualmente, pode pertencer a um perfil pedológico laterítico e não ter comportamento geotécnico laterítico (NOGAMI & VILLIBOR, 1983).

Para a finalidade deste trabalho, será considerado solo laterítico do modo que é considerado por Villibor e Nogami (2009), que considera-o como solo de comportamento geotécnico laterítico. Consequentemente, é caracterizado por possuir uma série de propriedades que levam a classificá-lo como solo de comportamento laterítico, segundo a Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).

A elevada porosidade natural, a baixa resistência e a baixa capacidade de suporte são características desses solos. Entretanto, quando corretamente compactados adquirem elevadas

resistências, grande capacidade de suporte, baixa permeabilidade, além da pequena perda da capacidade de suporte quando imerso em água. A maioria desses solos apresentam em seu estado natural, baixa plasticidade, coeficientes de permeabilidade e ângulos de atrito elevados (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Para melhor visualização a Figura 4, logo abaixo, mostra uma jazida de solo laterítico. Pode-se observar a cor alaranjada característica deste tipo de solo.

Figura 4 – Jazida de solo de comportamento laterítico



Fonte: Próprio Autor, 2013.

2.1.2.2 Solos lateríticos em pavimentação

A execução do Plano de Pavimentação 56/60, do governo Jânio Quadros, foi um marco notável no desenvolvimento de uma tecnologia de pavimentação mais adaptada aos solos e condições tropicais do Brasil. Esse Plano propiciou uma abertura sem precedentes no Estado de São Paulo, quanto a tipos de camadas de pavimentos. Até então, as bases rodoviárias eram constituídas quase que exclusivamente de macadame hidráulico ou betuminoso e revestimento

betuminoso do tipo usinado a quente. Durante o Plano, deu-se prioridade a pavimentos de menor custo, que incluem bases de solo-cimento, bases estabilizadas granulometricamente, revestimentos do tipo tratamento superficial e reforço do subleito, com uso de solos lateríticos arenosos ou argilosos. No uso de bases estabilizadas granulometricamente e no reforço do subleito, foram permitidas tolerâncias consideráveis aos valores das propriedades índices tradicionais (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Segundo Villibor e Nogami (1990 e 1995) o engenheiro Francisco Pacheco e Silva do IPT foi o primeiro especialista em Mecânica dos Solos a valorizar a elevada capacidade de suporte e baixa expansibilidade das argilas lateríticas, coordenando a construção de trechos experimentais com bases de argila vermelha compactada e selada com pintura betuminosa. O desempenho dessa base foi excepcional comparado às bases de pedra britada, muita utilizada na época.

O excelente desempenho apresentado por trechos experimentais de pavimentos constituídos de solo arenoso fino laterítico como base comprovou, no final da década de 1960 e início da década de 1970, as limitações dos critérios tradicionais para escolha de solos, quando aplicados a solos tropicais. As metodologias tradicionais consideravam os solos arenosos finos lateríticos inadequados para a construção de pavimentos, o que contraria os resultados obtidos com trechos experimentais. Tornou-se evidente a necessidade do uso de novos critérios de escolha que pudessem ser aplicados aos solos tropicais, devendo estes estarem relacionados com as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados (VILLIBOR, 1981).

Os solos arenosos finos lateríticos (SAFL) foram utilizados pela primeira vez em 1967 em dois trechos como variantes de trânsito na via Washington Luís (SP-310), nas proximidades de Araraquara, no interior do estado de São Paulo. Essas variantes foram revestidas de tratamento superficial simples e teriam que funcionar apenas por 3 meses e meio, até a construção do trecho definitivo. Mas após o término desse prazo, constatou-se que as variantes estavam em perfeitas condições, fato que incentivou a construção de novos trechos experimentais com o uso do tipo de base considerada (CORRÊA, VILLIBOR & GRANDE, 1972).

Segundo Nogami e Villibor (1983) as argilas lateríticas quando comparadas com as argilas de climas frios e temperados, apresentam menos problemas nas construções rodoviárias, isto porque são menos expansivas e menos susceptíveis a perder a resistência em contato com a água. Além disso, em clima tropical úmido, a elevada pluviosidade, a evotranspiração também desempenha um papel importante. Em muitos ambientes tropicais, o teor de umidade da base não aumenta além da umidade ótima de compactação. Outra peculiaridade é o fato de

que o uso de energias elevadas de compactação não ocasiona problemas, no que se refere à possível expansão, quando a argila é posta em contato com água livre.

A observação do comportamento dos pavimentos rodoviários com base de SAFL, construídos no Estado de São Paulo, constatou que essa solução superou, e muito, as expectativas. Os primeiros trechos pavimentados em estradas, projetados para vida útil de 3 anos, após 6 anos de utilização apresentaram comportamento altamente satisfatório, sem terem sofrido recapeamento ou recuperação maior (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

Segundo Villibor (2007), para o emprego de solos lateríticos em pavimentos urbanos, tanto o projeto geométrico quanto o de drenagem devem atender às características técnicas apresentadas a seguir:

- a) obrigatoriedade de execução de guias e sarjetas;
- b) perfil longitudinal com declividade mínima de 1% e máxima de 8%;
- c) seção transversal com declividade entre 3 a 4%;
- d) exigência de execução do passeio, preferencialmente com revestimento de concreto, para evitar infiltração d'água por trás das guias e sarjetas;
- e) execução de um sistema eficiente de captação de águas pluviais e servidas, evitando o acúmulo de água em pontos baixos;
- f) execução de drenagem profunda para rebaixamento do lençol freático a, pelo menos, 1,50 m em relação à CFT.

2.1.3 Solos de comportamento não laterítico

Estes solos possuem grandes quantidades de silte, mas que se apresentam diferentemente dos siltes típicos dos solos das regiões de clima temperado (constituídos de partículas inertes). Contêm macrocristais de caulinita e mica, apresentando plasticidade mesmo sem possuir partículas de argila, entretanto, muitos solos de comportamento não laterítico podem possuir o quartzo como material predominante. Há também a possibilidade destes solos possuírem grãos intemperizados com diferentes graus de intemperização (VIANA, 2007).

Segundo Nogami e Villibor (1995) os solos de comportamento não laterítico constituem, em condições naturais, as camadas subjacentes às lateríticas, com espessuras que podem atingir dezenas de metros. Sua aparência macroscópica é, em geral, caracterizada pela presença de camadas, xistosidades e vazios, que em grande parte foram herdadas da rocha matriz. Sua composição mineralógica é muito variada podendo constatar-se a presença de mica, acarretando efeitos como a elevação do limite de liquidez, elevação da expansibilidade por

aumento de umidade, diminuição da massa específica aparente seca máxima quando compactado, elevação da umidade ótima de compactação, diminuição da capacidade de suporte e redução no módulo de resiliência.

2.2 PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

O déficit de pavimentos urbanos é grande em quase todas as cidades brasileiras, e abrange desde vias principais de cidades de grande porte até vias de circulação de distritos e conjuntos habitacionais. No estado de São Paulo, cidades altamente desenvolvidas como a cidade de São Paulo, há aproximadamente 8 anos atrás ainda apresentava um déficit de aproximadamente 20 milhões de m², e o município de Guarulhos que, mesmo já tendo uma rede pavimentada de 2,7 milhões de m², ainda necessitava executar, pelo menos, mais 30%. Em muitas outras regiões do país a situação quanto ao déficit de pavimentos urbanos é ainda mais grave. Isso demonstra, portanto, a necessidade e a importância do desenvolvimento de uma tecnologia de pavimentação que diminua os custos de implantação de pavimentos urbanos (VILLIBOR, 2007).

O sistema de pavimentação é formado por quatro camadas principais: revestimento de base asfáltica, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento pode ser composto por uma camada de rolamento e camadas intermediárias ou de ligação, dependendo da intensidade e do tipo de tráfego, do solo existente e da vida útil do projeto. Mas nos casos mais comuns, se utiliza uma única camada de mistura asfáltica como revestimento (NAKAMURA, 2011).

Segundo Villibor (2007), um pavimento é considerado de baixo custo quando:

a) utiliza bases constituídas de solos locais *in natura*, ou em misturas, com custos substancialmente inferiores às bases convencionais, tais como: brita graduada, solo-cimento, macadame hidráulico ou macadame betuminoso;

b) utiliza revestimento betuminoso esbelto do tipo tratamento superficial ou concreto betuminoso usinado a quente, com espessura de, no máximo, 3,0 cm;

c) é dimensionado para atender os tráfegos:

- urbano, de muito leve a leve;

- rodoviário, com VDM inferior a 1500 veículos, com no máximo, 30% de veículos comerciais, e com $N < 5 \times 10^6$ solicitações do eixo simples padrão de 80 KN.

Nos pavimentos rodoviários há experiências com volumes superiores ao máximo especificado; no entanto, o uso dessas bases para rodovias de tráfego pesado somente poderá

ser recomendado a partir dos resultados das pistas experimentais (faixas adicionais), já implantadas em alguns subtrechos de rodovias paulistas (Villibor, 2007).

2.3 METODOLOGIA PARA SOLOS LATERÍTICOS

2.3.1 Dificuldades da metodologias tradicionais

2.3.1.1 Introdução

Os solos são identificados e classificados, comumente, em Mecânica dos Solos, principalmente nos estudos preliminares ou nas obras de pequeno vulto, mediante a determinação de propriedades físicas fáceis de ser determinadas como: granulometria e limites de Atterberg. Essas propriedades têm sido nomeadas de propriedades índices (Vargas, 1977).

2.3.1.2 Limites de consistência

Segundo Nogami e Villibor (1995), tradicionalmente, tanto o Limite de Liquidez (LL) como o Índice de Plasticidade (IP), isoladamente ou em conjunto no Gráfico de Plasticidade (Casagrande, 1948), vêm sendo usados para verificar a variação de volume dos solos compactados, conseqüente à variação do seu teor de umidade por secagem (contração) ou por imersão em água (expansão), assim como para classificação geotécnica dos solos.

Os autores citados dizem que, para a finalidade considerada, a maioria das normas tradicionais adota um máximo de 25% para o LL e 6% para o IP. A prática, no entanto, tanto no laboratório quanto no campo, tem revelado que no caso de solos e condições ambientais tropicais, esses limites não se aplicam mais (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Villibor e Nogami (2009), citam que, dos limites de consistência, são considerados relevantes para a finalidade em vista, o LL e IP. Com a maximização dos estudos, para atender uma grande demanda por projeto e construção de pavimentos econômicos com uso de bases de SAFL, ficaram evidentes as deficiências da utilização do LL e IP devido à pequena reprodutibilidade dos resultados dos ensaios, o que tem sido confirmado em relatos de diversos trabalhos genéricos sobre solos tropicais. Entre outros, podem ser citados:

a) Gidigas (1976), em *Lateritic Soil Engineering*, diz que uma fonte de dificuldade em obter a reprodutibilidade dos resultados dos ensaios de plasticidade de alguns solos

lateríticos é a tendência que têm de apresentarem aumento de plasticidade com o grau de mistura ou moldagem de amostra, antes do ensaio.

b) Programa Internacional Brasileiro desenvolvido pelo IPT-SP. Alguns dos resultados obtidos, para 3 amostras, estão apresentados abaixo na Figura 5. A análise destes resultados revela a grande variação dos valores de LL e IP, obtidos em diversos laboratórios, em ensaios executados segundo a NBR 6459/84 e 7180/84 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

c) comparação de resultados de LL e IP obtidos pelo DER-SP e IPT, para SAFL, em ensaios executados conforme as normas citadas acima. A Tabela 1 mostra a grande variação dos resultados de 5 amostras de SAFL utilizados em bases, o que confirma o que havia sido constatado no programa do IPT.

Figura 5 – Programa Interlaboratorial: valores de LL e IP de 3 amostras

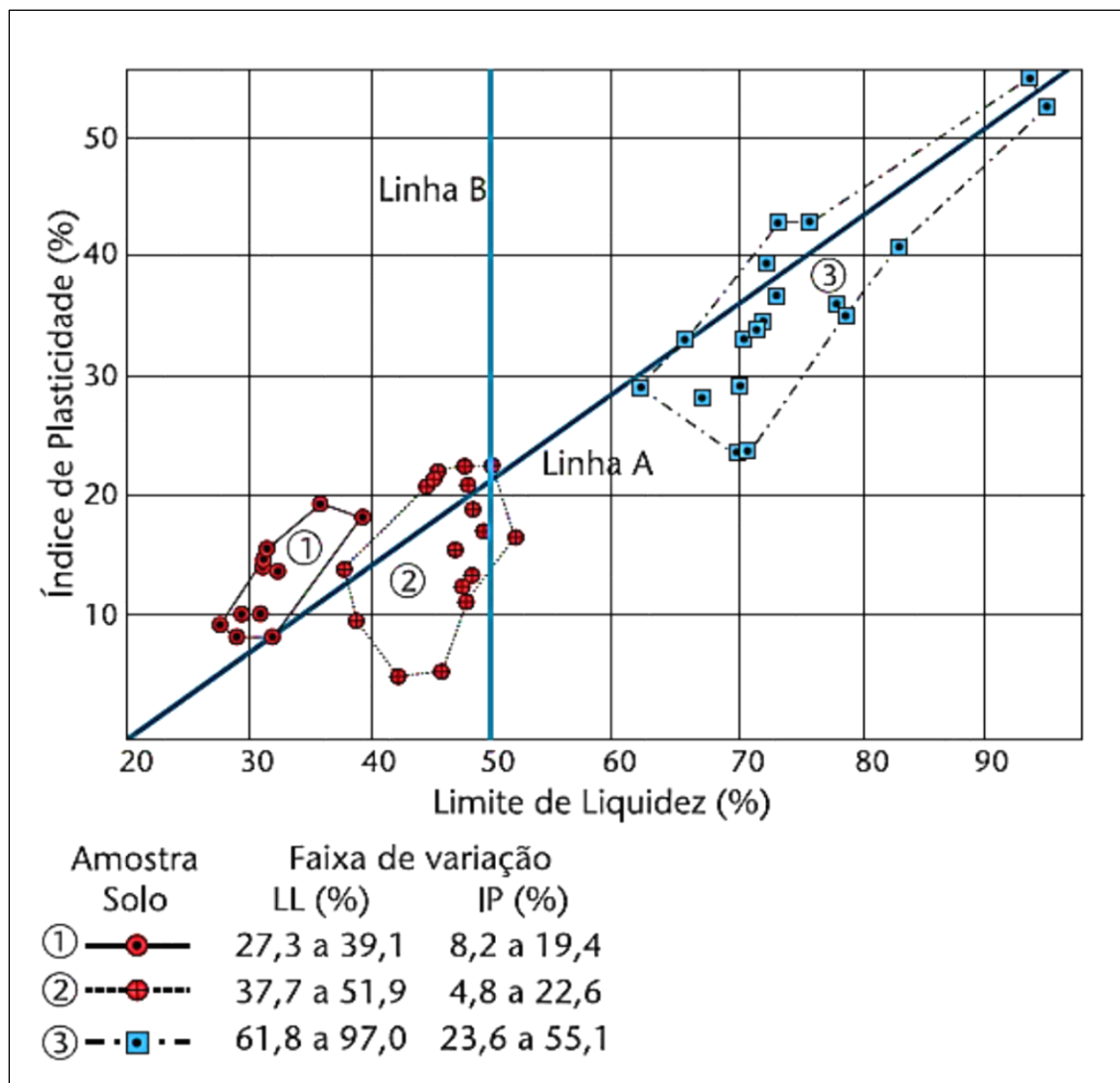


Tabela 1 – Comparação de resultados de LL, LP e IP (%) em ensaios de 5 amostras de SAFL

Laboratório Amostra	IPT-SP			DER-SP (Araraquara)		
	LL	LP	IP	LL	LP	IP
A	24	16	8	19	14	5
B	37	19	18	30	22	8
C	26	15	11	20	15	5
D	34	20	14	24	17	7

Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

Portanto, é possível a existência de solos com mesmo LL e IP, porém com expansibilidades completamente diferentes. Por esse motivo, esses índices não podem ser usados para a previsão de suas características expansivas. Analogamente, a validade do Gráfico de Plasticidade fica prejudicada, bem como as classificações geotécnicas nele baseadas, como a AASHO/HRB e a USCS (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

2.3.1.3 Ensaio de CBR

Segundo Villibor e Nogami (2009), a avaliação da capacidade de suporte e da expansão do solo para base é realizada, geralmente, pelo CBR tradicional. Os valores do índice de suporte $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,1\%$ recomendados correspondem aos encontrados nos solos das pistas experimentais, construídas pelo DER-SP. Solos que apresentaram comportamento satisfatório. Esses valores também correspondem aos limites fixados pelo DNIT para bases estabilizadas granulometricamente. A utilização do ensaio CBR tradicional apresenta uma série de problemas, entre eles, destacam-se:

a) grande dispersão de resultados. Essa dispersão foi motivo de considerações em vários trabalhos: Peltier (1953), Souza Pinto e outros (1964) e Nogami (1972). Um resumo dos resultados obtidos nesses trabalhos é apresentado na Tabela 2, que mostra que o valor máximo obtido nos ensaios, para uma mesma amostra, chega a ser 2 a 3 vezes maior que o mínimo. A dispersão é ainda maior para os SAFL, devido à grande variação do índice de suporte com o teor de umidade de moldagem de corpos de prova. Variação de 1% de umidade em torno da ótima, em certos solos, pode ocasionar uma diminuição de 50% ou mais no valor do índice de suporte (Villibor, 1974). Assim, o ensaio de CBR em um único corpo de prova, moldado para o teor de umidade correspondente à ótima, não é confiável; isto porque não apenas é difícil

acertar o teor de umidade de moldagem com a necessária precisão, como também esse teor não fica bem caracterizado na curva de compactação.

b) necessidade de uma grande quantidade de material. Como visto acima, apesar de o CBR ser exigido apenas nas condições de Massa Específica Aparente Seca máxima e Umidade ótima, essa exigência é difícil de ser satisfeita com apenas um corpo de prova. Há, portanto, necessidade de se construir a curva de variação do CBR em função de vários teores de umidade diferentes, com a moldagem de, pelo menos, 3 corpos de prova com teores de umidade em torno da ótima. Devido à dispersão dos resultados, na prática é sempre desejável aumentar para 5 o número de corpos de prova. Esse procedimento encarece consideravelmente os custos de amostragem do material, de seu transporte e dos ensaios necessários (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

Tabela 2 – Variação do CBR segundo Peltier, Souza Pinto e Nogami

Trabalho	Normas de Ensaio	Amostra	Nº de ensaios	Valor CBR (%)			Desvio Padrão
				Mín.	Máx	Méd	
Peltier (53)	Método Americano	Areia Argilosa	21	10,5	33,0	17,8	6,20
Souza Pinto ABPv (64)	DPT-M-48-64 (DNER)	D	12	26,4	38,6	29,5	6,55
	Energia Intermediária	E	12	17,3	45,8	34,6	9,40
Nogami (72)	M-53-71 (DER-SP) Energia Normal	SP-310 km 254	8	11,0	28,0	17,3	6,28

Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

2.3.2 Metodologia MCT

No fim da década de 60 e início da década de 70, as limitações dos procedimentos tradicionais para a escolha de solos para bases estabilizadas granulometricamente ficariam comprovadas, com excelente desempenho de vários trechos experimentais, executados com solos arenosos finos lateríticos. Esses solos eram considerados inapropriados, pelos critérios tradicionais. Isso levou à necessidade de desenvolver-se critérios mais apropriados, não relacionados demasiadamente à fatores pedológicos e nem a propriedades índices tradicionais, porém mais ligados a propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados. Isso culminou no desenvolvimento de uma nova metodologia, no início da década de 80, que passou

a ser denominada MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), e que inclui também uma nova classificação de solos tropicais (VILLIBOR & NOGAMI, 1984).

A Tese de Doutorado de Villibor (1981) teve a finalidade de trazer soluções com a apresentação de uma nova sistemática para o estudo tecnológico dos SAFL. Ela é baseada numa diretriz que possibilitou a obtenção de dados esclarecedores sobre as propriedades de maior interesse para o desempenho deste tipo de solo como base de pavimentos, nas condições climáticas do Brasil (VILLIBOR, 2007).

Nogami e Villibor (1980, 1985) desenvolveram a metodologia MCT, tendo em vista que nenhuma das propostas para corrigir os índices tradicionais, ou os substituir por outros mais significativos, atingiu o desejável sucesso para os solos tropicais. Essa metodologia foi iniciada com a introdução do ensaio Mini-CBR (Nogami, 1972), para solos tropicais, como base no procedimento desenvolvido pela Iowa State University (Lafleur, et al 1960) e posteriormente ampliado, principalmente para possibilitar o melhor aproveitamento de solos arenosos finos lateríticos (SAFL) em pavimentação, considerando a capacidade de suporte em várias condições e outras propriedades consideradas relevantes, como contração, infiltrabilidade e permeabilidade (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Segundo Villibor e Nogami (2009), esta Sistemática se caracteriza pela utilização de corpos de prova (cp) cilíndricos, de dimensões reduzidas, com diâmetro de 50 mm e altura igual ou próxima dessa medida, por esse motivo foram designados de “Miniatura”, com abreviação M. Como, basicamente, são obtidos em laboratório por compactação, o uso da letra C, e a Sistemática foi desenvolvida para solos tropicais, o uso da letra T, isso justifica a abreviatura MCT. Esses cp também podem ser deformados ou executados no campo *in situ*.

Apesar da efetividade pragmática da metodologia MCT ter sido comprovada pelo bom desempenho de mais de 5000 km de rodovias vicinais como base de solo arenoso fino laterítico e mais de 400 km de rodovias de tráfego pesado com base de solo laterítico com brita descontínua, a metodologia MCT apresentava dificuldades quanto à sua aplicação mais extensiva, devido ao seu caráter inédito, exigência de aparelhagem e complexidade dos ensaios envolvidos. Somente em 1993, foi possível desenvolver um método expedito, visual-tátil, que possibilita identificar os solos dos grupos da classificação MCT (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

A série de ensaios da Sistemática, que engloba os ensaios classificatórios da Metodologia MCT (M5, M8 e M9), constitui o elenco de Ensaios da Sistemática MCT, a saber:

M1 – Ensaio de Compactação Mini Proctor

M2 – Ensaio Mini-CBR e Expansão

M3 – Ensaio de Contração

M4 – Ensaios de Infiltrabilidade e Permeabilidade

M5 – Ensaio de Compactação Mini-MCV

M6 – Ensaio de Penetração da Imprimadura Betuminosa

M7 – Ensaio Mini-CBR de Campo – Procedimento Dinâmico

M8 – Ensaio da Perda de Massa por Imersão

M9 – Classificação Geotécnica MCT.

As propriedades mecânicas e hídras da base SAFL, consideradas na metodologia MCT, estão relacionadas diretamente com o desempenho do pavimento que utiliza este tipo de base. Grande parte dos defeitos dos pavimentos podem ser atribuídos a valores inadequados de uma ou mais de suas propriedades, e/ou a problemas na técnica construtiva utilizada na base (VILLIBOR & NOGAMI, 2009). O quadro abaixo mostra essa relação.

QUADRO 1 – Ensaios e determinações da Sistemática MCT, e também suas associações com as propriedades físicas das bases de SAFL e com os principais problemas e defeitos construtivos dessas bases

(continua)

Ensaios e Determinações	Fenômenos Físicos Associados	Problemas e Defeitos Construtivos
COMPACTAÇÃO Mini-Proctor (M1) Mini-MCV (M5)	Grau de compactação e afastamento do teor ótimo de compactação.	Técnica construtiva inadequada de compactação: (DE)*, lamelas, (RP)* e trincamentos excessivos.
EXPANSÃO (M2)	Aumento de volume com o aumento de teor da umidade.	Expansão elevada: (DE), (RP) e trincas no revestimento.
CONTRAÇÃO (M3)	Desenvolvimento de trincas e fissuras.	Contração elevada e/ou excesso de umidade na compactação: desagregação pelo tráfego, trincas de reflexão no revestimento e entrada excessiva d'água na base e no subleito.
INFILTRABILIDADE (M4)	Movimentação da frente de umidade, e sua quantidade de água associada, em solos não saturados; envolve consideração do coeficiente de sorção.	Amolecimento da parte superior da base, na construção, devido às chuvas. Amolecimento da borda, com (DE) e (RP). Secagem da base provocando trincas e crescimento rápido das panelas.
PERMEABILIDADE (M4)	Percolação da água em meio saturado e caracterizada pelo coeficiente de permeabilidade.	Alta permeabilidade: camada drenante, podendo ocasionar aumento excessivo do teor da umidade das camadas adjacentes, provocando (DE) e (RP).

QUADRO 1 – Ensaio e determinações da Sistemática MCT, e também suas associações com as propriedades físicas das bases de SAFL e com os principais problemas e defeitos construtivos dessas bases (conclusão)

MINI-CBR (M2)	Capacidade de suporte.	Baixa capacidade: (DE) e (RP).
PERDA DE MASSA POR IMERSÃO (M8)	Avaliação da erodibilidade do solo.	Elevada perda de massa: erodibilidade das bordas da base e do acostamento.
PENETRAÇÃO DA IMPRIMADURA (M6)	Espessura e quantidade de material betuminoso penetrado.	Dosagem inadequada da imprimadura: Escorregamento do revestimento e exsudação de asfalto na superfície.
MINI-CBR <i>in situ</i> (M7)	Capacidade de suporte em serviço.	Baixa capacidade: (DE) e (RP).
$\text{RELAÇÃO RIS} = \frac{\text{Mini-CBR}_{\text{is}}}{\text{Mini-CBR}_{\text{Ho}}} \times 100$	Sensibilidade do suporte (em %) de um solo compactado nas condições: sem e com imersão.	Queda do valor de suporte: deformação da base, na construção, devido às chuvas, (DE) na borda do pavimento devido à penetração lateral da água e (RP) em revestimentos permeáveis.
Abreviaturas: (DE) = Deformação excessiva do pavimento; (RP) = Ruptura do pavimento Mini-CBR _{is} = Mini-CBR imerso, sem sobrecarga Mini-CBR _{Ho} = Mini-CBR na umidade ótima de compactação		

Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

3 PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM A SISTEMÁTICA MCT

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Foram desenvolvidos, utilizando principalmente a Sistemática MCT, estudos de campo e pesquisas em laboratório sobre diversas amostras de solos de comportamento laterítico (L) e não laterítico (N). Os dados obtidos proporcionaram a obtenção de um maior conhecimento científico das propriedades dos solos referidos. Isso permitiu que fosse proposto um critério de escolha de jazidas de solo, para uso em bases de SAFL, a partir de intervalos de valores admissíveis de suas propriedades mecânicas e hídricas, além de dar subsídios à técnica construtiva das bases e da sua imprimadura impermeabilizante (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

Esta pesquisa visou estudar as peculiaridades dos solos de comportamento laterítico, em relação aos não laterítico, de interesse para a pavimentação, que apresentam propriedades índices similares. Os gráficos e conclusões, resultantes desta pesquisa, foram utilizados por Nogami e Villibor (1980, 1995 e 2009).

3.2 DIFERENÇAS DE PROPRIEDADES ENTRE SOLOS DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO E NÃO LATERÍTICO

Para o desenvolvimento da pesquisa foram executados ensaios, obedecendo à sistemática MCT, sobre duas séries de amostras. 1ª série: amostras compostas em laboratório, sendo um grupo constituído de frações provenientes de um SAFL (L), e o outro, de um solo Saprolítico (N) derivado do intemperismo do granito. 2ª série: amostras naturais, sendo um grupo constituídos de solos L e outro, de solos N. Os ensaios foram realizados no laboratório de Araraquara e central de São Paulo, do DER-SP, com a supervisão de Nogami e Villibor, e sob a orientação dos técnicos Sérgio T. Bugni, Salvador de Almeida, Antônio C. Gigante e Edson de Moura (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

Os dados referentes aos locais de amostragem e demais características de interesse geotécnico dos solos L e N, que forneceram as frações utilizadas, são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Características dos solos L e N, que forneceram as frações da 1ª série de amostras (solos compostos)

Características	SAFL (L)		SAPROLÍTICO (N)	
Ocorrência do solo	Rodovia/Local			
Distribuição granulométrica	SP-255 km 63 + 4,00 LD		SP-10 km 17 (Corte)	
Areia: $0,075 < \emptyset < 2,00$ mm	64 %		40 %	
Silte: $0,005 < \emptyset < 0,075$ mm	6 %		50 %	
Argila: $\emptyset < 0,005$ mm	30 %		10 %	
Arredondamento da fração areia (medidas em [mm])	Frações (para 400 partículas)			
	2,00-0,25	0,25-0,062	2,00-0,25	0,25-0,062
Angular e sub-angular	9,33 %	26,25 %	76,17 %	88,75 %
Sub-arredondada e arredondada	75,82 %	61,25 %	23,83 %	11,25 %
Bem arredondada	14,85 %	2,50 %	0 %	0 %
Mineralogia	Quartzo		Mica, Feldspato e Quartzo	
Areia: $0,075 < \emptyset < 2,00$ mm	Caulinita, Gibbsita, Magnetita, Goetita e Quartzo		Caulinita, Haloisita, Muscovita, Magnetita, Goetita e Quartzo	
Silte: $0,005 < \emptyset < 0,075$ mm	Caulinita, Gibbsita, Magnetita e Goetita		Caolinita, Haloisita, Muscovita, Magnetita e Goetita	
Argila: $\emptyset < 0,005$ mm				
Razão Sílica Sesquióxidos (Kr) DNER – ESP 47/74	Kr = 0,97		Kr = 1,60	

Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

A figura 6 e 7 mostram as microfábricas dos solos SAFL (L) e Saprolítico (N).

a) SAFL (L): caracterizada por apresentar argilominerais aglutinados em forma de “nuvens” ou pipocas.

b) Saprolítico (N): caracterizada por apresentar argilominerais individualizados.

Figura 6 - Microfábrica do solo L, aumento 10.000X

Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

Figura 7 – Microfábrica do solo N, aumento 10.000X

Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

Segundo Villibor e Nogami (1995) existe uma grande diferença de propriedades entre os solos lateríticos e os solos saprolíticos, independentemente da posição que ocupam no Gráfico de Plasticidade ou do Grupo em que se encaixam nas classificações tradicionais. Destacam-se as seguintes diferenças:

a) os solos lateríticos apresentam perda da capacidades de suporte Mini-CBR relativamente pequena, quando comparados com a correspondente perda verificada nos solos saprolíticos, em imersão;

b) os solos lateríticos apresentam pequena expansão, fato que se verifica mesmo para variedades com limite de liquidez relativamente elevada. Os solos saprolíticos, ao contrário, podem ter elevada expansão mesmo que tenham valores relativamente baixos de limite de liquidez e índice de plasticidade;

c) os solos lateríticos que possuem índices de plasticidade próximos aos dos saprolíticos apresentam, frequentemente, contrações elevadas, apesar de apresentarem expansões e permeabilidade relativamente baixas;

d) no caso de solos lateríticos, a fração que passa na peneira 0,075 mm é predominantemente argilosa, enquanto que nos solos saprolíticos pode ser argilosa ou siltosa;

e) os grupos classificados como solo arenoso de comportamento não laterítico (NA) e solo arenoso de comportamento laterítico (LA) possuem poucas diferenças entre suas propriedades (expansão, contração e permeabilidade), no entanto o mesmo fato não pode ser verificado para solos argilosos e arenosos.

3.3 PREPARAÇÃO DOS SOLOS COMPOSTOS E ENSAIOS

Villibor e Nogami (2009) executaram, com as amostras brutas do SAFL e do solo saprolítico mostradas na Tabela 3, as seguintes operações:

a) separação do solo bruto por peneiramento, sem lavagem na peneira 0,42 mm (n° 40 ASTM) e com lavagem na peneira de 0,075 mm (n° 200 ASTM). O material, passado na peneira 40 e retido na peneira 200 foi denominado de fração grossa (Fg). O material passado na peneira 200 foi denominado fração fina (Ff). As frações obtidas, antes das misturas referidas abaixo, foram secadas ao ar e devidamente homogeneizadas.

b) Fg e Ff, foram obtidas oito combinações de misturas íntimas, com diferentes porcentagens das duas frações, denominadas solos compostos. Por exemplo: 20% da Ff e 80% da Fg.

c) como cada um dos solos compostos assim obtidos, foram compactados corpos de prova, na energia Normal, para a execução dos seguintes ensaios:

- Propriedades índices: granulometria, LL e IP, e classificação HRB-AASHTO.
- Ensaio de compactação Mini-Proctor (MEAS e Ho).
- Determinação da capacidade de suporte e expansão nas seguintes condições:
 - Mini-CBRHm (sem imersão, na umidade de moldagem e com sobrecarga).
 - Mini-CBRic e Expansão (Ec) (com 24h de imersão, com sobrecarga).
 - Mini-CBRis e Expansão (Es) (com 24h de imersão, sem sobrecarga).
- Determinação dos coeficientes de sorção (s) e de permeabilidade (k).
- Determinação da contração axial (Ct) por secagem ao ar.

3.4 VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO LATERÍTICO DO SOLO

3.4.1 Método utilizado na MCT

O critério que será mostrado foi proposto, especificamente, para verificar se um solo tem comportamento “laterítico” ou não, visando a utilização desse solo como base ou sub-base de pavimentos. Para essa finalidade, a análise dos resultados mostra que o critério poderia fundamentar-se na propriedade dos solos, de comportamento laterítico, de serem menos sensíveis à diminuição dos valores do Mini-CBR com imersão, do que os solos de comportamento não laterítico. Para isso, utiliza-se a Relação RIS, obtida na Ho e a partir de

corpos de prova compactados na energia Intermediária do Mini-Proctor, que é a utilizada na execução das bases de SAFL (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

$$\text{RIS} = \frac{\text{Mini-CBR}_{\text{is}}}{\text{Mini-CBR}_{\text{Ho}}} \times 100[\%] \quad (1)$$

Onde:

Mini-CBR_{is} = Mini-CBR com imersão em água.

Mini-CBR_{Ho} = Mini-CBR sem imersão em água.

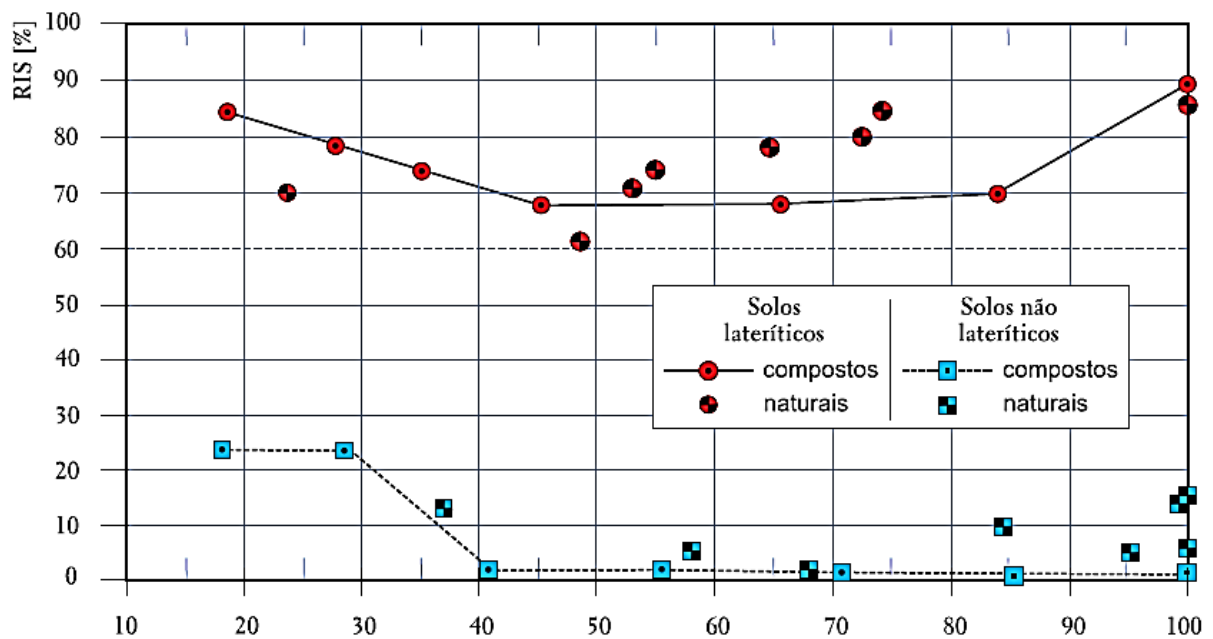
Segundo Villibor e Nogami (2009), o critério para a verificação do comportamento laterítico fica o seguinte:

Se $\text{RIS} \geq 50\%$, o solo apresenta comportamento laterítico;

Se $\text{RIS} \leq 50\%$, o solo não apresenta comportamento laterítico.

A Figura 8 mostra os valores da Relação RIS em função da porcentagem que passa na peneira 0,075 mm (fração fina), para solos de comportamento laterítico e não laterítico, compostos artificialmente e naturais.

Figura 8 – Relação RIS, em função da porcentagem que passa na peneira 0,075 mm



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

A Figura 9 mostra a posição dos solos no gráfico classificatório MCT, segundo Nogami e Villibor (1995), sendo que:

L = Laterítico;

N = Não Laterítico;

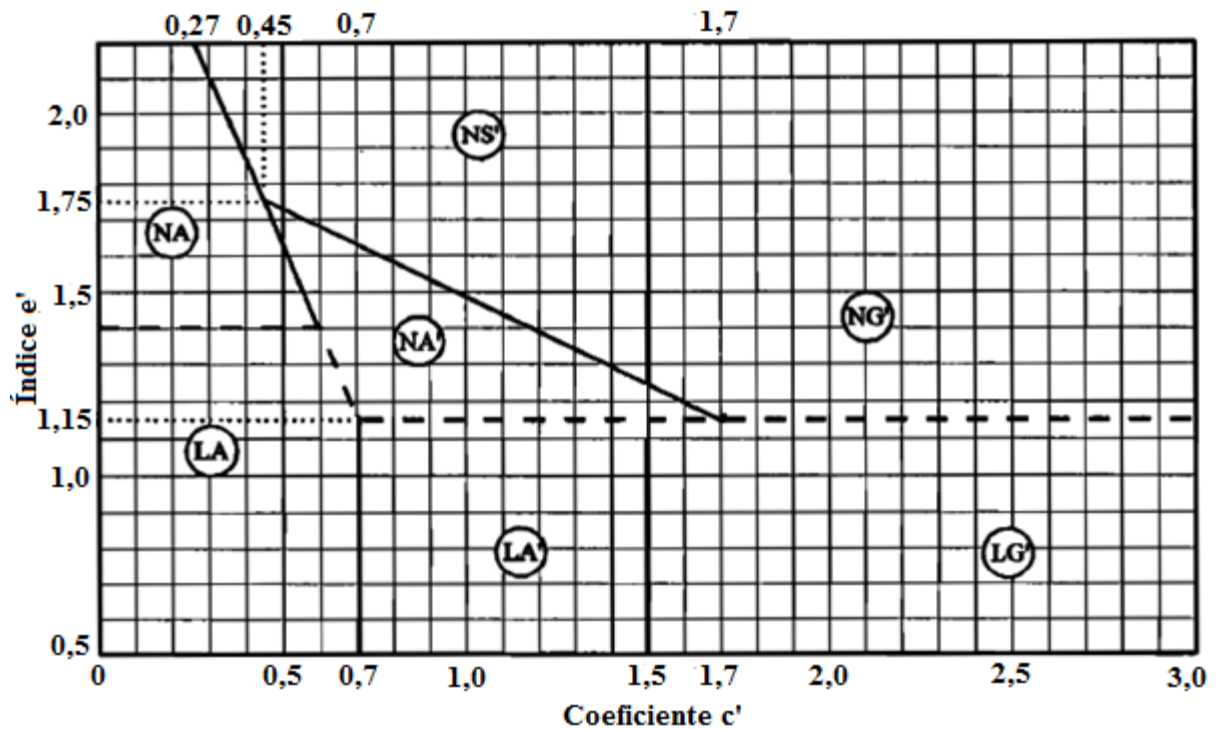
A = Areia;

A' = Arenoso;

G' = Argiloso;

S' = Siltoso.

Figura 9 – Posição dos solos no gráfico classificatório MCT



Fonte: NOGAMI E VILLIBOR, 1995.

O coeficiente c' , que é o coeficiente angular da reta assimilável à curva Mini-MCV, está ligado à granulometria do solo na compactação. Valores baixos de c' indicam baixa inclinação das curvas de compactação Mini-MCV, características de solos muito arenosos ou mesmo areia. Valores intermediários indicam solos arenosos. Com o aumento do valor de c' , os solos passam a ter um comportamento argiloso e apresentam inclinação alta nas curvas Mini-MCV (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

O índice e' foi criado para indicar o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos. Verificou-se que o comportamento laterítico começa a se manifestar quando $d' > 20$ e $P_i < 100$, o que permitiu o estabelecimento da linha horizontal principal, correspondente a $e' = 1,15$ (linha tracejada da Figura 9), que separa os solos L dos solos N. Para os solos com poucos finos, a transição ocorre para valores mais altos de P_i , o que levou a estabelecer-se a linha

horizontal secundária em posição pouco acima, correspondente a $e' = 1,4$. Verificou-se, para certos solos, que a linha horizontal principal apresenta, na realidade, uma pequena inclinação, que não foi possível se calcular com suficiente precisão. O uso da raiz cúbica na fórmula de cálculo de e' teve o objetivo de distribuir os solos L e N em áreas aproximadamente equivalentes (VILLIBOR & NOGAMI, 1995).

O cálculo do índice e' é feito pelo emprego da seguinte fórmula:

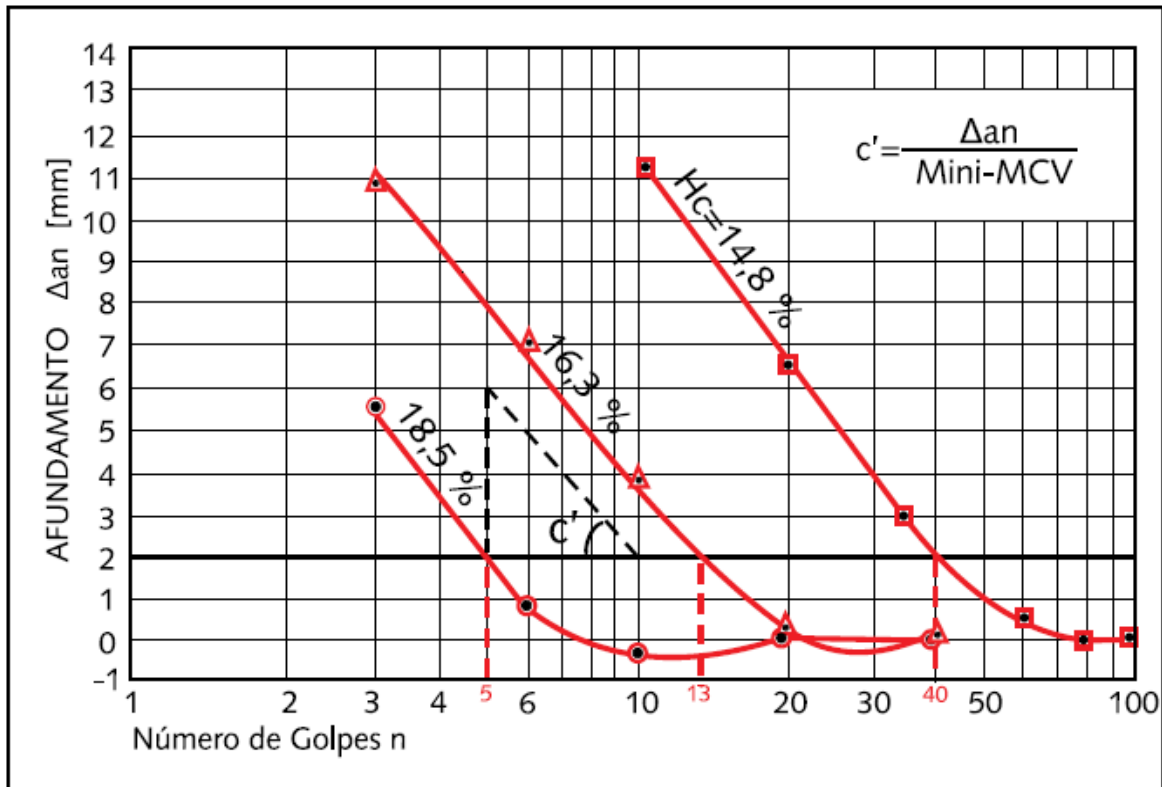
$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (2)$$

P_i = Perda de massa por imersão em água.

d' = Coeficiente que caracteriza o ramo seco da curva de compactação obtida pelo Método MCT.

A figura 10 mostra um exemplo de gráfico de compactação Mini-MCV. Através dele pode-se encontrar o coeficiente c' .

Figura 10 – Exemplo de curvas de deformabilidade obtidas através do ensaio Mini-MCV



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

3.4.2 Método utilizado pelo DNIT

Para a verificação do comportamento laterítico de um solo, o DNIT utiliza o Método DNER-ME 030/94, cuja a relação molecular sílica-sesquióxido deve ser menor que 2, e a expansão inferior a 0,2 %. Essa relação é calculada pela seguinte fórmula:

$$\frac{S}{R} = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}} \quad (3)$$

Onde:

$\frac{S}{R}$ = Relação molecular sílica-sesquióxido;

SiO₂ = Sílica;

Al₂O₃ = Sesquióxido de alumínio;

Fe₂O₃ = Sesquióxido de ferro.

4 ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT

4.1 INTRODUÇÃO

Segundo Villibor e Nogami (1995), os ensaios de compactação adotados na metodologia MCT caracterizam-se, sobretudo, pelo uso de:

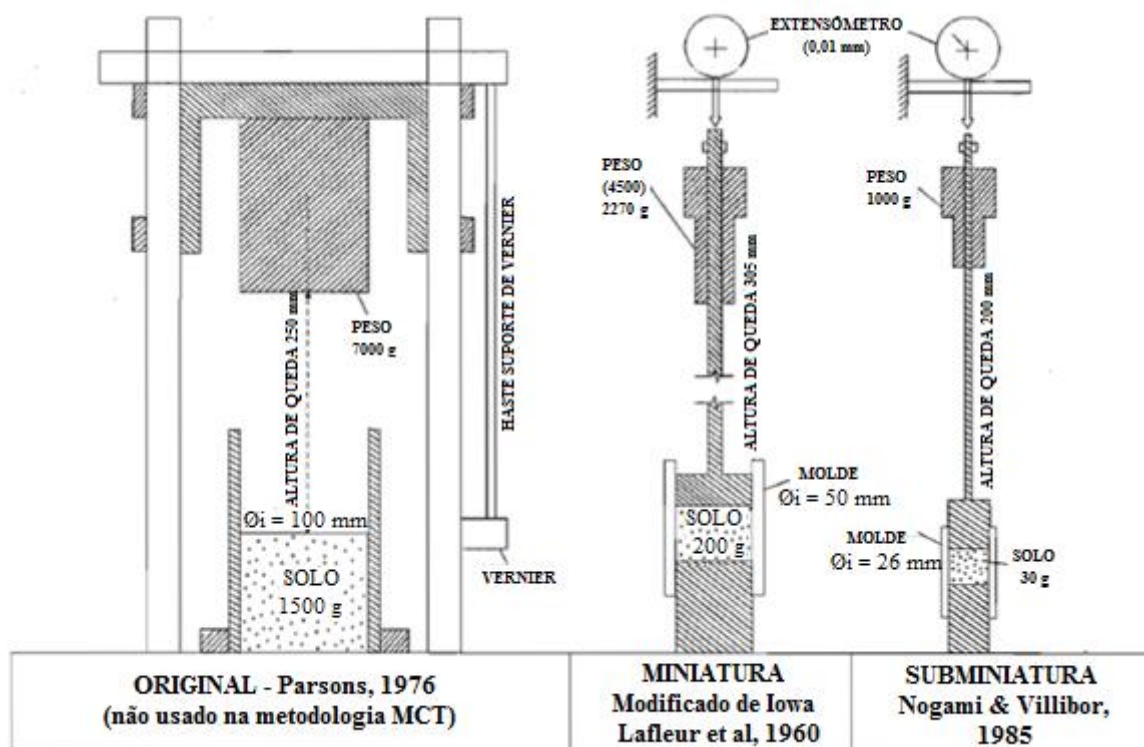
a) moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro (26 mm na alternativa miniatura), o que limita seu uso para solos que passam integralmente na peneira de 2,00 mm ou que possuem fração retida nessa peneira em quantidade tal que não interfira significativamente nas suas propriedades mecânicas e hidráulicas;

b) soquetes de seção plena (diâmetro do pé igual ao do molde) com peso variável (2270 g no tipo leve, 4500 g no tipo pesado) e queda livre de 30 cm. Esse tipo de soquete permite medir com facilidade a altura do corpo de prova em compactação. Na alternativa subminiatura, utiliza-se soquete de 1000 g e altura de queda de 20 cm;

c) base de tipo pistão, que permite a movimentação do molde durante a compactação, distribuindo melhor a energia aplicada pelo soquete;

A figura 11, mostrado logo abaixo, ilustra a aparelhagem utilizada no ensaio.

Figura 11 – Esquema comparativo dos aparelhos de compactação



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 1995.

Os ensaios a seguir, assim como suas devidas características, aparelhos utilizados e aplicações, encontram-se nas obras de Villibor e Nogami (1995, 2009).

4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO MINI-PROCTOR E MINI-MCV

4.2.1 Características

Compactador (figura 12): soquete de pé, com a mesma área do molde e com dispositivo que mede a altura do corpo de prova após qualquer número de golpes do soquete.

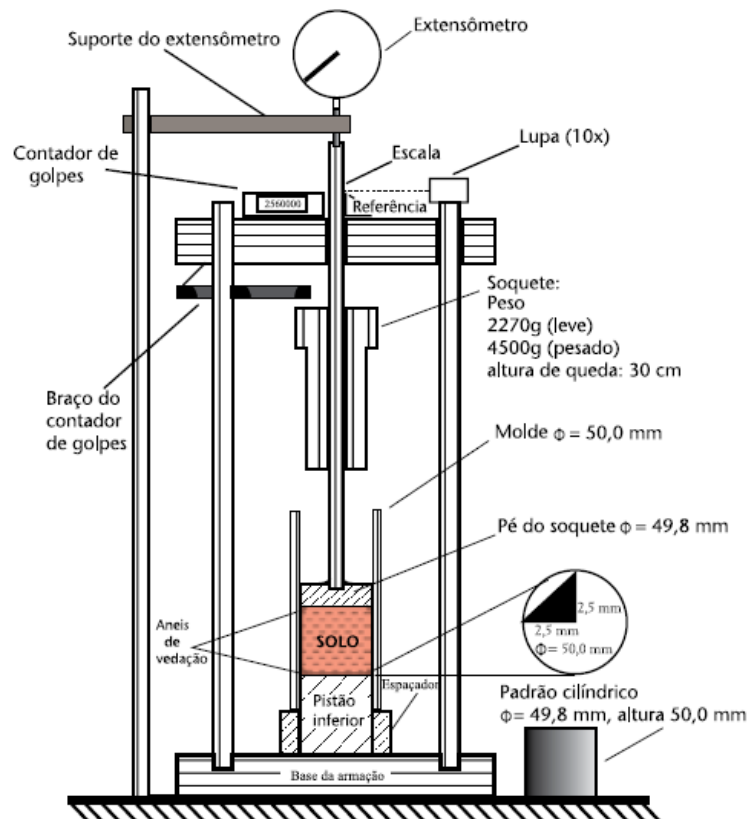
Procedimentos:

a) Mini-Proctor: Umidade variável, energia constante (normal, intermediária ou modificada).

b) Mini-MCV: Umidade e energia variáveis, massa úmida constante (200g no Mini, 30g no Sub-Mini); obtém-se uma família de curvas de compactação.

4.2.2 Aparelhagem

Figura 12 – Compactador miniatura



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

4.2.3 Aplicações dos Resultados

- a) preparo de corpos de prova para ensaios diversos.
- b) obtenção de dados para classificação MCT de solos.
- c) umidade ótima e massa específica aparente seca máxima alcançada com a energia de compactação utilizada.

4.3 ENSAIO MINI-CBR E EXPANSÃO

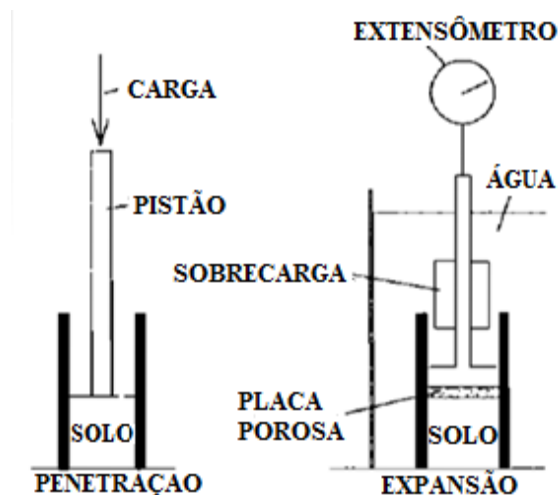
4.3.1 Características

- a) pistão: Mini (16 mm); Sub-Mini (8 mm);
- b) carga: Estática, penetração de 1,25 mm/min. Dinâmica, 1 golpe soquete compactador;
- c) imersão: 24 horas ou sem imersão;
- d) sobrecarga: padrão, sem ou especial;
- e) expansão: determinada de maneira similar ao procedimento tradicional;
- f) Mini-CBR de Campo: determinação facilitada pelo uso de aparelhagem leve de fácil movimentação.

Logo abaixo, na figura 13, é mostrado o esquema para realização do ensaio.

4.3.2 Aparelhagem

Figura 13 – Macaco mecânico e corpo de prova imerso em água



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 1995.

4.3.3 Aplicações dos Resultados

- a) dimensionamento de pavimentos;
- b) escolha de solos para reforço do subleito, bases e acostamentos.

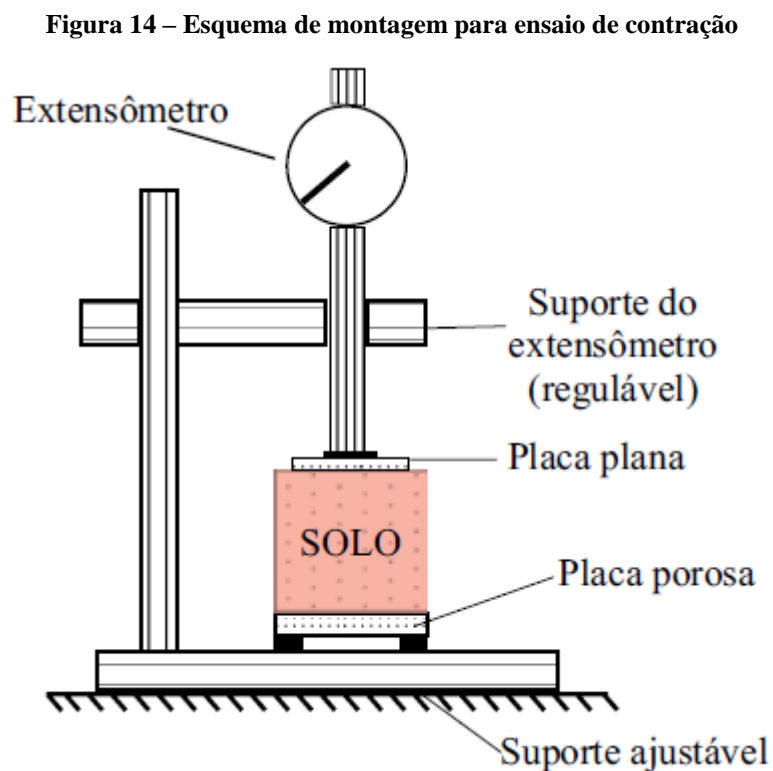
4.4 ENSAIO DE CONTRAÇÃO

4.4.1 Características

Mede-se diretamente a variação do comprimento axial do corpo de prova compactado com auxílio do extensômetro, à medida que o cp é deixado perdendo teor de umidade lentamente, pela exposição ao ar, como mostra abaixo, na figura 14.

O corpo de prova seco ao ar resultante do ensaio, quando necessário, pode ser submetido ao ensaio de sorção de água, com o objetivo de avaliar o efeito benéfico da secagem prévia das camadas compactadas.

4.4.2 Aparelhagem



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

4.4.3 Aplicações dos Resultados

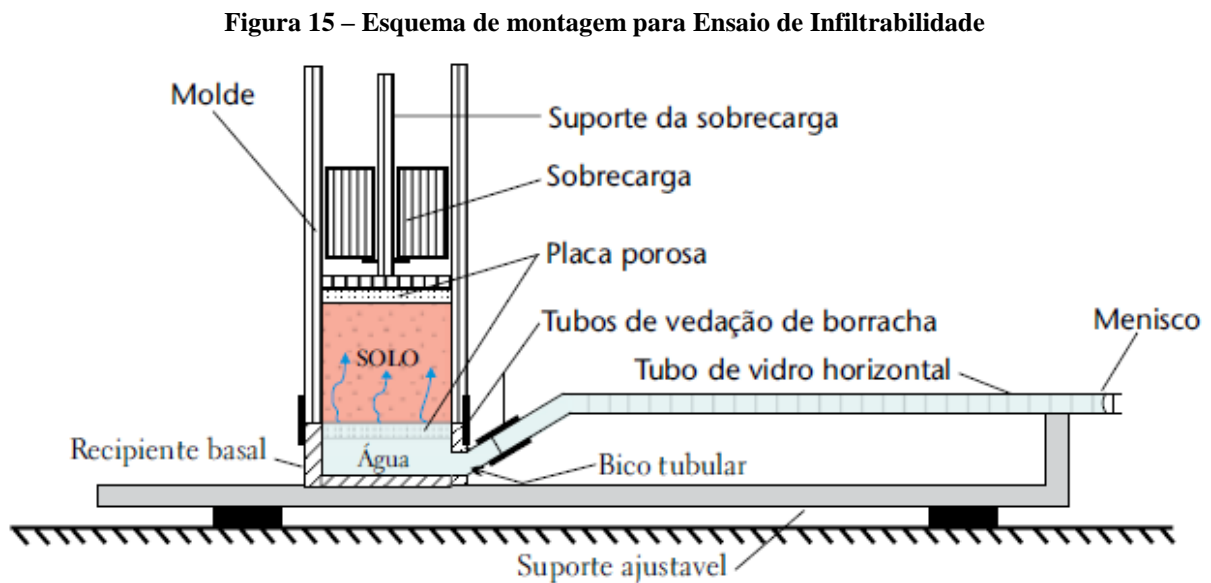
Escolher solos para aterros, bases, reforços de subleito, acostamentos, sobretudo quando os mesmos ficam sujeitos à secagem, intencional ou não, durante ou após a construção.

4.5 ENSAIO DE INFILTRABILIDADE

4.5.1 Características

Mede-se no tubo horizontal a quantidade de água que penetra no corpo de prova, através de sua base, em função da raiz quadrada do tempo. Para isso, a base do corpo de prova é colocada sobre a placa porosa que delimita o recipiente cheio de água e que se comunica com o tubo horizontal de medida da água penetrada. O esquema é mostrado na figura 15.

4.5.2 Aparelhagem



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

4.5.3 Aplicações dos Resultados

Mesmas aplicações do Ensaio de Contração, mostrado no item 4.4, escolha de solo para os fins necessários.

4.6 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

4.6.1 Características

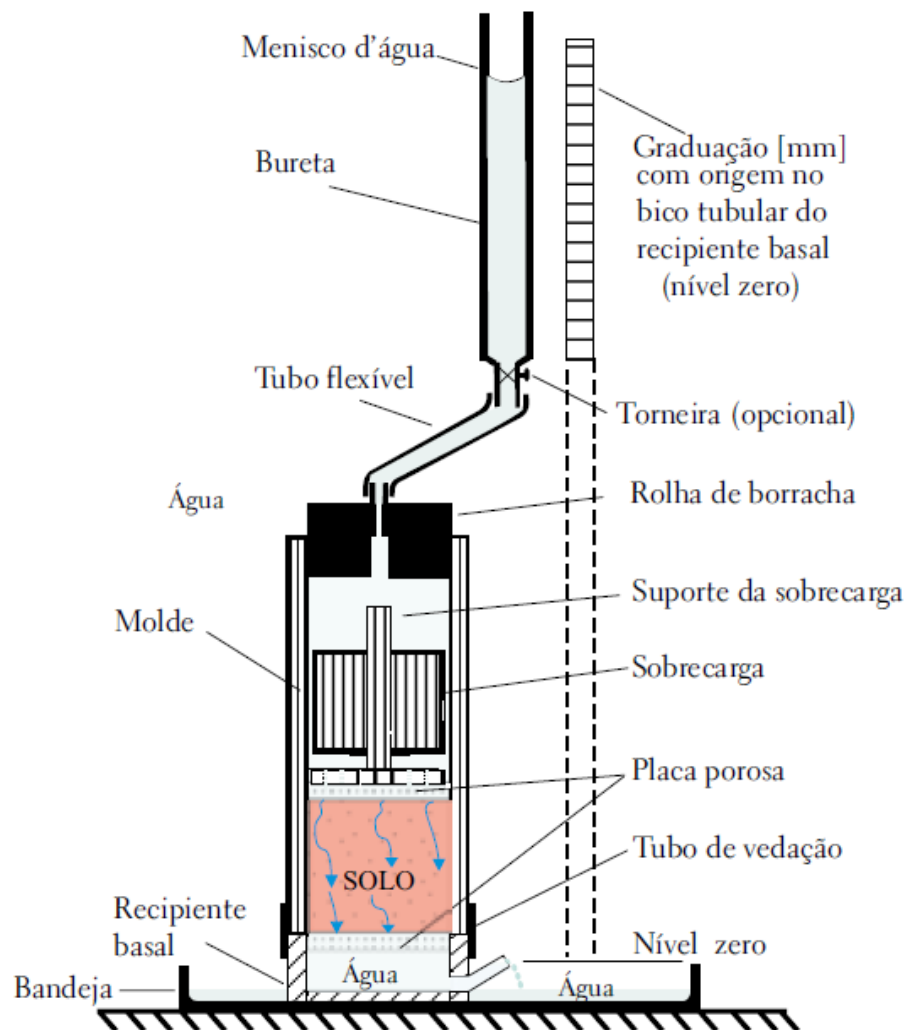
Mede-se a quantidade de água que percola no corpo de prova (solo) através do deslocamento do menisco d'água no tubo vertical graduado (figura 16), em função do tempo.

Geralmente, é utilizado o corpo de prova previamente submetido ao ensaio de infiltrabilidade.

O valor obtido é apresentado em coeficiente de permeabilidade, geralmente expresso em cm/s.

4.6.2 Aparelhagem

Figura 16 – Montagem para Ensaio de Permeabilidade



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

4.6.3 Aplicações dos Resultados

Utiliza-se em cálculos de escoamento de água em meio saturado, tais como camadas drenantes, filtrantes, impermeabilizantes etc.

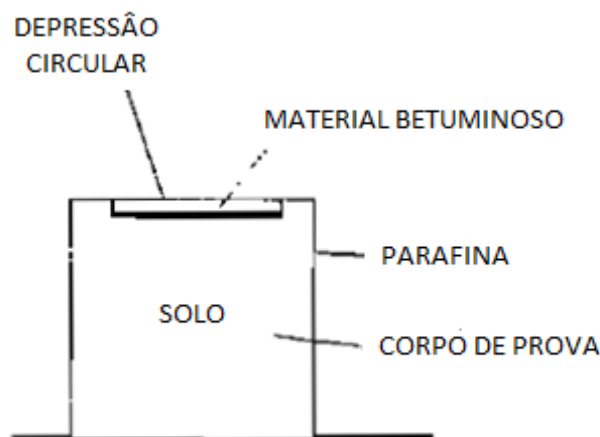
4.7 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DA IMPRIMADURA BETUMINOSA

4.7.1 Características

O corpo de prova (solo) é compactado com um macho que deixa, numa das faces, uma depressão circular. A superfície do corpo de prova, exceto a referida depressão, é recoberta de parafina. O material betuminoso que se espera utilizar é derramado em condições padronizadas na depressão circular. Mede-se, após a cura apropriada, a penetração da imprimação, partindo o corpo de prova. Se a penetração for inapropriada, experimentar outro tipo de material betuminoso. O esquema é mostrado abaixo na figura 17.

4.7.2 Aparelhagem

Figura 17 – Esquema de Ensaio de Penetração Betuminosa



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 1995.

4.7.3 Aplicações dos resultados

a) escolha do material betuminoso mais apropriado para executar a imprimação do solo compactado.

- b) escolha de solos mais apropriados para bases de pavimentos.

4.8 ENSAIO DE MINI-CBR DE CAMPO POR PENETRAÇÃO DINÂMICA

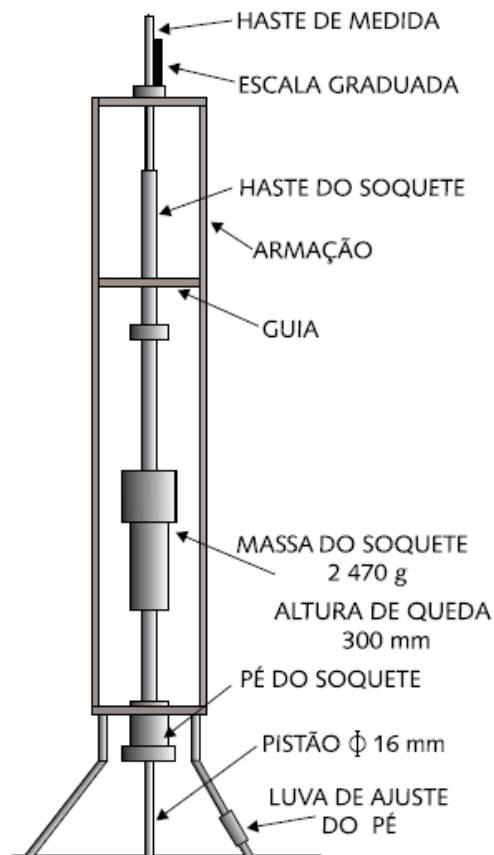
4.8.1 Características

- a) aplainar a área onde se quer determinar o Mini-CBR.
- b) apoiar a ponta do Penetrômetro (figura 18) sobre a superfície que se pretende ensaiar.
- c) efetuar a leitura inicial L_i .
- d) aplicar um golpe do soquete e, após o golpe, efetuar a leitura L_f .
- e) utilizar a seguinte fórmula de correlação:

$$\log (\text{Mini-CBRd}) = 2,28 - 1,5 \log (L_i - L_f) \quad (4)$$

4.8.2 Aparelhagem

Figura 18 – Penetrômetro



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

4.8.3 Aplicações dos Resultados

O objetivo deste ensaio é determinar, no campo, o índice de suporte Mini-CBR de camada de solos de granulação fina.

4.9 ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

4.9.1 Características

O corpo de prova compactado é parcialmente extraído de seu molde, de maneira que fique saliente 10 mm e, em seguida, submerso em água, em posição horizontal, como é mostrado abaixo, na figura 19. Recolhe-se a parte que é desprendida do corpo de prova e determina-se a sua massa seca. A perda de massa por imersão (Pi) é expressa em porcentagem relativamente à massa seca da parte primitivamente saliente do corpo de prova.

O cálculo da Pi é feito pela seguinte fórmula:

$$Pi = \frac{Md \times Fc \times 100}{Me} (\%) \quad (5)$$

Onde:

Me = Massa Seca da parte saliente do corpo de prova (g).

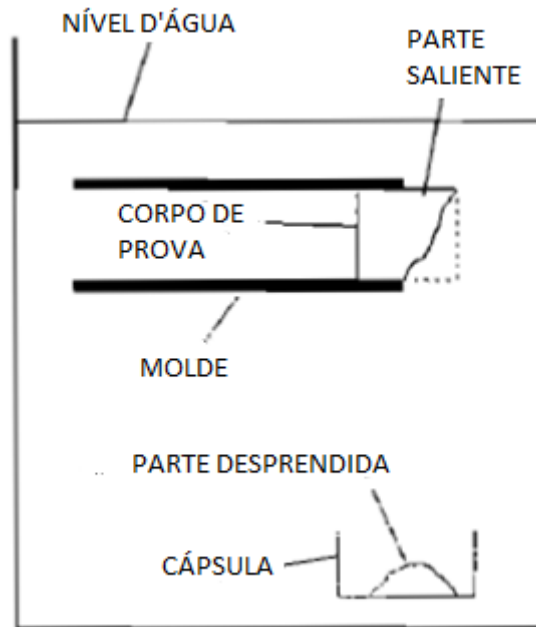
Md = Massa Seca desprendida (g).

Fc = 0,5 somente quando a parte desprendida é um monobloco.

Fc = 1,0 para os outros casos.

4.9.2 Aparelhagem

Figura 19 – Ensaio de Perda de Massa por Imersão



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 1995.

4.9.3 Aplicações dos Resultados

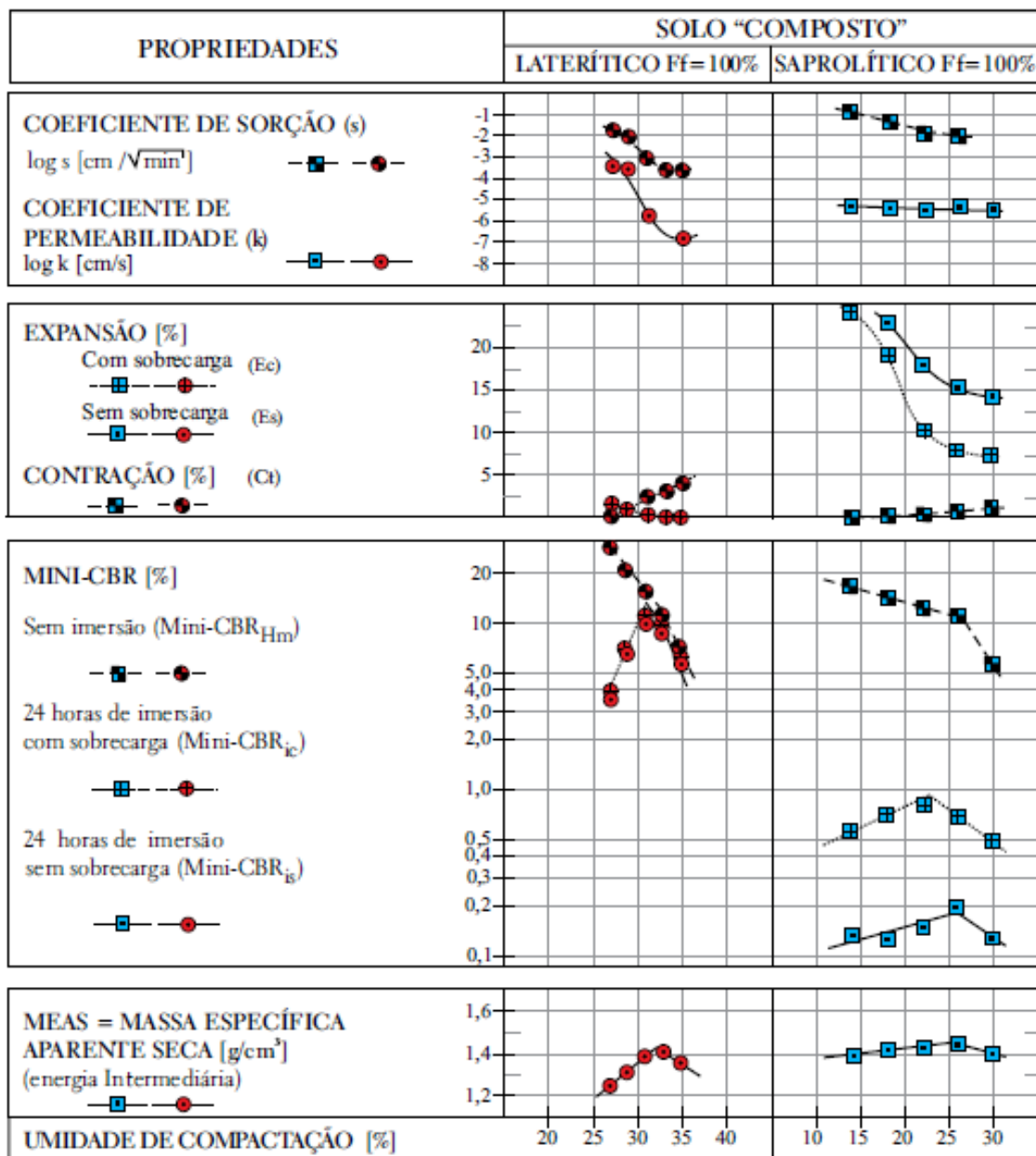
- classificação de solos segundo a Metodologia MCT.
- avaliação da erodibilidade de solos em presença de lâmina d'água.

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios foram representados, por Villibor e Nogami (2009), em gráficos tendo, nas abscissas, o teor de umidade de compactação e, nas ordenadas, os respectivos resultados dos ensaios realizados. A figura 20 ilustra os resultados de dois solos compostos em que $F_f = 100\%$ e $F_g = 0$.

Figura 20 – Resultado de dois solos compostos, na energia Intermediária



Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

Considerando-se os resultados correspondentes aos diversos solos compostos, foram construídos os gráficos resumo, apresentados na figura 21, logo abaixo, em função do material que passa na peneira 0,075 mm.

Figura 21 – Gráfico resumo dos solos compostos

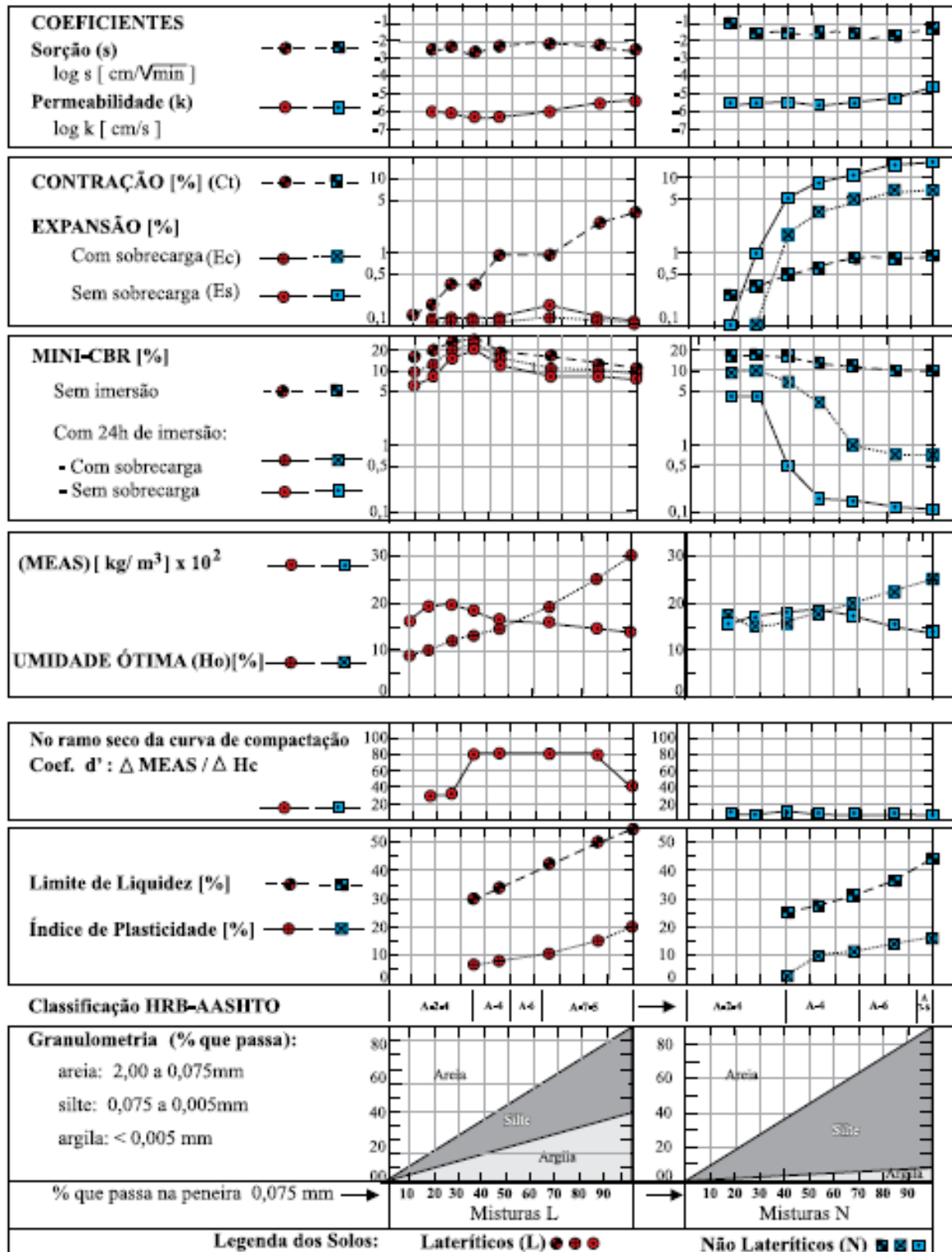


Tabela 4 – Resultados da fração fina dos solos L e N

SOLO SEM FRAÇÃO GRANULAR (Ff 100 %)			SOLO L (%)	SOLO N (%)
Umidade ótima de compactação			32,0	25,5
VALORES NA UMIDADE ÓTIMA E ENERGIA NORMAL	EXPANSÃO (%)	Com sobrecarga	0,02	7,60
		Sem sobrecarga	0,02	14,20
CONTRAÇÃO (%)			2,8	1,0
Sem imersão e sem sobrecarga			10,0	10,0
MINI-CBR (%)			9,8	1,0
Com imersão e com sobrecarga			9,5	0,2
Com imersão e sem sobrecarga				
Silte: 0,075 a 0,005 mm			17	83
Argila: $\emptyset < 0,005$ mm			83	17

Fonte: VILLIBOR E NOGAMI, 2009.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.2.1 Capacidade de Suporte e Expansão

Os valores do suporte Mini-CBR das amostras dos solos L e N apresentaram grandes diferenças quanto à perda deste por imersão. O solos L apresentaram pequena perda de valor de suporte, com imersão e com a supressão da sobrecarga, enquanto os solos N tiveram grande perda do valor de suporte, com a imersão e com a supressão da sobrecarga. Fazendo uma analogia, pode-se comparar o CBR de um solo com o fck de um concreto, ou seja, o ensaio mostrou que os solos lateríticos possuem elevada resistência, mesmo em contato com água.

Houve também, grandes diferenças quanto à expansão. Solo L: expansão muito baixa, com máximo de 0,2 %. É pouco sensível ao aumento da porcentagem da fração da mistura que passa na peneira 0,075 mm, e com ou sem sobrecarga. Solo N: expansão muito alta, a partir da porcentagem de 30 % da fração da mistura que passa na peneira 0,075 mm, chegando a ultrapassar 10 %. É sensível à presença de sobrecarga, pois chega a dobrar de valor com a retirada da mesma. A expansão baixa é um benefício pois evita a erosão do solo em caso de penetração da água (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

5.2.2 Características de Compactação

No ramo seco da curva de compactação dos solos L, verificou-se uma maior variação dos valores da MEAS, em função do teor de umidade de compactação, do que nos solos N. Os

valores da MEAS dos solos L são superiores aos dos solos N, ou seja, apresentam uma densidade mais elevada.

5.2.3 Contração Axial

Para os dois tipos de solo os valores da contração crescem com o aumento de Ff. A partir de $Ff = 25\%$ os valores da contração dos solos L são superiores aos dos N. Para os solos $Ff = 100\%$, o valor da contração dos solos L é muito superior ao dos solos N.

5.2.4 Coeficientes de Sorção d'água e de Permeabilidade

Nas amostras compostas, os valores dos coeficientes de sorção d'água e de permeabilidade das misturas L são inferiores aos das misturas N. Logo, os solos lateríticos compactados são menos propensos à patologias relacionadas à infiltração de água do que os solos não lateríticos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi estudar as propriedades mecânicas dos solos lateríticos para verificar se esse tipo de solo é uma escolha viável quanto à construções de pavimentos econômicos e com boa durabilidade. Para isso, foi utilizado a Metodologia MCT desenvolvida por Villibor e Nogami. Os ensaios seguiram a metodologia e compararam amostras de solos de comportamento laterítico com solos de comportamento não laterítico.

A pavimentação com solos lateríticos apresenta baixo custo por ser um solo tropical, que é encontrado na maior parte do território Brasileiro. Quanto as propriedades construtivas, foi concluído, através dos ensaios apresentados, que os solos de comportamento laterítico atendem às necessidades da engenharia rodoviária, pois apresentam as peculiaridades necessárias para um pavimento de qualidade, como: elevada capacidade de suporte (resistência), baixa expansibilidade, baixa permeabilidade, contração axial elevada e pouca perda de massa por imersão.

REFERÊNCIAS

- Committee on Tropical Soils of ISSMFE. **Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils**. Progress Report, 1982-1985, ABMS, São Paulo *apud* NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 240 p.
- CORRÊA, F. C.; VILLIBOR, D. F.; GRANDE, D. **Utilização de Solos Finos Estabilizados na Execução de Bases**. II Reunião das Organizações Rodoviárias, Brasília, 1972.
- DNER-ME 030. **Solos – determinação da relação sílica sesquióxidos: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.
- LAFLEUR, J. D.; DAVIDSON, D. T.; KATTI, R. T.; GURLAND, J. **Relationship Between the California Bearing Ratio and Iowa Bearing Value**. In Methods for Testing Engineering Soils. Iowa State University, Ames, Iowa, 1960.
- MENDES, Luis Henrique Amarilla. **Planejamento e importância dos serviços de pavimentação**. 2010. Disponível em: <<http://www.amm.org.br/amm/>>. Acesso em: 17 mar. 2015, 14:30:30.
- NAKAMURA, Juliana. **Pavimentação Asfáltica: os tipos de revestimentos, o maquinário necessário e os cuidados de contratação, projeto e execução**. 2011. Disponível em: <<http://www.infraestruturaurbana.pini.com.br/>>. Acesso em: 22 mai. 2015, 19:06:00.
- NOGAMI, J. S. **Determinação do Índice de Suporte Califórnia com Equipamento de Dimensões Reduzidas (Ensaio Mini-CBR)**. II Reunião das Organizações Rodoviárias. Brasília, 1972.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Additional Considerations About a New Geotechnical Classification for Tropical Soils**. Conf. on Geomechanics of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, ABMS, São Paulo, 1985.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.; BELIGNI, M. E CINCERRE, J. R. **Pavimento com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas**. ABPv, São Paulo, 2000.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Os Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação**. Anais da 18ª Reunião Anual de Pavimentação. ABPv, Rio de Janeiro, 1983.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, 1981.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Caracterização e Classificação Geral de Solos para Pavimentação: Limitações dos Método Tradicionais, Apresentação de uma Nova Sistemática**. 15ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, 1980.

PELTIER, R. **Consideration Geotechniques sur la Portance de Sols Routiers. Proceedings.** III International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. Zurich, 1953.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, C. S. **Primeira Pesquisa por Equipe: estudo da dispersão do ensaio CBR.** Boletim Técnico nº6. ABPv. Rio de Janeiro, 1964.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** Ed. USP/McGraw-Hill, São Paulo, 1977.

VIANA, H. M. F. **Estudo do comportamento resiliênte dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

VILLIBOR, D. F. **Pavimentos econômicos.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

VILLIBOR, D. F; NOGAMI, J. S. **Características e Desempenho de Segmentos de Pavimentos Rodoviários com Base de Argila Laterítica.** In 24ª Reunião Anual de Pavimentação, Belém. ABPV, Rio de Janeiro, 1990.

VILLIBOR, D. F; NOGAMI, J. S. **Critério para Escolha de Misturas Descontínuas de Solo Laterítico-Brita para Bases de Pavimentos.** Anais 19ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro. ABPV, Rio de Janeiro, 1984.

VILLIBOR, D. F; NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos.** São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. M.; NETO, A. Z. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas.** São Paulo: Arte & Ciência, 2007.