

SISTEMÁTICA MCT

3

3. SISTEMÁTICA MCT

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão tecidas considerações sobre a Sistemática MCT, seus ensaios e suas principais aplicações práticas utilizadas na área rodoviária.

Tendo em vista as dificuldades e limitações da sistemática tradicional apresentadas no Capítulo 4, quando aplicadas ao estudo dos solos tropicais finos, Nogami e Villibor (1981, 1985) propuseram uma sistemática denominada MCT. Sendo **M** de Miniatura, por utilizar corpos de prova de dimensões reduzidas, **C** por utilizar corpos de prova compactados e **T** de tropical, desenvolvida para um melhor aproveitamento das peculiaridades dos solos tropicais.

A sistemática MCT foi a ferramenta que permitiu o desenvolvimento de uma série de procedimentos para aplicações práticas e desde sua introdução até o presente, desenvolvidos graças ao apoio fundamental, em especial, do DER-SP, dos Laboratórios da Escola de Engenharia de São Carlos da Escola Politécnica, ambos da Universidade de São Paulo.

Primeiramente, foi desenvolvida para ser aplicada no estudo de solos arenosos finos lateríticos para bases de pavimentos baixo custo e, posteriormente, foi ampliada para o estudo de outras aplicações práticas na área rodoviária. Tais aplicações abrangem critérios de projetos, além de procedimentos construtivos e de controle.

Para cada aplicação prática, utiliza-se um programa específico de ensaios, cujos resultados devem obedecer critérios de escolha preconizados pela MCT. Estes critérios foram empiricamente relacionados com o comportamento do solo quando utilizado para esta finalidade.

Essa sistemática preconiza uma série de ensaios, hoje oficializada por renomados órgãos rodoviários, como o DER-SP e DNIT.

3.2. ENSAIOS DA SISTEMÁTICA MCT

Os ensaios de compactação da Sistemática MCT, que geram os corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas e hídricas dos solos tropicais, apresentam como principais características:

- Devem passar integralmente na peneira de 2,00 mm, com tolerância de até 5% de fração retida; e
- São compactados em equipamento miniatura, adaptado ao procedimento desenvolvido na Universidade de Iowa (Laufler et al, 1960), com uso de moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e compactação em seção plena, por meio de golpes de soquete (com diâmetro do pé do soquete igual ao do molde).

Além de ensaios de laboratório em CPs compactados, a MCT abrange ensaios realizados *in situ* e em amostras indeformadas. O elenco de ensaios da Sistemática MCT e os fenômenos físicos relacionados ao comportamento de camadas em pavimento estão apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2. Os ensaios apresentados na Tabela 3.1

são os primeiros da Sistemática MCT, que foram utilizados para estudos das propriedades mecânicas e hídricas dos solos e permitiram o desenvolvimento da tecnologia para o uso das camadas de reforço, sub-base e base de pavimentos. Na Parte II do Boletim Técnico, os ensaios da MCT e as obtenções de suas propriedades são apresentados em detalhes.

TABELA 3.1 – ENSAIOS DA MCT (1º CONJUNTO): ASSOCIAÇÃO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS E SUAS APLICAÇÕES.

ENSAIOS	MÉTODOS	ASSOCIAÇÃO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS DA CAMADA	APLICAÇÕES
Compactação Mini-Proctor Mini-MCV	(M1) (M5)	Aumento da massa específica por compactação mecânica (densificação) para melhoria de suas propriedades.	Preparo de corpos de prova para ensaios de laboratório. Determinação de dados para Classificação MCT (Compactação Mini-MCV).
Mini-CBR Expansão	(M2)	Capacidade de suporte. Aumento de volume com o teor de umidade.	Dimensionamento de pavimentos. Seleção e controle de solos para subleito, bases e acostamento.
Contração	(M3)	Desenvolvimento de trincas e fissuras.	Seleção de solos para aterros, subleitos, acostamentos e bases.
Infiltrabilidade Permeabilidade	(M4)	Velocidade de penetração da frente de umidade e quantidade de água associada à penetração, em solos não saturados. Percolação da água em meio saturado.	Seleção de solos para aterros, subleitos, acostamentos e bases.
Perda de Massa por Imersão	(M8)	Suscetibilidade da perda de massa por imersão de solo compactados	Determinação de dados para Classificação MCT.
Método Expedito da Pastilha	(M9)	Contração e perda de resistência por sucção de água	Determinação de dados para Classificação MCT.

TABELA 3.2 – ENSAIOS DA MCT (2º CONJUNTO): ASSOCIAÇÃO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS E SUAS APLICAÇÕES.

ENSAIOS	MÉTODOS	ASSOCIAÇÃO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS DA CAMADA	APLICAÇÕES
Penetração da Imprimadura Betuminosa	(M6)	Espessura e quantidade de material betuminoso penetrado.	Determinação da taxa de betume necessária para proteção da base.
Mini-CBR em Campo	(M7)	Capacidade suporte real.	Avaliação e controle da capacidade de suporte de bases e subleitos.
Erodibilidade	(M10)	Infiltrabilidade e suscetibilidade de perda de massa por imersão de solos indeformados.	Seleção de solos para bordas de pavimentos.

3.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação é um dos principais ensaios da Metodologia MCT, pois, a partir de seus parâmetros básicos, moldam-se corpos de prova para a determinação de outras propriedades geotécnicas da Metodologia MCT.

O ensaio de compactação, integrante da sistemática MCT, utiliza uma aparelhagem de dimensões reduzidas, podendo ser efetuado por dois métodos distintos de compactação. Na Figura 3.1, esta ilustrado o equipamento utilizado no ensaio de compactação.

Compactação Mini-Proctor:

Definido como método M1, este ensaio procura fixar uma determinada energia de compactação e, com essa energia (normal, intermediária ou 30 golpes), compacta-se uma série de corpos de prova com diferentes teores de umidade. Com esse procedimento, determinam-se o teor ótimo de umidade (h_o) e a $MEAS_{máx}$ do material. A execução deste método e os conceitos relacionados são discutidos no Capítulo 5.

Compactação Mini-MCV:

Definido com método M5, este ensaio consiste na aplicação de energias crescentes, até que seja atingido um aumento sensível da MEAS para vários teores de umidade, obtendo-se uma família de curvas de deformabilidade (ou Mini-MCV) e compactação. Este ensaio é um dos classificatórios da MCT. Sua execução e os conceitos relacionados são tratados no Capítulo 8.



Figura 3.1 – Equipamento utilizado no Ensaio de Compactação.

3.2.2. ENSAIO DE CAPACIDADE DE SUPORTE MINI-CBR

Apresentado pelo método M2, este ensaio pode ser realizado com ou sem imersão e sobrecarga, dependendo da finalidade para a qual o solo estudado será utilizado. Este ensaio, também permite obter um coeficiente empírico denominado relação RIS, definido por $\text{Mini-CBR}_{\text{is}}/\text{Mini-CBR}_{\text{hm}}$ para corpos de prova moldados na energia intermediária, que foi incorporada à Metodologia MCT, pois serve como índice do comportamento laterítico ou não do solo, sendo mais evidenciado em solos arenosos finos.

Na Figura 3.2 está ilustrado o equipamento utilizado para realização do ensaio Mini-CBR. Sua execução e os principais conceitos envolvidos serão tratados no Capítulo



Figura 3.2 – Equipamento utilizado no Ensaio Mini-CBR.

3.2.3. ENSAIO DE EXPANSÃO

Apresentado pelo método M2, este ensaio tem como objetivo principal a identificação dos valores de expansão dos argilo-minerais constituintes dos solos finos, hierarquizando os solos para diversos usos em pavimentação. A expansão é definida pela variação percentual do volume do CP, após 24 horas de imersão.

Na Figura 3.3 é ilustrado o equipamento utilizado para medir a expansão. Sua execução e os principais conceitos envolvidos serão tratados no Capítulo 6.



Figura 3.3 – Equipamento utilizado no Ensaio de Expansão.

3.2.4. ENSAIO DE CONTRAÇÃO AXIAL

Definido como método M3, o objetivo do ensaio é verificar a contração desenvolvida em CPs secos ao ar, o que é empiricamente associada ao padrão de trincamento de uma camada que ocorre durante a fase de sua execução ou ao longo de sua vida útil. Esta propriedade tem o intuito de evitar a ocorrência da propagação das trincas da camada de base para o revestimento, que comprometeriam o comportamento do pavimento.

A contração é definida pela variação percentual da altura do CP após submetido a secagem ao ar.

Na Figura 3.4, é ilustrado o ensaio de contração axial. Sua execução e os principais conceitos envolvidos serão apresentados no Capítulo 7.



Figura 3.4 – Equipamento utilizado no Ensaio de Contração Axial.

3.2.5. ENSAIO DE INFILTRABILIDADE

Definido como método M4, este ensaio tem como objetivo medir a velocidade com que a quantidade de água que infiltra nas camadas de solo (bases), quando chove durante a fase de execução e/ou operação da rodovia. Este ensaio estima quanto uma frente de umidade pode caminhar para dentro do pavimento, a partir de uma valeta lateral não revestida e/ou através de locais de concentração e acúmulo de água, próximos ao acostamento. Além disso, o ensaio serve como balizamento para se determinar a distância em que se deve encontrar a trilha de roda externa da pista em relação ao bordo do acostamento, para dimensionar sua largura, evitando assim a ocorrência de deformação. O ensaio de infiltrabilidade é ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Equipamento utilizado no Ensaio de Infiltrabilidade.

3.2.6. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Definido pelo método M4, este ensaio é utilizado para cálculos de escoamento de água em meio saturado, priorizando, quando necessário, o estudo de camadas drenantes na estrutura do pavimento. Este ensaio, no entanto, não é utilizado para priorização de escolha de materiais de bases, pois estas não trabalham nas condições saturadas. O ensaio de permeabilidade é ilustrado na Figura 3.6.

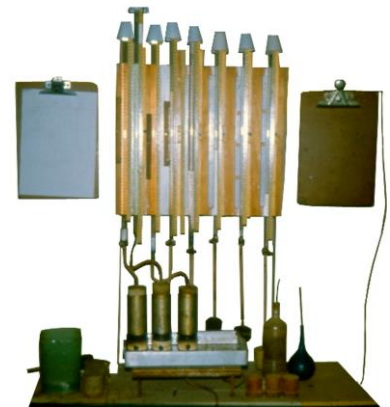


Figura 3.6 – Equipamento utilizado no Ensaio de Permeabilidade.

3.2.7. ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

Apresentado pelo método M8, este ensaio foi desenvolvido para distinguir os solos tropicais com comportamento laterítico, daqueles com comportamento não laterítico, identificado pela Classificação MCT.

O ensaio de perda de massa por imersão é ilustrado na Figura 3.7. Sua execução e os principais conceitos envolvidos serão apresentados no Capítulo 11.

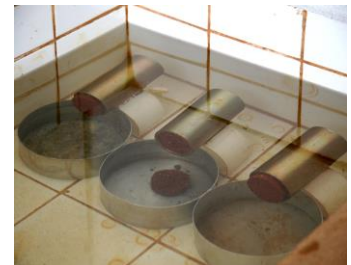


Figura 3.7 – Ensaio de Perda de Massa por Imersão.

3.2.8. MÉTODO EXPEDITO DA PASTILHA

Numerosas tentativas foram realizadas para simplificar a Classificação MCT. Dentre os métodos propostos, destaca-se o método expedito da pastilha, desenvolvido por Nogami (1994), apresentado no método M10.

Este método utiliza pastilhas, moldadas em anéis de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura, utilizando solo passante na peneira 0,42 mm, de consistência padronizada. Por meio delas, são obtidos os valores da contração diametral (após secagem) e a da sua consistência (após embebição). Este método fornece a contração diametral (C_d), o coeficiente de argilosidade (c') e a penetração (P), utilizados para definir os grupos da classificação MCT.



Figura 3.8 – Determinação da contração diametral do Método Expedito da Pastilha.

Na Figura 3.8 está ilustrada a determinação da contração diametral da pastilha realizada no método expedito da pastilha. A execução deste ensaio e os principais conceitos envolvidos são apresentados no Capítulo 12.

3.2.9. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DA IMPRIMADURA BETUMINOSA

Apresentado pelo método M6, este ensaio permite verificar a influência dos diversos parâmetros no serviço de impermeabilização da base, permitindo obter as recomendações para dosagem do tipo e a taxa do material betuminoso a ser utilizado neste serviço. Este ensaio correlaciona, empiricamente, os valores da penetração obtidos em CPs com aqueles obtidos na base quando imprimada.

O ensaio de penetração da imprimadura betuminosa é ilustrado na Figura 3.9. Sua execução e os principais conceitos envolvidos são apresentados no Capítulo 9.



Figura 3.9 – Ensaio de Penetração da Imprimadura Betuminosa.

3.2.10. ENSAIO DA CAPACIDADE DE SUPORTE MINI-CBR DE CAMPO

Apresentado pelo método M7, o suporte Mini-CBR de camadas de solos compactados pode ser aferido, *in situ*, por meio do penetrômetro sul-africano e/ou da utilização de equipamentos portáteis, acoplados a veículos de pequeno porte (prensa Mini-CBR). Os resultados *in situ* apresentam valores de capacidade de suporte superiores aos obtidos nos corpos de prova moldados em laboratório. Isso reforça a constatação de que as bases e as camadas do substrato, em ambientes tropicais, trabalham numa umidade inferior à umidade ótima de compactação.

Na Figura 3.10, é ilustrado o equipamento para a determinação da capacidade de suporte *in situ*, conhecido como penetrômetro, com soquete Mini-CBR, que fornece como resultado o parâmetro Mini-CBRd.

A execução deste ensaio e os principais conceitos envolvidos são apresentados no Capítulo 10.



Figura 3.10 – Equipamento utilizado no Ensaio de Mini-CBR de Penetração Dinâmica.

3.2.11. ENSAIOS PARA PREVISÃO DA EROSIÃO DE TALUDES

Apresentado pelo método M11, este ensaio foi desenvolvido para possibilitar a previsão de erosão em taludes de cortes tropicais. Para essa finalidade, o método fundamenta-se na determinação de duas propriedades dos solos: infiltrabilidade e erodibilidade específica. A infiltrabilidade mede a capacidade que a superfície do solo tem de absorver água, enquanto a erodibilidade específica mede, indiretamente, a resistência do solo à ação da água corrente.

3.3. APLICAÇÕES PRÁTICAS DA SISTEMÁTICA MCT

A sistemática MCT foi inicialmente desenvolvida para o estudo de solos tropicais finos para bases de pavimentos econômicos, após ampliada para outras aplicações práticas, na área viária (rodovias e pavimentos urbanos).

Estas aplicações fundamentam-se na obtenção de uma série de propriedades geotécnicas, mecânicas e hídricas obtidas por meio dos ensaios da MCT. Para cada aplicação, é definido um programa de estudo geotécnico, constituído de um elenco de ensaios, cujos resultados são associados, empiricamente, à finalidade que se pretende alcançar.

Das aplicações práticas da sistemática MCT, destacam-se:

- Classificação geotécnica MCT;
- Estudos geotécnicos de subleitos e jazidas;
- Tecnologia do uso de solo laterítico-agregado fino e granular para bases e sub-bases (qualificação dos solos, técnica construtiva e controle);
- Controle da erosão de bordo de pavimentos e cortes;
- Imprimadura asfáltica em bases de solo laterítico-agregado.

Neste Boletim Técnico será apresentada detalhadamente a Classificação Geotécnica MCT (Capítulo 4).

3.3.1. CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA MCT

A classificação dos solos com uso da sistemática MCT foi desenvolvida especialmente para o estudo de solos tropicais para fins rodoviários, baseada em propriedades mecânicas e hídricas obtidas em corpos de prova compactados de dimensões reduzidas. A classificação MCT divide os solos em duas classes principais: solos de comportamento lateríticos (classe L) e solos de comportamento não laterítico (classe N). Essas classes são subdivididas de acordo com a granulometria do solo, obtida na compactação, resultando em 7 grupos.

3.3.2. ESTUDOS GEOTÉCNICOS DE SUBLEITOS E JAZIDAS

Os dados geotécnicos obtidos pela MCT, em campo e laboratório, permitem definir os universos de solos do subleito para fins de dimensionamento de pavimento flexíveis. Esses universos são caracterizados pela classificação MCT e pelos seus valores estatísticos de suporte e expansão. A grande diferença entre os estudos geotécnicos realizados por meio da MCT e os métodos tradicionais é a verificação do provável comportamento laterítico ou não de um solo quando compactado.

As propriedades obtidas pela MCT permitem a qualificação de ocorrências para jazidas de base, sub-base e reforço, além de ocorrências para uso como caixa de empréstimo para camadas de



Figura 3.11 – Jazida de solo arenoso fino laterítico para exploração.

substituição de solos impróprios do subleito. Na Figura 3.11 é apresentada uma jazida de solo arenoso fino laterítico utilizada para base de pavimento.

Além da adequação do uso da MCT nos estudos geotécnicos, ressalta-se a praticidade do estudo, devido à quantidade reduzida de amostras necessárias, rapidez na coleta e execução dos ensaios, além de serem menos dispendiosos que o estudo pelo método tradicional.

3.3.3. TECNOLOGIA DO USO DE SOLO LATERÍTICO-AGREGADO DE GRANULAÇÃO FINA E GROSSA PARA BASES E SUB-BASES

A MCT contempla um critério de escolha de solos finos para uso em base e sub-base de pavimentos, baseado, sobretudo em propriedades fornecidas pelos seus ensaios, correlacionados com o desempenho do solo compactado no campo. Para tanto, considera as propriedades de suporte, a perda de suporte por imersão, a permeabilidade, a expansão e a contração, dentre outros.

Para o uso de solos laterítico-agregados artificiais, a MCT preconiza um método de dosagem, mediante a determinação de propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas experimentais para a obtenção de solo-agregado de características apropriadas, para base e sub-base de rodovias com tráfego leve a pesado.

Além do critério de escolha e de dosagem, a MCT preconiza procedimentos para técnica construtiva e controle na execução de camadas de base e sub-base. Um aspecto de grande relevância na técnica construtiva é a compactação desses solos em condições ambientais tropicais. Esta sistemática preconiza procedimentos que levam em consideração o grupo da classificação MCT, indicando a técnica construtiva mais adequada para cada grupo. Nas Figuras 3.12 e 3.13 estão ilustradas camadas compactadas de solo laterítico agregado de granulação grossa e fina, respectivamente.

Para aprofundamento no assunto, sugere-se a leitura de Villibor, Nogami e Sória (1987).

3.3.4. IMPRIMADURA ASFÁLTICA EM BASES DE SOLO LATERÍTICO-AGREGADO

A função da imprimadura asfáltica é proporcionar aumento da coesão da parte superficial da base, formando em sua superfície uma camada de solo betume que melhora as condições de aderência da base ao revestimento. Além disso, permite o aumento das condições de impermeabilização,



Figura 3.12 – Camada compactada de solo laterítico-agregado de granulação grossa



Figura 3.13 – Pavimento com base de solo laterítico-agregado de granulação fina



Figura 3.14 – Aplicação de imprimadura betuminosa sobre base de solo arenoso fino laterítico

dificultando a penetração de água que possa, eventualmente, infiltrar-se pelo revestimento.

A maioria dos pavimentos de baixo custo no Estado de São Paulo foi construída com camada de rolamento em tratamentos superficiais invertidos duplos ou triplos, em razão de ser o tipo mais adequado de camada de revestimento para esses pavimentos.

Tendo em vista a importância da imprimadura impermeabilizante, foi desenvolvido um procedimento, como aplicação prática da sistemática MCT, que permite escolher que tipo de material asfáltico é indicado para a imprimadura de determinado solo, a que taxa deve ser aplicado e quais são as condições ótimas para a sua aplicação.

Além da escolha do tipo de impermeabilização e da sua taxa de dosagem, a sistemática MCT apresenta um critério de dosagem e recomendações construtivas para a execução da imprimadura, a fim de que ela atenda à sua função adequadamente. Na Figura 3.14 é apresentada a execução da imprimadura betuminosa sobre uma base de solo arenoso fino laterítico.

Para aprofundamento no assunto, sugere-se a leitura de Villibor, Nogami e Fabbri (1988).

3.3.5. CONTROLE DA EROSÃO DE BORDO DE PAVIMENTOS E CORTES

Esta aplicação visa minimizar o processo erosivo nos bordos do pavimento e nos cortes. A MCT permite prever a erodibilidade de um solo por meio de um critério essencialmente empírico e baseado na correlação com o comportamento frente à erosão. As duas propriedades que permitem avaliar a erosão hídrica dos solos tropicais são a infiltrabilidade e a erodibilidade específica. Na Figura 3.15 é apresentado um exemplo de uma intensa erosão de bordo do pavimento, com base de solo arenoso fino laterítico.

Para aprofundamento no assunto, sugere-se a leitura de Villibor, Nogami e Fabbri (1986).



Figura 3.15 – Erosão na borda da base do pavimento