



**ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE
CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS APLICADAS A SOLOS
TROPICAIS NO ESTADO DO MATO GROSSO**

SÃO PAULO
2017



DRIELY MARIANE LANCAROVICI ALVES
PEDRO FRANCISCO HERNANI SANTIAGO HENRIQUES

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE
CLASSIFICAÇÃO DOS GEOTÉCNICAS APLICADAS A SOLOS TROPICAIS
NO ESTADO DO MATO GROSSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Pavimentação Rodoviária, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Pavimentação Rodoviária.

Orientador: Prof. D.Sc. Assis Abbud Villela.

SÃO PAULO
2017

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. D.Sc. Assis Rodrigues Abbud Villela pela orientação e pelo incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. M.Sc. Paulo Sergio Peterlini, coordenador do curso de Pavimentação Rodoviária do IDD, pela oportunidade de realização do curso de Pós-Graduação em Pavimentação Rodoviária e apoio para realização deste trabalho.

Ao Laboratório da Copavel Consultoria de Engenharia Ltda, pelo fornecimento dos dados e amostras para ensaios e análise.

Ao Laboratório da Egis Engenharia e Consultoria, pelo apoio no trabalho experimental para realização dos ensaios da MCT.

Ao Prof. Dr. Douglas Fadul Villibor, pelo apoio e discussões construtivas.

A todos professores do IDD, pelos ensinamentos transmitidos e incentivos durante as aulas.

FOLHA DE APROVAÇÃO**ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE
CLASSIFICAÇÃO E OS GEOTÉCNICAS APLICADAS A SOLOS TROPICAIS
NO ESTADO DO MATO GROSSO**

Por

**DRIELY MARIANE LANCAROVICI ALVES
PEDRO FRANCISCO HERNANI SANTIAGO HENRIQUES**

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA, DO
INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS PROFESSORES A
SEGUIR MENCIONADOS.

São Paulo (SP) ____ de _____ de _____.

Prof. DSc. Assis Abbud Villela

Prof. M.Sc. Paulo Sergio Peterlini

Prof M.Sc. Santi Ferri

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso apresenta um estudo comparativo de sistemas de classificações geotécnicas, aplicadas aos solos tropicais oriundos da região de Nova Mutum, Estado do Mato Grosso, visando qualificar o método que melhor caracteriza os solos tropicais utilizados no meio rodoviário. Nos dias atuais, os sistemas classificatórios mais comumente empregados são: Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e do *Transportation Research Board* (TRB). Estes sistemas foram criados para solos de climas temperados, onde por essa razão nem sempre caracterizam os solos de comportamento tropical com exatidão. Assim não raro, solos tropicais com boas propriedades são descartados pelas classificações tradicionais. Visando sanar esta deficiência, foi desenvolvido o método Miniatura Compactado Tropical (MCT), que visa melhor classificar os solos de comportamento tropical. Assim o objetivo da pesquisa é verificar se o método MCT atende e melhor classifica os solos tropicais. Para tanto, foram coletadas 11 amostras, as quais foram ensaiadas e classificadas nos três métodos apresentados, além de terem sido submetidas a ensaios do Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR) cujos resultados foram correlacionados com os grupos de cada classificação, em que seus valores depurados, na maioria, encontram-se entre o limite laterítico e não laterítico.

Palavras chave: Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), Transportation Research Board (TRB) e Miniatura Tropical Compactado (MCT), Região de Nova Mutum MT, Índice de Suporte Califórnia/California Bearing Ratio (ISC/CBR).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aparelho Casagrande (Caputo e Caputo, 2015)	24
Figura 2 - Gráfico de Plasticidade (DNIT 2006).....	30
Figura 3 – Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical (Nogami e Villibor, 1995).	37
Figura 4 - Exemplo de macrofábrica de solos tropicais: a) homogênea com agregação, latossolo vermelho-amarelo (laterítico); b) manchada, isotópica, contínua (solo saprolítico de granito (Nogami e Villibor, 1995)	40
Figura 5 - Microfábrica de um solo laterítico (a) e saprolítico (b), com aumento de 10.000X (Villibor, 1981)	40
Figura 6 - Variação dos valores de LL e IP de três amostras (Programa intelaboratorial, DER-SP e IPT). (Villibor, 1981).....	44
Figura 7 - Variação do CBR em função do Índice de Grupo. (1) Reta de correção aproximada considerando dados da tabela constante no método do Projeto de Pavimentos Flexíveis de Souza (1979). Dados obtidos de Nogami (1972) e Nogami e Villibor (1979), (Nogami e Villibor, 1995).....	45
Figura 8- Profundidade na penetração do degelo na estrutura de pavimento (Highway Research Board, 1961).	47
Figura 9-Variação do teor de umidade da base de solo arenoso fino laterítico. Trecho experimental: Ilha Solteira – Pereira Barreto (Villibor, 1981).....	47
Figura 10 - Exemplo de curvas de deformabilidade e calibração obtidas de um solo argiloso (Parsons e Bolden, 1979).....	51
Figura 11 - Família de Curvas de deformabilidade obtidas através do ensaio de Mini-MCV, (Nogami e Villibor, 2009)	54
Figura 12 - Família de curvas de compactação do ensaio Mini-MCV, (Bernucci, 1992)	55
Figura 13 – Croqui do ensaio de Perda de Massa por Imersão, (Moura, Sant’Ana e Bernucci, 2006)	56

Figura 14 – Fatores de correção (F_c) para cálculo do P_i , (Vertamatti, 1998)	57
Figura 15 – Exemplo de curva P_i versus Mini-MCV, (Nogami, Villibor e Serra, 1987)	57
Figura 16- Carta da Classificação MCT, (Nogami e Villibor, 1981)	62
Figura 17 – Resumo das propriedades dos grupos da classificação MCT, (Nogami e Villibor 1995)	63
Figura 18 – Valores numéricos das propriedades, (Nogami e Villibor, 1995)	64
Figura 19 – Matriz do programa de ensaio executado	66
Figura 20- Localização do Município de Nova Mutum/MT.	67
Figura 21 – Mapa pedológico próximo ao município de Nova Mutum/MT. Escala original 1: 1.500.000. (IBGE, 2009).	68
Figura 22 - Etapas do do Ensaio de Compactação Mini-MCV: a) introdução de 200 g da amostra úmida no molde cilíndrico; b) acomodação do solo dentro do molde; c) aplicação dos primeiros golpes (com suporte meia cana na base)	71
Figura 23 - Etapas do Ensaio de Perda de Massa por Imersão: a) Extrusão parcial do CP após compactação Mini-MCV; b) Medição da altura extrudada do CP (1,0 cm); c) Imersão dos CPs	72
Figura 24 – Localização das amostras no gráfico classificatório da MCT	80
Figura 25 – Composição granulométrica da amostra SL01	91
Figura 26 – Composição granulométrica da amostra SL02	92
Figura 27 – Composição granulométrica da amostra SL03	92
Figura 28 – Composição granulométrica da amostra SL04	93
Figura 29 – Composição granulométrica da amostra SL05	93
Figura 30 – Composição granulométrica da amostra SL 06	94
Figura 31 – Composição granulométrica da amostra SL07	94
Figura 32 – Composição granulométrica da amostra SL08	95
Figura 33 – Composição granulométrica da amostra SL09	95
Figura 34 – Composição granulométrica da amostra SL10	96
Figura 35 – Composição granulométrica da amostra SL11	96

Figura 36- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL1.....	98
Figura 37- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL2.....	99
Figura 38 - Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL3.....	100
Figura 39- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL4.....	101
Figura 40- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL5.....	102
Figura 41- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL6.....	103
Figura 42- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL7.....	104
Figura 43- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL8.....	105
Figura 44 Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL9.....	106
Figura 45 Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL10.....	107
Figura 46-Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL11.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação entre o Índice de Grupo e CBR (DNIT, 2004)	27
Tabela 2 - Classificação dos Solos (Transportation Research Board) (DNIT, 2006) ...	28
Tabela 3 - Valores prováveis de CBR para os grupos da classificação TRB (DNIT, 2006).....	28
Tabela 4 - Valores prováveis de CBR para os grupos USCS (DNIT, 2006)	33
Tabela 5 - Principais medidas dos ensaios MCV e Mini-MCV, (Sória e Fabbri, 1980)	52
Tabela 6 - Composição granulométrica e densidade real dos grãos.....	73
Tabela 7 – Parâmetros de compactação, CBR e expansão	74
Tabela 8 – Classificação TRB, CBR e expansão	75
Tabela 9 – Valores de CBR estimados pelo método CBR_{IG}	76
Tabela 10 - Classificação USCS, CBR e expansão.....	78
Tabela 11- Resultados da Classificação MCT	79
Tabela 12- Classificação MCT, CBR e expansão	81
Tabela 13 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL01.....	109
Tabela 14 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL02.....	110
Tabela 15 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL03.....	111
Tabela 16 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL04.....	112
Tabela 17 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL05.....	113
Tabela 18 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL06.....	114

Tabela 19 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL07.....	115
Tabela 20 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL08.....	116
Tabela 21 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL09.....	117
Tabela 22 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL10.....	118
Tabela 23 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL11.....	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Algumas características do solo indicadas pelos testes de consistência	25
Quadro 2 - Resumo do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (USCS). (Caputo e Caputo, 2015).....	32
Quadro 3 - Tabela-resumo dos principais constituintes dos solos lateríticos e saprolíticos (informações de Nogami, 1971)	41

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
FOLHA DE APROVAÇÃO	4
RESUMO	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE QUADROS	11
SUMÁRIO.....	12
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	17
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	18
1.3. HIPÓTESE	18
1.4. JUSTIFICATIVAS	18
1.4.1. Tecnológicas.....	18
1.4.2. Econômicas	19
1.4.3. Sociais	19
1.4.4. Ecológicas	19
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. IMPORTÂNCIA DAS CLASSIFICAÇÕES.....	22
2.2. CLASSIFICAÇÃO TRB.....	23
2.1. SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS	29
2.2. <i>CALIFORNIA BEARING RATIO</i>	33
2.3. SOLOS TROPICAIS	35
2.3.1. Ocorrência dos Solos Tropicais.....	35

2.3.2.	Solos Lateríticos	38
2.3.3.	Solos Saprolíticos	39
2.3.4.	Dificuldades e Deficiências das Classificações Geotécnicas Tradicionais na Caracterização de Solos Tropicais	41
2.4.	METODOLOGIA MCT	48
2.4.1.	Considerações Iniciais	48
2.4.2.	Ensaio da Classificação MCT	48
2.4.3.	Classificação MCT	58
3.	MÉTODO DE PESQUISA	65
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	65
3.2.	ÁREA DE ESTUDO	66
3.3.	COLETA DOS SOLOS	68
3.4.	MÉTODOS DE ENSAIO	68
3.4.1.	Ensaio de caracterização	69
3.4.2.	Ensaio de Compactação e Índice de Suporte Califórnia	70
3.4.3.	Ensaio de Compactação Mini-MCV	70
3.4.4.	Ensaio de Perda de Massa por Imersão	71
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	72
4.2.	COMPACTAÇÃO E ISC/CBR	73
4.3.	CLASSIFICAÇÃO USCS	77
4.4.	CLASSIFICAÇÃO MCT	79
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
6.	ANEXOS	91
6.1.	Composição Granulométricas das Amostras	91
6.2.	Classificação MCT	97

1. INTRODUÇÃO

Indubitavelmente o conhecimento das propriedades do solo é imprescindível na Engenharia de Pavimentação. O solo é o material de fundação de qualquer estrada, podendo ser encontrado em seu estado natural ou transportado e compactado. Além disso, é o material menos oneroso para uso em nas camadas do pavimento, podendo ser utilizados em misturas com outros materiais ou até mesmo puros. Das principais propriedades dos solos avaliadas para sua utilização na pavimentação, destacam-se a resistência, deformabilidade e permeabilidade.

A grande diversidade de solos, resultante dos diferentes processos físico-químicos de sua formação, exige em toda obra de engenharia um estudo aprofundado de suas propriedades perante as finalidades de interesse. Muitas vezes para o conhecimento destas propriedades são necessários ensaios complexos e onerosos, o que dificulta o estudo do solo.

Com o intuito de facilitar o estudo dos solos, foram desenvolvidas classificações que permitissem o agrupamento dos solos em conjuntos distintos, aos quais pudessem ser atribuídas algumas propriedades de interesse. Estas classificações, sob o ponto de vista da engenharia, permitem estimar o provável comportamento do solo, a partir de características geotécnicas consideradas relevantes, sendo obtidas por meio de ensaios mais simples. Ressalta-se a importância da classificação com uma ferramenta orientativa para permitir a análise adequada de um problema.

No Brasil, dentre as classificações geotécnicas mais relevantes na Mecânica dos Solos, destacam-se o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), do inglês *Unified System Classification Soil* (USCS) e a classificação para fins rodoviários do *Transportation Research Board* (TRB). Estas classificações, ambas de origem norte-americana, baseiam-se nas determinações de granulometria e limites de Atterberg do solo (limite de liquidez e limite de plasticidade). Estas propriedades são utilizadas para prever os atributos geotécnicos de interesse, como por exemplo, a capacidade de suporte do solo para pavimentação, no caso da TRB.

Muitos pesquisadores apontaram a deficiência destas classificações, ressaltando a falta de correlação de seus grupos com as propriedades geotécnicas de interesse, que não coincidem com o comportamento dos solos na estrutura no pavimento. O motivo principal para tais dificuldades deve-se à diferença da constituição destes solos dos formados em regiões de clima temperado. Muitos dos solos formados em regiões de clima tropical apresentam microestrutura peculiar, devido ao enriquecimento de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio em sua formação.

Diante deste fato, Nogami e Villibor (1980) desenvolveram uma metodologia de estudo de solos tropicais para fins rodoviários, designada Miniatura Compactado Tropical (MCT). Desta metodologia resultou a Classificação MCT, baseada na correlação das propriedades mecânicas e hídricas do solo, utilizando em sua classificação ensaios de laboratório com solos no estado compactado.

A classificação MCT agrupa os solos em duas grandes classes: solos de comportamento laterítico (classe L) e solos de comportamento não laterítico (classe N). Os solos de classe L apresentam ótimo desempenho quando compactados para utilização em camadas de pavimento. Destaca-se sua elevada capacidade de suporte, que apresenta pequena perda quando imerso em água.

No Estado do Mato Grosso há grande ocorrência de unidades pedológicas com microestrutura peculiar dos solos de comportamento laterítico, segundo critérios da Classificação MCT, conforme indicado no trabalho de Santos (1998).

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Apesar de já ser provada a inadequação das classificações TRB e USCS para solos tropicais em muitos estados do Brasil, a maioria dos órgãos rodoviários brasileiros ainda se baseia nelas. Desta forma, frequentemente, em regiões com ocorrências de solos tropicais, são adotados critérios de projetos e construção de estradas, geralmente incompatíveis com o desempenho dos materiais utilizados.

Em um país com as dimensões do Brasil, ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados dos materiais locais disponíveis, além de ~~um~~ tratamento regionalizado para as soluções de pavimentação, baseadas em experiências locais. Em muitas obras de engenharia existem ocorrências de materiais que têm sido utilizados às vezes sem estudos técnicos mais criteriosos, mas que se forem estudados com profundidade podem levar a especificações que permitam um uso generalizado e seguro.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O principal objetivo do presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é confrontar os principais métodos de classificação geotécnicas a solos encontrados no Estado do Mato Grosso. As Classificações estudadas foram: SUCS, TRB e MCT. Além disso, visa contribuir com um acervo e catalogações das propriedades dos solos ocorrentes na região médio norte do Estado do Mato Grosso, quanto às classificações geotécnicas rodoviárias, propiciando o desenvolvimento de novas tecnologias com uso de material local.

1.2.2. Objetivos Específicos

Avaliar a correlação dos parâmetros e coeficientes utilizados na classificação MCT com os fenômenos relacionados, proposto por Nogami e Villibor (1981), para os solos analisados.

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que o método MCT seja o mais adequado para a classificação dos solos em questão, uma vez que o método TRB e SUCS foram desenvolvidos para regiões de clima temperado, onde os solos não apresentam a microestrutura peculiar dos tropicais, conforme apontado por Nogami e Villibor (1980).

1.4. JUSTIFICATIVAS

1.4.1. Tecnológicas

A utilização da tecnologia estrangeira nas especificações de pavimentação brasileiras, muitas vezes rejeita materiais locais de bons, que a técnica tradicional não os reconhece como tal, e exigem outros materiais que podem apresentar desempenho até pior do que os rejeitados. Portanto é imprescindível o desenvolvimento de tecnologias locais para otimização de materiais e execução de tecnologias adequadas às condições em que estão submetidas.

1.4.2. Econômicas

O uso de uma tecnologia adequada ao local e aos materiais característicos da região pode levar a uma considerável economia e otimização de recursos, devido principalmente à diminuição das distâncias de transporte.

Segundo Nogami, Villibor e Sória (1988) o uso de uma tecnologia local, pode representar uma redução de aproximadamente 40% do custo de um pavimento convencional de estrutura equivalente.

1.4.3. Sociais

Como consequência da economia devido à otimização do uso de materiais locais, tem-se como consequência um impacto social, por viabilizar as obras de pavimentação.

Para comunidades de poucos recursos, uma solução de pavimentação a baixo custo, pode representar a diferença ou não ao acesso de uma rodovia. No caso de vias urbanas, viabilizar a pavimentação representa entre outros fatores, a melhoria da qualidade de vida da população.

1.4.4. Ecológicas

A utilização de solos locais permite economias de energia para a execução de obras de pavimentação, isto devido principalmente à redução do uso de materiais beneficiados, exploração de pedreiras e distâncias médias de transporte. Além disso, este método permite reduzir não só a poluição do ruído e do ar, mas também as emissões de dióxido de carbono (CO₂) da queima de combustível durante o transporte do material.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A fim de atingir o objetivo exposto no item 3.1, este trabalho foi realizado através de um programa de ensaios de laboratório em que foram analisadas 11 amostras coletadas do subleito de importante rodovia do Estado do Mato Grosso, próximo ao município de Nova Mutum.

O programa de ensaios utilizado consistiu basicamente na realização dos métodos necessários para caracterização e classificação de solos segundo a MCT, TRB e SUCS. Além disso, foi executado o ensaio de ISC/CBR, buscando-se a relação destas propriedades com os grupos indicados pelos métodos classificatórios analisados. O Ensaio de compactação Mini-MCV foi similar da especificação indicada, diferenciando-se apenas da série de golpes utilizada para compactação do corpo de prova, conforme é detalhado no item 3.

A coleta das amostras, assim como os ensaios de caracterização, compactação e resistência e os necessários para a classificação USCS e TRB, foram realizados no Laboratório da Copavel Consultoria de Engenharia Ltda, sediado na cidade de São Paulo/SP. Os ensaios necessários para a classificação MCT foram realizados pelo Laboratório da Egis Engenharia e Consultoria, Cotia/SP.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi elaborado em cinco capítulos, onde o conteúdo foi abordado conforme a seguir:

O **Capítulo 1 - Introdução**, apresenta a motivação da análise da classificação desenvolvida para solos tropicais e as tradicionais utilizadas na engenharia de pavimentação. Neste capítulo são apresentados os objetivos para a realização deste estudo, bem como delineia as principais justificativas e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica**, apresenta uma revisão bibliográfica com destaque aos aspectos mais relevantes para a definição da investigação experimental e análise dos resultados obtidos. Descreve as principais classificações de solos utilizadas na área de engenharia da pavimentação rodoviária e seus fundamentos, além de apontar as principais dificuldades e deficiências das classificações tradicionais quando aplicadas aos solos tropicais.

O **Capítulo 3 - Método de Pesquisa**, do tipo programa experimental descreve os métodos de ensaio, realizados em laboratório, para classificação e caracterização dos solos. Vai ser abordado relatos sobre a pedologia dos solos encontrados na região da pesquisa, além das condições climáticas ambientais em que estes estão submetidos.

O **Capítulo 4 - Apresentação e Análise dos Resultados**, apresenta e confronta os resultados obtidos das classificações analisadas, comparando estas com as propriedades de suporte considerando o ensaio do ISC/CBR dos solos investigados.

O **Capítulo 5 - Considerações Finais**, apresentam as conclusões a respeito de toda a pesquisa realizada, sugerindo-se recomendações para trabalhos futuros sobre o assunto, com novas pesquisas tanto de campo como em laboratório, visando ao aprimoramento dessa técnica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo vão ser apresentados os fundamentos teóricos, baseados numa revisão bibliográfica, no sentido de um bom embasamento para a realização do presente TCC.

2.1. IMPORTÂNCIA DAS CLASSIFICAÇÕES

“Mostre-me seu sistema (de classificação) e direi o quanto você chegou na percepção de problemas de pesquisa” (KUBIENA, 1948 *apud* CARVALHO, MEDINA & NOGAMI, 1985)

Os solos são comumente utilizados como material de construção das rodovias. Estes podem ser empregados como camadas de base, sub-base, reforço do subleito, subleito e aterros.

Em projetos de pavimentos, é necessário o conhecimento das características do comportamento geotécnico dos solos. Porém, dependendo da quantidade e da complexidade dos ensaios a serem realizados, a obra pode se tornar excessivamente onerosa. Assim, houve a necessidade da criação de classificações que possam ser realizadas através de ensaios menos complexos porém capazes de classificar os solos em grupos onde se possam prever as características do seu comportamento em estruturas de pavimentos.

Sória, (1985) descreve que uma classificação de solos deve agrupar solos de comportamentos semelhantes, assim obtendo para uma grande quantidade de amostras o mesmo índice classificatório com apenas algumas amostras ensaiadas. As classificações também devem permitir a correlação do comportamento geotécnico do solo com outros já conhecidos, de maneira que se possa prever o comportamento desses solos na estrutura do pavimento.

Segundo Santos (2006), a classificação geotécnica serve para agrupar os solos de comportamento similar, permitindo prever o seu comportamento.

2.2. CLASSIFICAÇÃO TRB

A classificação TRB, antiga HRB do *Highway Research Board*, publicada em 1945, surgiu após diversas alterações na classificação dos solos do *Bureau of Public Roads* (BPR) dos Estados Unidos no ano de 1929, cuja proposta era estabelecer uma hierarquização para os solos do subleito a partir da realização de ensaios simples e realizados de forma corriqueira: a análise granulométrica por peneiramento e a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade. (apud CHAVES, 2000).

Os limites de liquidez e plasticidade, denominados limites de consistência ou Limites de Atterberg foram criados pelo engenheiro químico sueco Albert Mauritz Atterberg e visa definir melhor o comportamento dos solos em relação a influência que as partículas argilosas alteram o comportamento dos solos (PINTO, 2006).

Com base neste conceito, o engenheiro e professor austríaco de mecânica dos solos Arthur Casagrande adaptou e padronizou a técnica para uma análise indireta do comportamento dos minerais-argilas no solo (PINTO, 2006).

A técnica consiste em determinar o limite em que o solo perde sua capacidade de fluir através da perda de umidade, porém pode ser moldado facilmente e conservar sua forma (Limite de Liquidez (LL)), entrando assim em seu estado plástico. Com a contínua perda de umidade, o solo começa a perder seu estado plástico até começar a se desmanchar ao ser trabalhado. Esta linha entre a plasticidade e seu estado semissólido é denominada como Limite de Plasticidade (LP) (CAPUTO e CAPUTO, 2015).

Segundo a especificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6459. O LL é definido através do aparelho Casagrande conforme mostra a ilustração da Figura 01. A amostra de solo já seca e passada na peneira de nº 4 é umedecida e homogeneizada durante 15 e 30 min, sendo que o tempo aumenta conforme sua maior porcentagem de argila na composição.

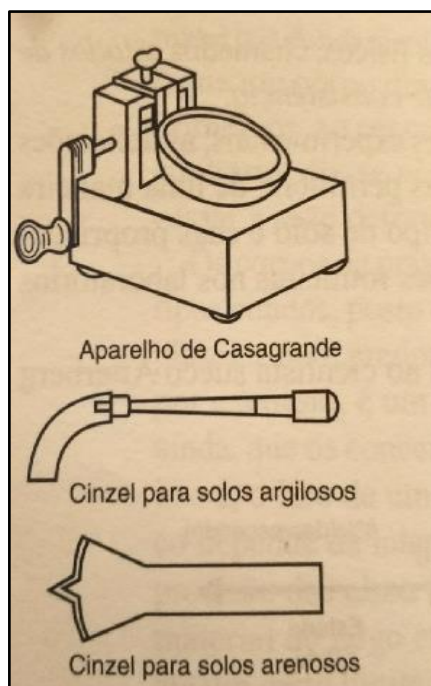


Figura 1 - Aparelho Casagrande (Caputo e Caputo, 2015)

A amostra já homogeneizada é colocada no aparelho Casagrande, e então é feita uma ranhura com o cinzel no centro. Então é deferido uma sequência de golpes até que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13,0 mm de comprimento com 50 golpes, podendo variar entre ± 2 . Então é retirada uma pequena quantidade de amostra para definir o teor de umidade. Feito isso, acrescenta-se água à amostra e realiza-se os mesmos procedimentos até se atingir 40, 30, 20 e 10 golpes com variação de ± 2 . Com os cinco pontos já estabelecidos é possível encontrar o valor de LL através de uma equação linear baseada nos valores de umidade encontrados para cada número de golpes. Onde o valor de LL é o teor de umidade em que o solo atinge 25 golpes.

O ensaio do LP segundo a NBR 7180 é realizado através da homogeneização do solo passante na peneira de nº 4 com água destilada durante 15 e 30 min, onde o tempo aumenta conforme a maior porcentagem de argila na composição. Em seguida, retira-se cerca de 10,0 g de amostra e forma-se uma pequena bola, afim de rolar sobre uma placa de vidro com a palma da mão até atingir a forma de um cilindro de 3,0 mm de diâmetro e 100,0 mm de comprimento e começar a

aparecer fissuras indicando a transição entre o estado plástico para o semissólido e então é determinada a umidade do solo. Então é realizado o processo para cinco amostras afim de determinar a média, onde esta média é o limite de plasticidade.

Através destes dois parâmetros é possível determinar seu Índice de Plasticidade (IP) que é a zona em que o solo permanece em seu estado plástico (CAPUTO E CAPUTO, 2015). O IP é definido através da Expressão (1):

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Onde:

IP = Índice de Plasticidade;

LL = Limite de Liquidez;

LP = Limite de Plasticidade.

Segundo O'Flaherty (1973), o IP permite avaliar a expansão do solo. Quanto maior o valor do IP, maior é o potencial expansivo deste solo, além de outras propriedades também relacionadas ao LL e IP, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Algumas características....

Características	Comparativo de solos de igual L.L. com I.P. variando	Comparando solos de igual I.P., com L.L. variando
Compressibilidade	Igual	Maior
Permeabilidade	Menor	Maior
Vaziação de volume	Maior	-
Resistência a seco	Maior	Menor

Quadro 1 – Algumas características do solo indicadas pelos testes de consistência

Uma das grandes mudanças realizadas nesta classificação foi a introdução do índice de grupo (IG), que consiste em um número inteiro cujo valor varia de 0 a 20 definindo a capacidade de suporte que o solo possui, onde IG = 0 significa um solo de ótimo suporte, enquanto IG = 20 um solo de péssimo suporte. (BALBO, 2007).

A correlação entre o ISC/CBR e o IG para solos de climas temperados, se dá através da Expressão (2):

$$CBR = 14,1 \times \log_{10} \frac{26}{IG} \quad (2)$$

A determinação do IG se dá através da Expressão (3):

$$IG = (F - 35) \times [0,2 + 0,05 \times (LL - 40)] + 0,01 \times (F - 15) \times (IP - 10) \quad (3)$$

Sendo:

F = % passante na peneira #200 (0,074 mm);

LL = Limite de Liquidez;

IP = Índice de Plasticidade.

Observação:

Se IG for negativo, adota-se IG = 0;

O valor de IG deve ser arredondado para o inteiro mais próximo;

O IG para solos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-3 é sempre nulo;

O cálculo do IG para solos dos grupos A-2-6 e A-2-7 é feito parcialmente através do IP.

Segundo Caputo e Caputo (2015). Através do IG, pode-se definir que os solos granulares possuem IG entre 0 e 4, os siltosos IG entre 1 e 12, e os argilosos IG entre 1 e 20. A determinação do IG é obtida através dos limites de Atterberg e da porcentagem de material passante na peneira nº 200 (0,074mm).

A classificação TRB é obtida através da granulometria, onde é levado em consideração as porcentagens passantes nas peneiras de nº 10, 40 e 200, índice de Grupo e a plasticidade dos solos através de ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP). Com estes parâmetros obtidos por ensaios, é possível dividir o solo em grupos e subgrupos, conforme ilustrado na Tabela 1.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNER, 1981. É possível associar os valores de CBR com os Índices de Grupo (IG), conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 1 - Correlação entre o Índice de Grupo e CBR (DNIT, 2004)

Índice de Grupo (I.G.)	C.B.R. I.G.
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Tabela 2 - Classificação dos Solos (Transportation Research Board) (DNIT, 2006)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

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

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT, 2006. É possível associar os valores de CBR com os grupos classificatórios. Como ilustrado na Tabela 3.

Solos	CBR
A-1-a	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 80
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 80
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	menos de 2 a 10
A-6 e A-7	menos de 2 a 15

Tabela 3 - Valores prováveis de CBR para os grupos da classificação TRB (DNIT, 2006)

2.1. SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

O SUCS é baseado na classificação de Casagrande desenvolvida nos anos 40 pelo *United States Corps of Engineers* (USACE), em 1952 (CAPUTO E CAPUTO, 2015).

O sistema se baseia em três características. A separação do material de granulação grossa e fina através da peneira nº 200; a forma das curvas granulométricas distinguindo os solos bem graduados dos solos mal graduados, e na plasticidade e compressibilidade, tanto siltes como argilas, através do gráfico de plasticidade desenvolvido por Casagrande. Esta separação é dividida entre alta e baixa compressibilidade no ponto em que o LL é igual à 50% (CAPUTO E CAPUTO, 2015).

Os siltes e as argilas devem ser ainda diferenciados por outras propriedades físicas. Os siltes, por exemplo, apresentam resistência seca baixa e constituem conglomerados que são facilmente quebráveis com os dedos e quando umedecidos e agitados na mão, adquirem um aspecto brilhante ou vítreo que desaparece quando esfregados. As argilas, por outro lado, são mais intemperizadas e coloidais. (BALBO, 2007)

O USACE, utilizando-se do gráfico de plasticidade, realizou uma separação dos materiais por zonas em função da linha “a”, conforme ilustrado na Figura 2.

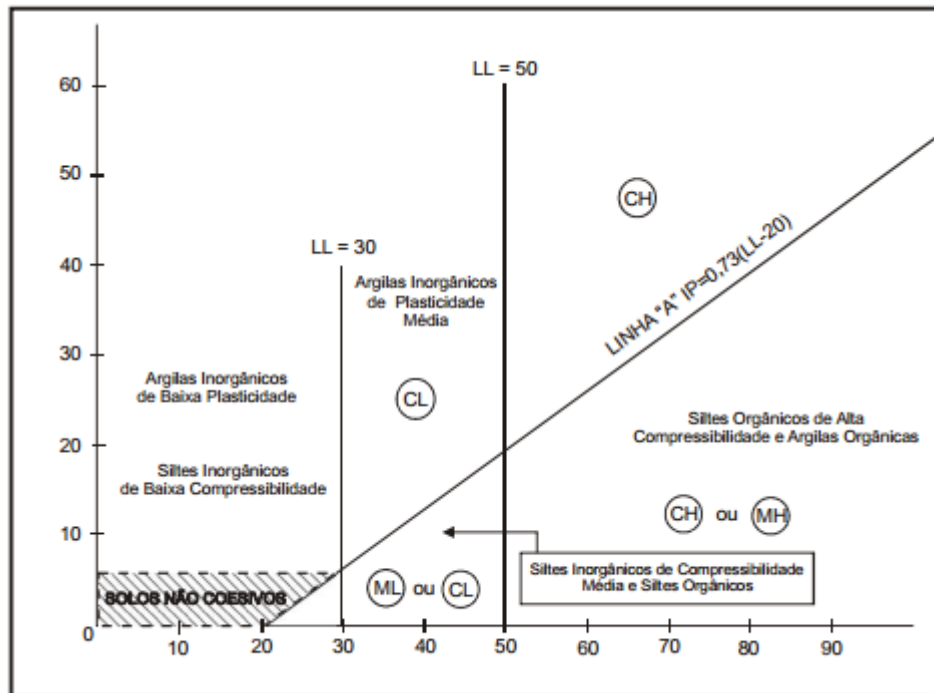


Figura 2 - Gráfico de Plasticidade (DNIT 2006).

Neste sistema, os solos são classificados em três grandes grupos:

- a) Solos grossos: onde no mínimo 50% do material é retido na peneira nº 200 (diâmetro da maioria dos grãos acima de 0,074mm).
- b) Solos finos: cujo material possua no mínimo 50% dos grãos com diâmetro menor que 0,074mm
- c) Turfas: solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e extremamente compressíveis.

No primeiro grupo, estão contidas as areias, solos arenosos, pedregulhos e solos pedregulhosos, onde são designados nas seguintes nomenclaturas:

Areias ou solos arenosos: SW, SC, SP e SM

Pedregulhos ou solos pedregulhosos: GW, GC, GP e GM

Onde:

- a) G (*gravel*): pedregulho
- b) S (*sand*): areia
- c) C (*clay*): argila
- d) W (*well graded*): bem graduado

e) P (*poorly graded*): mal graduado

f) M (palavra sueca *mo*): silte

No segundo grupo, estão contidos os solos siltosos e argilosos, que podem possuir pressibilidade alta ($LL > 50$) ou baixa ($LL < 50$), onde são designados de acordo com as seguintes nomenclaturas:

Solos de baixa compressibilidade: ML, CL e OL

Solos de alta compressibilidade: MH, CH, OH

Onde:

O (*organic*): orgânico

L (*low*): baixa

H (*high*): alta

No terceiro grupo, estão contidas as turfas. Este material é classificado como PT, de *peat* (turfa).

Pode-se ver que a simbologia adotada por esta classificação consiste em prefixos que correspondem aos grupos gerais e sufixos correspondente aos subgrupos.

O Quadro 2 apresenta as características de cada grupo denominado pelo sistema de classificação.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS (SUCS)		
RESUMO		
Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (Menos que 50% passando na peneira de nº 200)	Pedregulhos ou solos pedregulhosos	GW, GP, GM e GC
	Areias ou solos arenosos	SW, SP, SM e SC
SOLOS FINOS (Mais que 50% passando na peneira de nº 200)	Siltosos ou argilosos	Baixa compressibilidade (LL<50) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL>50) MH, CH e OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	PT

Quadro 2 - Resumo do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (USCS). (Caputo e Caputo, 2015)

Segundo o Manual do DNIT, 2006, é possível associar os grupos classificatórios da SUCS, com prováveis valores de ISC/CBR, conforme é mostrado na Tabela 4.

Solos	CBR
GW	40 a mais de 80
GP	30 a mais de 60
GM	20 a mais de 60
GC e SW	20 a 40
SP e SM	10 a 40
SC	5 a 20
ML, CL, CH	15 a menos de 2
MH	10 a menos de 2
OL, OH	5 a menos de 2

Tabela 4 - Valores prováveis de CBR para os grupos USCS (DNIT, 2006)

2.2. CALIFORNIA BEARING RATIO

O ensaio do CBR, Índice de Suporte Califórnia (ISC) em português, foi criado por O. J. Poter, Diretor da Divisão de Materiais do *California Highway Department*, atual *Caltrans*, no final dos anos 30. Originalmente esse ensaio foi concebido para definir a resistência dos materiais de camadas granulares dos pavimentos, onde os resultados eram associados conforme o tipo de tráfego (leve e pesado), e assim definindo as espessuras necessárias para estas camadas no pavimento, e em seguida associando os resultados CBR a outra família de curvas para dimensionamento de aeroportos e rodovias pelo USACE (SENÇO, 2007).

O objetivo do ensaio ISC/CBR é correlacionar a pressão necessária para um pistão penetrar numa amostra de solo convenientemente preparada com a pressão que o mesmo pistão leva para penetrar numa amostra de pedra britada padronizada (SENÇO, 1929).

Com o objetivo de prever a ruptura do pavimento, foram estudados diversos materiais granulares de boa qualidade empregados em bases de pavimentos, assim como padrão, foi adotada a média dos valores ensaiados, e então estabelecido como CBR padrão o valor de 100% (BERNUCCI, 1995).

Uma das grandes vantagens desta técnica é ser um ensaio difundido entre os engenheiros rodoviários, os quais desenvolveram com base na experiência a sensibilidade em relacionar o valor do suporte com a qualidade do material para a estrutura do pavimento (BERNUCCI, 1995).

Segundo Senço, 2007, o ensaio de CBR consiste em compactar cinco amostras de solo preparadas em cinco teores distintos de umidades a fim de determinar a máxima densidade de compactação que o solo atinge através de uma curva de compactação, onde o teor de água em que o solo atinge a maior densidade de compactação é denominada como sendo umidade ótima. Com as cinco amostras compactadas, inicia-se o ensaio elas são colocadas em um tanque com água com uma sobrecarga de 4,5 kg a fim de simular a influência que as camadas subjacentes exercem sobre o subleito. As amostras então permanecem durante 94 horas submersas no tanque. Durante este período são realizadas leituras de expansão através de um extensômetro para determinar a expansão do solo. A amostra é retirada do tanque após as 94 horas e colocada na prensa de CBR para determinação de seu suporte ou da sua resistência.

Segundo a NBR 9895, são realizadas leituras com sensibilidade de 0,001mm com o auxílio de um anel dinamométrico nas penetrações de 0,63; 1,27; 2,54; 5,08; 7,62; 10,16 e 12,70mm com velocidade constante de 1,25mm/min.

Com as leituras realizadas e a constante de aferição do anel dinamométrico é traçada a curva de pressão-penetração. Então se pegam as leituras referente a 2,54 mm e 5,08 mm, e divide-as pelas pressões padrões de 70,0 kg/cm² para a leitura de 2,54 mm, e 105,0 kg/cm² para a leitura de 5,08 mm, onde o maior valor destas leituras é o respectivo índice de suporte expresso em porcentagens.

2.3. SOLOS TROPICAIS

2.3.1. Ocorrência dos Solos Tropicais

Barroso (2002) ressalta que não existe terminologia consagrada para a definição de solos tropicais, gerando confusões no âmbito técnico-científico, por muitas vezes o mesmo termo definir diferentes materiais. A seguir vão ser apresentadas algumas das principais definições consideradas neste TCC.

Nogami (1996) define os solos tropicais segundo conceituação astronômica, como:

A conceituação mais simples e exata seria a astronômica, isto é, compreenderia os solos que concentram na faixa astronômica entre os trópicos de Câncer e Capricórnio afastados cerca de 23 graus norte e sul do equador e que delimitam zona tropical ou inter-tropical.

No entanto, Nogami posteriormente, de acordo com Barroso (2002), considerou esta definição não satisfatória, uma vez que entre os trópicos existem grandes variações solos com constituições distintas, devido às diferentes condições geológicas e climáticas que estão submetidos. Daí surge a definição climáticas de solos tropicais:

Mais racional e genérico, seria conceituar solos tropicais os que ocorrem em área de climas quentes e úmidos.

Segundo Santana e Gontijo (1987), os solos são formados por meio de processos de meteorização das rochas, que podem ser: físicos, atribuídos principalmente pela variação de temperatura; químicos, caracterizados pelos processos de dissolução, hidrólise, oxidação, redução, entre outros; e biológicos resultantes da ação dos seres vivos.

Vargas (1985) ressalta que nas regiões tropicais, o processo de ocorrência de fraturas nas rochas é mais intenso em regiões de clima tropical, comparado às regiões de clima temperado. Na região nordeste do Brasil, por exemplo, uma rocha é

submetida uma amplitude térmica de 63°C, em menos de 17 horas, enquanto que em regiões temperadas é de aproximadamente 36°C durante este mesmo período.

Santana e Gontijo (1987) destacam que em climas tropicais (quente e úmido), há predominância do processo químico, sob a ação da água e temperatura. Dos processos químicos atuantes na meteorização dos solos, em climas úmidos, os autores destacam a hidrólise, que ataca os silicatos das rochas, descompondo-os em vários componentes, entre eles: bases (muito solúveis), ferro, alumínio e sílica. Após esta reação, os componentes básicos são carregados pela ação da água, resultando apenas na superfície os componentes ácidos, sendo ainda maior a acidez nos climas frios. Quanto mais ácido é o solvente, menor a dissolução da sílica e maior a do ferro e alumínio. Considerando o processo descrito, os autores caracterizam que geralmente:

- Solos de clima quente e úmido são constituídos em sua camada superior de pequena quantidade de sílica (SiO_2) e grande quantidade de óxidos de ferro e alumínio (Fe_2O_3 e Al_2O_3);
- Solos de clima frio e úmido possuem horizontes superficiais ricos em sílica e cinzento.

Santana e Gontijo (1987) definem, pedologicamente, como “laterização” (ou “ferratilização”) o processo de empobrecimento de sílica e enriquecimento de óxidos de ferro e alumínio, denomina-se pedologicamente de “laterização” ou “ferralitização”.

No entanto, para Nogami (1995) não seria correto conceituar como solos tropicais aqueles submetidos ao clima tropical, pois desta forma, seriam enquadrados na mesma classe alguns tipos de solos, com propriedades distintas, que se formam independente deste clima, como os solos de dunas. Portanto o autor define os solos tropicais segundo conceituação geotécnica:

Aqueles que apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação no mesmo de processos geológicos e/ou pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas.

Vargas (1985), sob o ponto de vista geotécnico, define como solos tropicais aqueles derivados de um processo intenso de intemperização prevalentes em regiões tropicais. Estes solos podem ser encontrados em mantos espessos, compostos principalmente de dois horizontes (mais frequentes). O horizonte superficial, cujo processo de intemperização é mais intenso, é encontrado os solos lateríticos. Abaixo deste horizonte, é encontrada uma camada de solos residuais com macroestrutura similar à da rocha matriz, onde neste horizonte são encontrados os solos saprolíticos. Na Figura 3 está apresentado um perfil esquemático da ocorrência de solo tropicais.

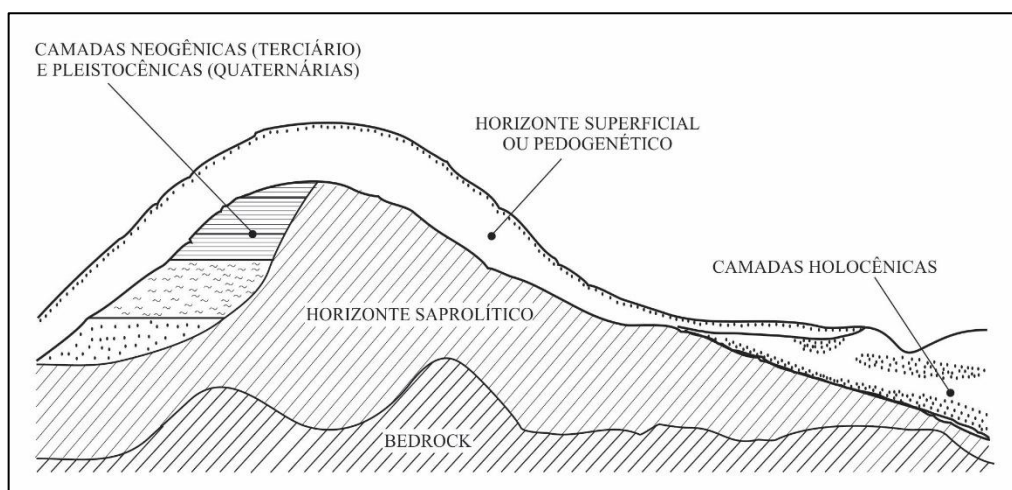


Figura 3 – Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical (Nogami e Villibor, 1995).

Melfi et al. (1985) relata que as primeiras fases do processo de laterização são caracterizadas pela diminuição da resistência e mudança de coloração da rocha, que ocorrem como consequência da micro-fissuração, seguido pela dissolução e redistribuição dos minerais primários da rocha, originando os minerais secundários. Em regiões tropicais, devido a boa condição de drenagem, os minerais secundários são rapidamente dissolvidos, até que a rocha se torne totalmente alterada. Simultaneamente a este processo, a liberação e individualização do Fe, fornece ao solo uma coloração mais escura. O processo de dissolução fornece ao solo o aspecto poroso.

2.3.2. Solos Lateríticos

Segundo Melfi et al. (1985), o termo “laterítico” foi utilizado por Buchanan em 1807, para descrever um material natural de coloração típica vermelha ou amarela, com grande quantidade de ferro e alumínio em sua constituição, que quando em sua umidade natural são porosos, mas quando submetidos à secagem, são resistentes como um tijolo.

Os solos lateríticos são conhecidos também por “solos maduros”, que segundo Cozzolino e Nogami (1993) apresentam as características seguintes:

a) Posição no perfil: constituem as camadas mais superficiais das áreas bem drenadas;

b) Macrofábrica e cor: apresentam, geralmente, macrofábrica homogênea, caracterizada por agregações (torrões), predominam neste solo as matrizes vermelho e amarelo. Na Figura 5(a) é apresentada uma macrofábrica típica de um solo laterítico;

c) Espessura: atingem frequentemente espessura superior a 2,0 m, podendo chegar a 10,0 m;

d) Constituição mineralógica e microestrutura: presença de grãos muito resistentes mecânica e quimicamente, na fração areia e pedregulho. A fração argila é constituída de elevada porcentagem de partículas constituídas de hidróxidos e óxidos de Fe e Al, tendo geralmente a caulinita como argilo-mineral. Os grãos mais finos estão aglutinados, formando um aspecto esponjoso. Em escala macroscópica, observa-se a presença de torrões, resistentes à ação da água, e grande quantidade de vazios, o que justifica a baixa massa específica e elevada permeabilidade *in situ*.

Na Figura 5 (b) é ilustrado a microestrutura de um solo laterítico, resultado do Ensaio de microscopia eletrônica de varredura realizado por Nogami e Villibor (1995). Os autores relatam que a constituição da fração argila dos solos lateríticos é um dos principais fatores do comportamento peculiar destes solos, quando comparados com aqueles de mesma granulometria considerados na bibliografia geotécnicas de

países situados em climas não tropicais. No Quadro 4 é apresentado um resumo dos principais constituintes mineralógicos presentes nos solos lateríticos.

2.3.3. Solos Saprolíticos

Segundo Melfi et al. (1985), o termo “saprolítico” foi utilizado inicialmente por Becker em 1895, para descrever um material com aspectos texturais e estruturais da rocha que lhe deu origem. No entanto, além de outros aspectos, este solo se diferencia da rocha devido à perda de resistência, resultante do processo de dissolução dos silicatos e formação do argilo mineral caolinita.

Seguem algumas características dos solos lateríticos citadas por Cozzolino e Nogami (1993):

a) Posição no perfil: constituem camadas subjacentes às lateríticas ou outros solos pedogenéticos, ou ainda, a solos sedimentares ou transportados;

b) Macrofábrica e cor: apresentam cores variadas, apresentando manchas com feições da rocha matriz ou desenvolvidas no processo de intemperismo. Os solos possuem macrofábrica heterogênea (manchados, listrados, xistosos), com coloração característica bastante variada, tais como: branca, preta, azul, verde, roxa, rósea, amarelo, podendo apresentar-se homogênea em pequenas porções. Na Figura 4(a) é apresentada uma macrofábrica típica de um solo saprolítico;

c) Espessura: apresentam espessuras variadas, podendo atingir várias dezenas de metros;

d) Constituição mineralógica e microestrutura: presença frequente de grande número de minerais, muitos deles decorrentes no processo de intemperização e herdados da rocha matriz. Os minerais neoformados constituem, na maioria dos casos, associações facilmente distinguíveis em microscopia eletrônica de varredura. Na fração argila pode ocorrer grande variedade dos argilo-minerais e fração silte pode ter mineralogia muito variada e peculiar, como os macrocristais de caulinita e mica, que podem impor comportamentos peculiares a estes solos de acordo com a Figura 5 (b).

No Quadro 3 é apresentado um resumo dos principais constituintes mineralógicos presentes nos solos saprolíticos.



Figura 4 - Exemplo de macrofábrica de solos tropicais: a) homogênea com agregação, latossolo vermelho-amarelo (laterítico); b) manchada, isotópica, contínua (solo saprolítico de granito (Nogami e Villibor, 1995))



Figura 5 - Microfábrica de um solo laterítico (a) e saprolítico (b), com aumento de 10.000X (Villibor, 1981)

Quadro 3 - Tabela-resumo dos principais constituintes dos solos lateríticos e saprolíticos (informações de Nogami, 1971)

Granulometria	Mineralogia e Considerações	
	Solo Laterítico	Solo Saprolítico
Areia e Pedregulho ($\phi > 0,075$ mm)	Quartzo (mineral predominante, apresenta coloração avermelhada e depressões) Magnetita e ilmenita (minerais pesados) Laterita ou concreção laterítica (constituída de óxidos hidratados de Fe e Al, associadas a magnetita, ilmenita, hematita e quartzo)* Torrões e agregados de argila	Quartzo (mineral que pode ser predominante) Feldspato (mineral que apresenta apreciável absorção de água) Mica (mineral que confere ao solo elevada expansão, baixa capacidade de suporte, entre outras) Fragmentos de rochas OBS: Constituição mineralógica muito variável, em função do grau de intemperismo
Silte ($0,002 < \phi < 0,075$ mm)	Quartzo (mineral predominante) Magnetita e ilmenita (minerais proveniente de rochas básicas, quando existentes) Torrões e agregados de argila (em função do tipo de defloculante utilizado) Laterita ou concreção laterítica (vide *)	Quartzo (mineral) Caolinita (forma de "sanfona" e alongadas) (família dos argilo-minerais, que confere ao solo razoável expansibilidade) Micas (mineral que confere ao solo elevada expansão, baixa capacidade de suporte, entre outras)
Argila ($\phi < 0,002$ mm)	Óxidos e hidróxidos de Fe e Al hidratados Caolinita (família dos argilo-minerais menos ativo coloidalmente) Materiais orgânicos sob forma de húmus (pequenas porcentagens) OBS: Caolinita é envolvida pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al	Montmorillonita e illita (Argilo-minerais mais ativos) Argilo-mineral caolinita (família dos argilo-minerais menos ativo coloidalmente) Materiais orgânicos sob forma de húmus (eventualmente)

2.3.4. Dificuldades e Deficiências das Classificações Geotécnicas Tradicionais na Caracterização de Solos Tropicais

Nogami e Villibor (1980) relatam que no Brasil, muitas das especificações para caracterização e classificação de solos para pavimentação, adotadas em órgãos rodoviários oficiais como o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo

(DER/SP), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), entre outros, utilizam-se de especificações norte americanas fundamentadas nas determinações de granulometria por peneiramento. Das classificações tradicionais destacam-se a TRB e o SUCS.

Nestas classificações os solos são reunidos em grupos e subgrupos em função de sua granulometria, LL, IP e IG, cujos valores são designados de propriedades índices. A seguir vão ser apresentadas algumas limitações e deficiências destas classificações quando aplicadas aos solos tropicais.

Carvalho (1985) atribui as deficiências e dificuldades das propriedades índices à microestrutura peculiar dos solos lateríticos, para classificação de solos tropicais. Estes solos são caracterizados por terem na fração argila, predominantemente, o argilo-mineral caolinita, revestido por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio hidratado.

2.3.4.1. Granulometria

Segundo Nogami e Villibor (1980), os grupos da classificação TRB, com exceção do A-1 e A-3, são subdivididos em duas grandes classes:

- a) Solos com menos de 35% de fração com $\emptyset < 0,075$ mm (integrado pelo grupo A-2 e sub-grupos A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7); e
- b) Solos com mais de 35 % de fração com $\emptyset > 0,075$ mm (integrado pelos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, e sub-grupos A-7-5 e A-7-6).

Os solos do grupo A-2, em geral são considerados como os de maior desempenho para utilização com camada de sub-base e subleito. Este fato evidencia que os melhores solos apresentam elevada porcentagem de fração areia. No entanto, este fato é verdadeiro quando a fração areia é constituída predominantemente de quartzo. No entanto esta hierarquização não é válida quando o constituinte predominante na fração areia for de mica, por exemplo. A elevada porcentagem de

mica na fração areia confere ao solo características “ruins” em relação a seu suporte, resiliência e expansão (NOGAMI E VILLIBOR, 1980).

2.3.4.2. Limites de Consistência

Nogami e Villibor (1980) relatam que, de maneira geral, as classificações tradicionais hierarquizam os solos, como sendo os de melhor desempenho, com baixo valor de LL, IP e baixa porcentagem da fração que passa na peneira 0,075 mm de abertura, isto é, com baixo IG.

Segundo Ignatius (1988) os valores dos limites de consistência variam consideravelmente com o “grau” de desagregação da microestrutura do solo na execução do ensaio, sobretudo dos constituintes da fração argila dos solos lateríticos. Desta forma, o valor de LL e IP para um mesmo solo pode variar, respectivamente, entre 50 a 80% e 20 a 50%.

Villibor (1981) apresenta os dados do Programa Interlaboratorial desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT/SP). Alguns dos resultados obtidos estão apresentados na Figura 6, onde foram determinados os limites de consistência de três amostras nos laboratórios do DER/SP e IPT/SP, afim de confrontar os resultados obtidos. A análise dos resultados revela a grande dispersão dos ensaios de LL e LP.

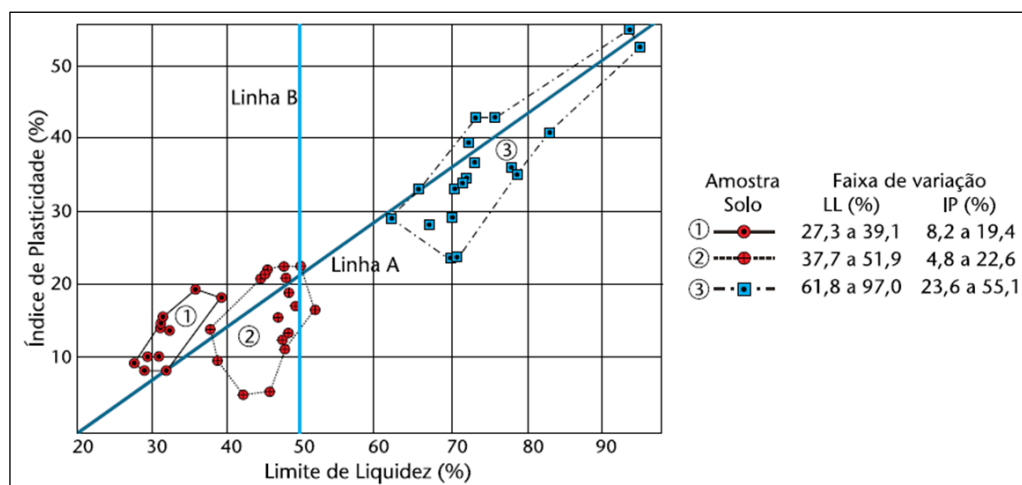


Figura 6 - Variação dos valores de LL e IP de três amostras (Programa intelaboratorial, DER-SP e IPT). (Villibor, 1981)

2.3.4.3. Índice de Grupo

A TRB utiliza-se o IG do solo como uma das propriedades mais relevantes. Sua finalidade é estabelecer diferenças de propriedades entre solos de um mesmo grupo e para prever o valor do CBR do solo. Na Figura 8 é apresentada a reta de correlação entre CBR e IG, utilizada no método de Projeto de Pavimentos Flexíveis de Souza (1979). Nesta os valores de CBR e IG são inversamente proporcionais (NOGAMI E VILLIBOR, 1995).

A inadequação do IG, quando aplicada aos solos tropicais, é verificada na Figura 7, onde é apresentada a reta que relaciona o CBR e IG proposto por Souza (1979) e os valores obtidos por Villibor (1981) para solos lateríticos e saproríticos, verificando que estes solos não apresentaram o IG esperado por Souza (1979). Nesta, um solo com IG=8, por exemplo, apresenta CBR de 2% (solo saprolítico) e 20% (solos laterítico). Estes valores também diferem substancialmente do avaliado pela TRB, ou seja, CBR=7,5%, mostrando a precariedade de seu uso para este fim.

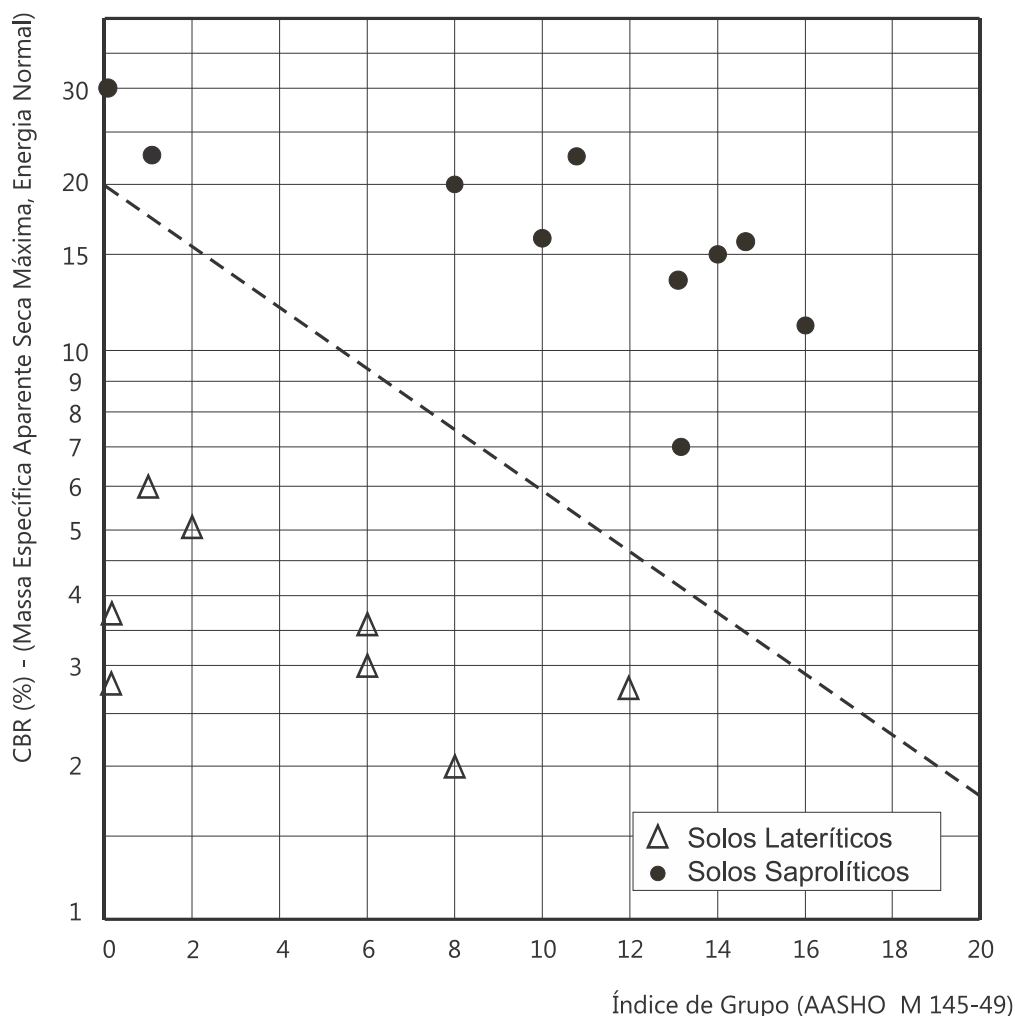


Figura 7- Variação do CBR em função do Índice de Grupo. (1) Reta de correção aproximada considerando dados da tabela constante no método do Projeto de Pavimentos Flexíveis de Souza (1979). Dados obtidos de Nogami (1972) e Nogami e Villibor (1979), (Nogami e Villibor, 1995).

2.3.4.4. Suporte do Solo Compactado

O ensaio de CBR minora as deficiências das propriedades índices considerados nas classificações tradicionais. No entanto, Nogami e Villibor (1980) apresentam inúmeras limitações, destaca-se sobretudo o uso das condições do ensaio (imersos e com uso de sobrecarga padrão) que não permite uma avaliação do desempenho do solo nas condições ambientais tropicais. Ainda, os mesmos autores apontam como uma dificuldade deste ensaio a grande quantidade de material envolvida.

Bernucci (1992) relata que a peculiaridade do solo laterítico quanto ao CBR não é apenas o ganho de sua resistência com a perda de umidade, mas sim a manutenção desta propriedade após submetidas ao aumento de umidade. As argilas, por exemplo, podem apresentar elevada resistência quando compactadas adequadamente. No entanto, quando o teor de umidade aumenta, as argilas expandem e perdem resistência. Nas condições climáticas normalmente ocorrentes nos Estados Unidos, onde foi desenvolvido o ensaio, 85% do território sofre efeito do degelo que atinge as camadas do pavimento, o que justifica a impossibilidade do uso de argilas para este fim nos métodos tradicionais. Na Figura 08 é apresentada a profundidade da penetração do degelo na estrutura de pavimento, durante os anos de 1959 a 1961, nos Estados Unidos.

No entanto, Villibor (1981) investigou que em condições climáticas brasileiras, prevalecentes especificamente no Estado de São Paulo, o teor de umidade da base após um tempo é inferior à de compactação (abaixo da umidade ótima), diferente do que ocorre em países de clima frio e temperado. O autor monitorou a umidade da base de trechos experimentais após a abertura ao tráfego ao longo do tempo. Na Figura 09 é apresentado os resultados obtidos pelo autor. Ressalta-se que o mês de janeiro, período de análise, é o de maior precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo.

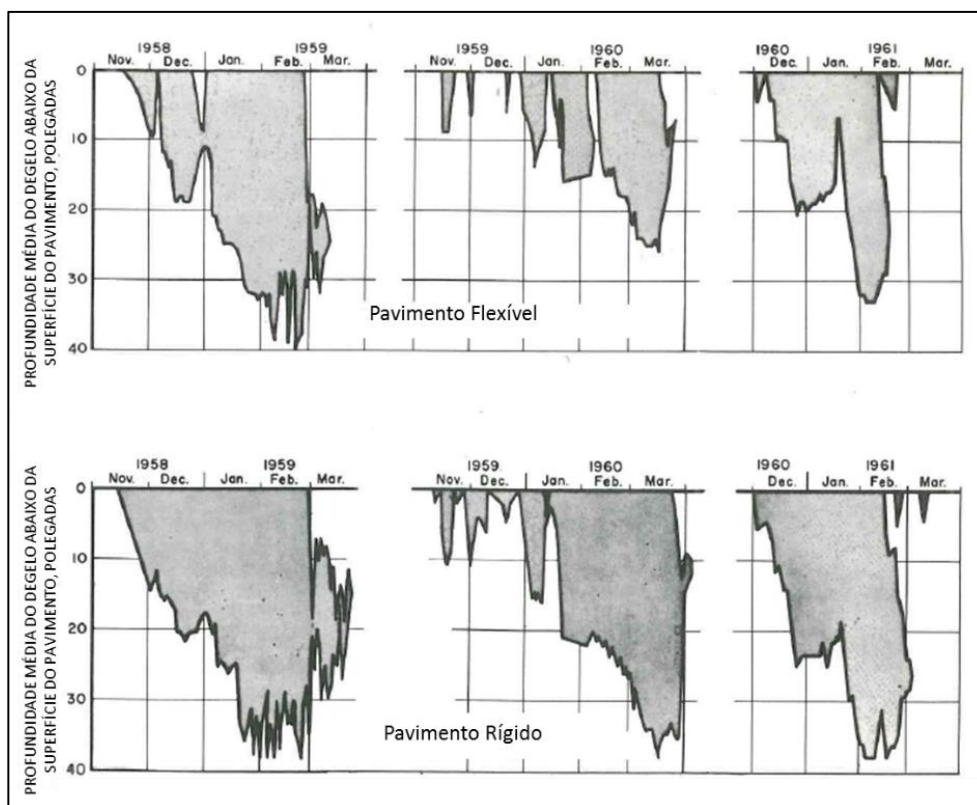


Figura 8- Profundidade na penetração do degelo na estrutura de pavimento (Highway Research Board, 1961).

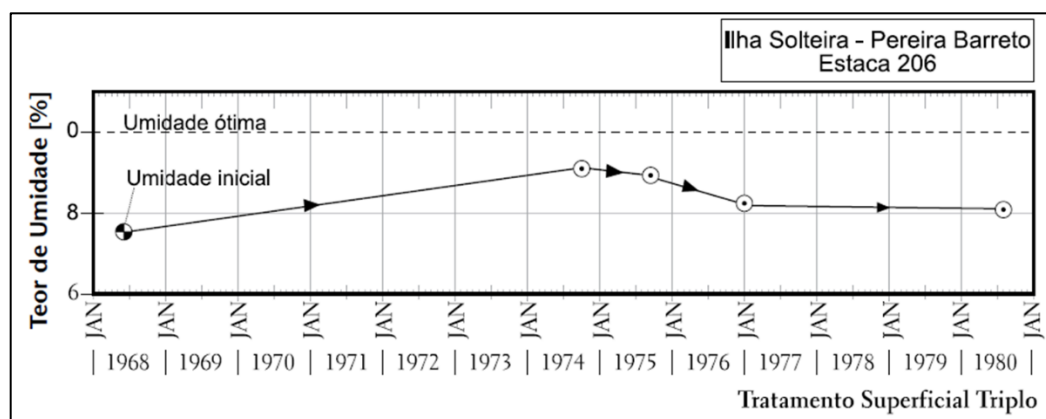


Figura 9-Variação do teor de umidade da base de solo arenoso fino laterítico. Trecho experimental: Ilha Solteira – Pereira Barreto (Villibor, 1981)

2.4. METODOLOGIA MCT

2.4.1. Considerações Iniciais

As classificações desenvolvidas para solos tropicais foram desenvolvidas inicialmente para utilizar apropriadamente os solos arenosos finos lateríticos (SAFL) para bases de pavimentos de tráfego leve, que até então eram considerados inapropriados pelas classificações e especificações tradicionais para este fim (COZZOLINO & NOGAMI, 1993).

Esta metodologia baseia-se na determinação de propriedades mecânicas e hídricas dos solos tropicais quando compactados. Os ensaios reproduzem o comportamento dos solos tropicais quando compactados em camadas no campo, submetidos as condições ambientais tropicais (FORTES & MERIGHI, 2003).

2.4.2. Ensaio da Classificação MCT

2.4.2.1. Compactação MCV

Parsons (1976), do *Transport and Road Research Board* (TRRL) desenvolveu um método expedito e seguro para medir um valor associado à condição de umidade do solo a partir da compactação, a fim de verificar rapidamente no campo o teor de umidade do solo e as condições de trabalhabilidade associadas a este teor, visando auxiliar nos serviços de terraplenagem. Este método foi designado de *Moisture Condition Value* (MCV), Valor da Condição de Umidade (VCU) em português.

Segundo Sória e Fabbri (1980), o ensaio MCV consiste basicamente na determinação de esforços de compactação (número de golpes) necessários para compactação completa do solo em certo teor de umidade. Desta forma o corpo de prova (CP) resultante do final do ensaio apresenta massa específica aparente seca

próxima à condição de saturação (volume de ar no solo igual a zero). Para que o solo atinja esta condição de saturação, a energia aplicada (número de golpes com soquete padrão) varia para cada teor de umidade. As principais características técnicas do equipamento e ensaio MCV estão apresentadas na Tabela 4.

A compactação MCV é conduzida de forma que sejam medidas as alturas do CP após a aplicação de número de golpes crescente de golpes, seguindo a série: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, ...n, ...4n. Este processo é repetido até que não seja observada nenhuma variação significativa da altura do corpo de prova ou exsudação nítida (PARSONS, 1976).

Parsons e Bolden (1979) propuseram uma classificação de solos baseada nas características da curva de calibração do MCV, ou seja, relação obtida graficamente entre valor MCV e teor de umidade de um determinado solo, conforme exemplo mostrado na Figura 10. A partir desta curva são determinados os parâmetros: “a” definido pelo coeficiente angular da reta e “b” seu coeficiente angular. Estes coeficientes foram utilizados pelos autores para o desenvolvimento de uma nova classificação, em que são inferidas a graduação e plasticidade do solo.

Parsons (1976) caracterizou o aumento da densidade corpo de prova, pela diminuição de sua altura quando se quando se quadruplica o número de golpes aplicados. A penetração do soquete, ou afundamento do corpo de prova é calculado conforme Equação 4.

$$\Delta an = An - 4An \quad (4)$$

Onde:

Δan = Diferença de altura do corpo de prova (ou penetração do soquete), expressa em 0,01 mm;

An = Altura do corpo de prova após n golpes, expressa em 0,01 mm; e

$4An$ = Altura do corpo de prova após 4n golpes, expressa em 0,01 mm;

O índice MCV obtido pelo ensaio para um determinado teor de umidade, é definido em função do número de golpes aplicado para $\Delta_{an} = 5,0$ mm, obtido graficamente pela curva de deformabilidade (“ Δ_{an} ” versus “n”). O MCV é calculado conforme expressão 5.

$$MCV = 10 \log_{10} B \quad (5)$$

Onde:

MCV = *Moisture Condition Value*; e

B = Número de golpes correspondente à intersecção da reta $\Delta_{an} = 5,0$ mm com a curva de deformabilidade.

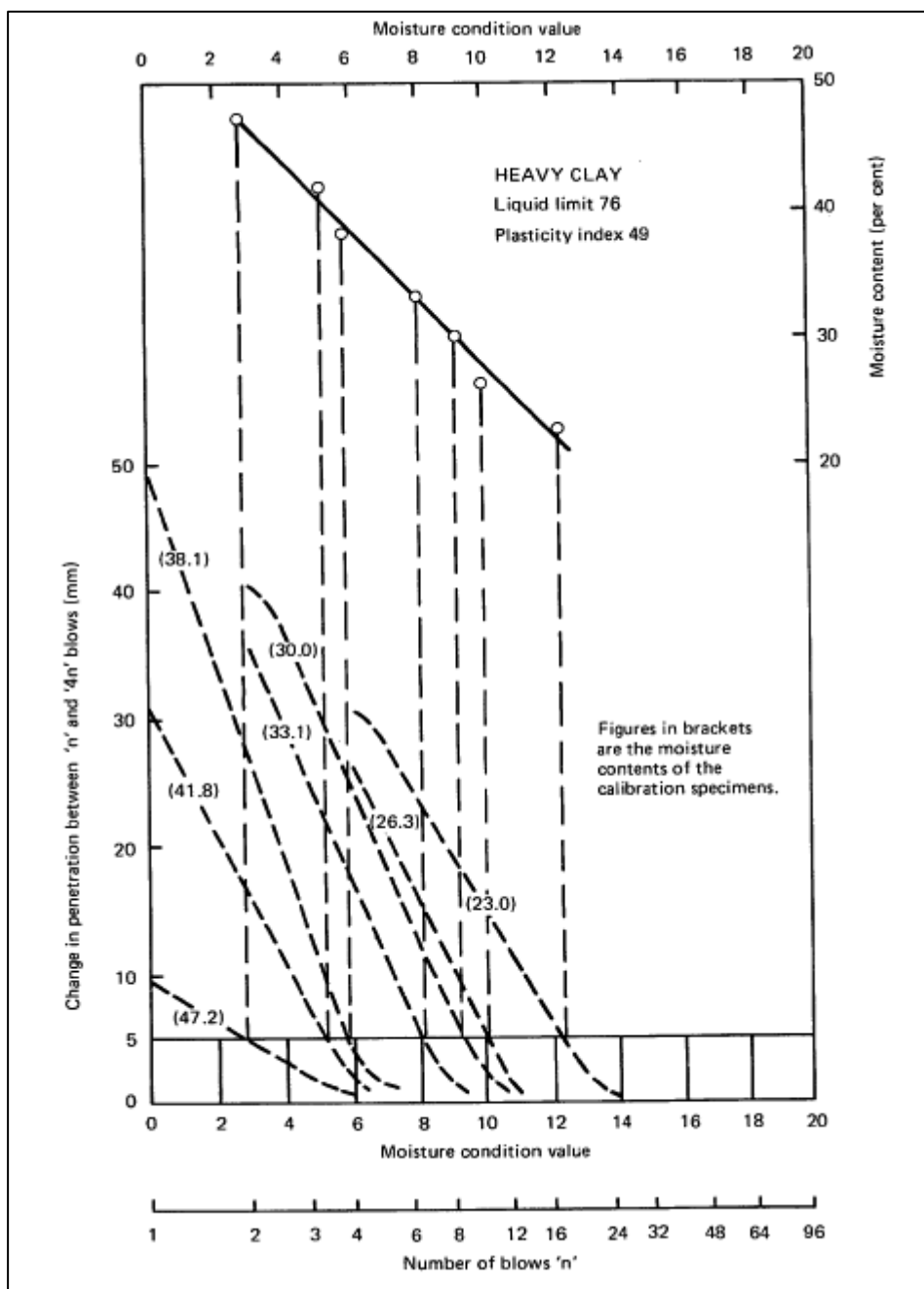


Figura 10 - Exemplo de curvas de deformabilidade e calibração obtidas de um solo argiloso (Parsons e Bolden, 1979)

2.4.2.2. Compactação Mini-MCV

Segundo Fabbri (1994), o professor Job Shuji Nogami em 1979, apresentou como proposta uma adaptação do ensaio MCV ara corpos de prova de dimensões reduzidas, utilizando-se o equipamento do ensaio Mini-CBR, desenvolvido por ele em

1974. Este método foi designado Mini-MCV, cujas principais diferenças em relação ao ensaio original estão apresentadas na Tabela 4.

	MCV	MINI-MCV
Diâmetro do molde	100 mm	50 mm
Massa de solo úmido para ensaio	1500 g	200 g
Massa do soquete	7000 g	2270 g
Altura de queda do soquete	250 mm	305 mm
Valor da diferença de altura para definição do MCV ou Mini-MCV	5 mm	2 mm

Tabela 5 - Principais medidas dos ensaios MCV e Mini-MCV, (Sória e Fabbri, 1980)

Das principais vantagens do ensaio Mini-MCV em relação ao MCV, Sória e Fabbri (1980) destacam: a menor quantidade de amostra utilizada no ensaio, equipamento mais portátil e possibilidade de determinação de outras propriedades (mini-CBR, contração, expansão, entre outras), utilizando o mesmo molde de compactação. No entanto, o Mini-MCV só pode ser realizado em solos com pequena porcentagem retida na peneira de 2,0 mm de abertura.

O ensaio Mini-MCV, proposto em 1979, utiliza a mesma série de golpes e método de cálculo das deformações dos corpos de prova (Δ_{an}) durante a compactação preconizada por Parsons. No entanto, diferente do MCV que é calculado para $\Delta_{an} = 5,0$ mm, o Mini-MCV é calculado conforme expressão 6 (NOGAMI & VILLIBOR, 1980).

$$MCV = 10 \log_{10} B \quad (6)$$

Onde:

MCV = Moisture Condition Value;

B = Número de golpes correspondente à intersecção da reta $\Delta an = 2,0$ mm com a curva de deformabilidade.

Posteriormente, Nogami e Villibor (2000) propuseram o método designado “Mini-MCV Simplificado”. Neste método foi introduzido o uso de uma nova série de golpes para compactação e diferente maneira para cálculo das deformações dos corpos de prova. Os autores destacam como vantagem deste novo método: 1) considerável redução do número de golpes de soquete e das leituras da variação da altura do corpo de prova; 2) Clareza para interpretação das curvas de deformabilidade. A série de golpes proposta para o Mini-MCV Simplificado é constituída de 2 tipos:

- a) Crescente (ou contínua): $n = 3, 6, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120...$, ou qualquer outra série, inclusive a de Parsons, que defina apropriadamente a curva de deformabilidade.
- b) Constante (ou descontínua) – $n = 10$ e 20 golpes.

Segundo Nogami e Villibor (2000), para cada teor de umidade, calcula-se a diferença de altura do corpo de prova pela expressão (7).

$$\Delta an = An - A_F \quad (7)$$

Onde:

Δan = Diferença de altura do corpo de prova (ou penetração do soquete), expressa em 0,01 mm;

An = Altura do corpo de prova após n golpes, expressa em 0,01 mm; e

A_F = Altura do corpo de prova no seu estado de máxima densidade, expressa em 0,01 mm;

A partir destes valores, para cada teor de umidade, traçam-se as curvas de deformabilidade, plotando-se no eixo da ordenada os valores de An e, no eixo da abcissa, o número de golpes “ n ” em escala logarítmica. Desta forma obtém-se para

cada teor de umidade, uma curva de deformabilidade conforme Figura 11. A intersecção dessa curva com a linha $\Delta a_n = 2,0$ mm fornece diretamente o valor do número de golpes B a partir do qual determina-se o valor Mini-MCV, dado pela Equação 8 (MOURA, SANT'ANA E BERNUCCI, 2006).

$$\text{Mini-MCV} = 10 \log_{10} B \quad (8)$$

Onde:

Mini-MCV = Mini Moisture Condition Value;

B = Número de golpes correspondente à intersecção da reta $\Delta a_n = 2,0$ mm com a curva de deformabilidade.

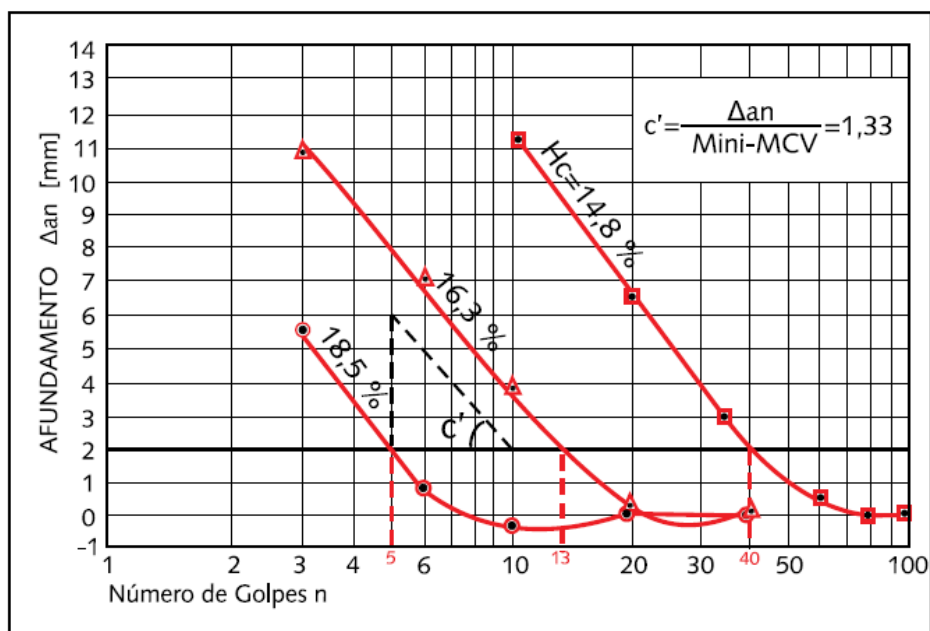


Figura 11 - Família de Curvas de deformabilidade obtidas através do ensaio de Mini-MCV, (Nogami e Villibor, 2009)

Além dos parâmetros originais do ensaio MCV, obtidos por meio da curva de deformabilidade, o Mini-MCV fornece uma família de curvas de compactação do solo, representando em abscissa o valor do teor de umidade para cada porção e, em ordenada, a respectiva massa específica aparente. Cada curva de compactação

corresponde a uma energia aplicada, ou seja, mesmo número de golpes (FABBRI, 1994).

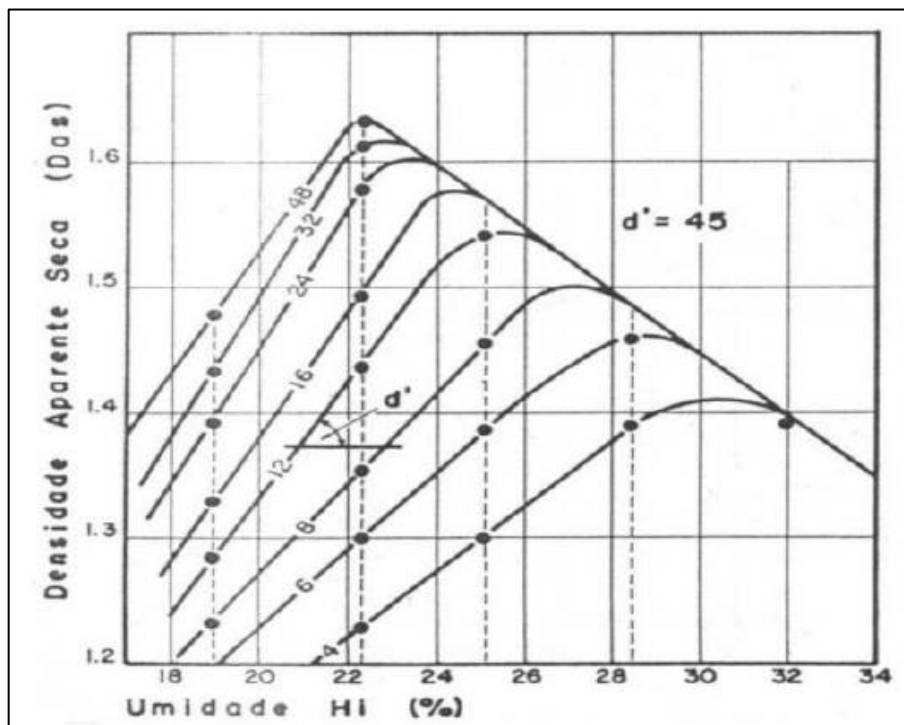


Figura 12- Família de curvas de compactação do ensaio Mini-MCV, (Bernucci, 1992)

2.4.2.3. Perda de Massa por Imersão

O ensaio de Perda de Massa por Imersão foi originalmente desenvolvido para o estudo de previsão de erodibilidade de solos tropicais, proposto por Nogami e Villibor (1979).

Os corpos de prova obtidos da compactação Mini-MCV são extraídos parcialmente (10 mm) fora do molde cilíndrico. Após são colocados horizontalmente em tanque de imersão e verifica-se a massa desprendida do corpo de prova após um período de 20 horas, conforme apresentado no croqui da Figura 13.

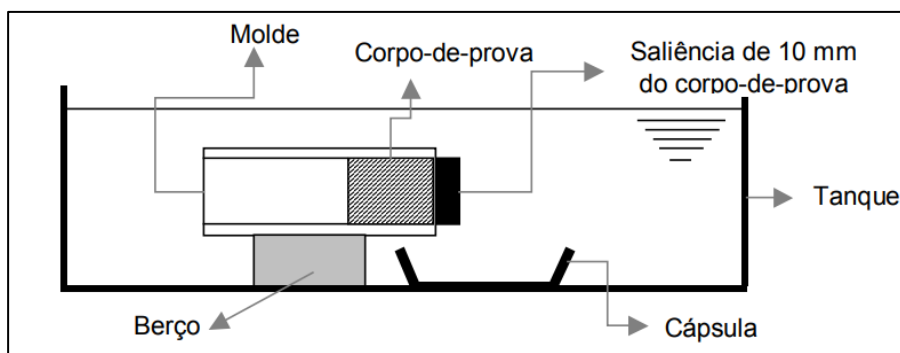


Figura 13 – Croqui do ensaio de Perda de Massa por Imersão, (Moura, Sant’Ana e Bernucci, 2006)

Este ensaio avalia a “estabilidade” e coesão do solo compactado, quando imerso em água, o que permite acentuar a diferença entre um solo laterítico e não-laterítico, quando existem semelhanças na curva de compactação obtido do ensaio Mini-MCV (MOURA, SANT’ANA E BERNUCCI, 2006).

O valor da Perda de Massa por Imersão (P_i) para uma determinada energia de compactação, expressa em porcentagem, corresponde à relação entre a massa seca desprendida e a massa seca equivalente ao volume do corpo de prova deslocado do molde (1,0 cm), antes do início do ensaio, calculado conforme expressão 9.

$$P_i = \frac{M_s}{M_{so}} \cdot F_c \cdot 100 \quad (9)$$

Onde:

P_i = Perda de massa por imersão (%);

M_s = Massa de solo seco referente à parte desprendida do corpo de prova (g);

M_{so} = Massa de solo seco correspondente ao volume da parte do corpo de prova deslocada de 10 mm para fora do cilindro (g); e

F_c = Fator de correção. $F_c = 1,0$ quando ocorre desprendimento normal do solo (esperado). $F_c = 0,5$ quando a parte desprendida é um monobloco.

Vertamatti (1998) introduziu novos fatores de correção (F_c) para cálculo do valor de P_i , de acordo com o aspecto da massa desprendida durante a imersão do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 14.

Fator de Correção	0,00	0,25	0,50	0,50	0,75	1,00
Descrição do Bloco Desprendido	Sem queda	Maciço	Fissurado	Parcial	Fragmentado	Massa dispersa
Formato do Bloco Desprendido						

Figura 14 – Fatores de correção (F_c) para cálculo do P_i , (Vertamatti, 1998)

Para fins classificatórios, com os resultados de P_i para cada teor de umidade ensaiado, traça-se a curva P_i versus o índice Mini-MCV (obtido do ensaio de compactação Mini-MCV), locando no eixo das ordenadas os valores de P_i e no eixo da abscissa os valores do Mini-MCV, conforme Figura 16. Desta curva é extraído o parâmetro P_i , utilizado para a classificação MCT, conforme será visto no item 2.5.3. Vertamatti (1988) observou que as formas das curvas P_i versus Mini-MCV está relacionadas às características genéticas dos solos.

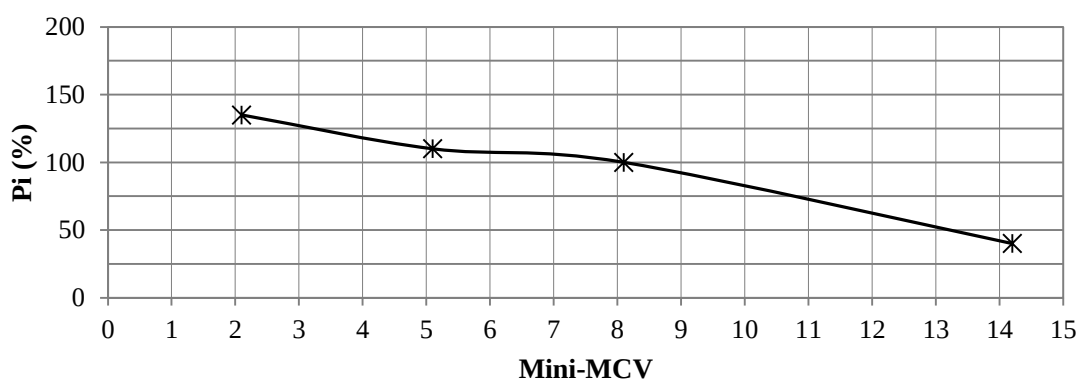


Figura 15 – Exemplo de curva P_i versus Mini-MCV, (Nogami, Villibor e Serra, 1987)

2.4.3. Classificação MCT

A Classificação MCT divide os solos tropicais em duas grandes classes: Classe L, que compreende os solos de comportamento laterítico, e Classe N, que compreende os solos de comportamento não laterítico.

Segundo Cozzolino e Nogami (1993), o termo “comportamento” deve-se ao fato da classificação se basear em propriedades mecânicas e hídricas de corpos de prova compactados, e não na morfologia e/ou gênese do solo. A relação entre solos de comportamento laterítico com os pedologicamente lateríticos é complexa. No geral, pode-se afirmar que solos pedologicamente lateríticos, apresentam comportamento laterítico, no entanto, muitos solos de comportamento laterítico podem não ser considerados pedologicamente lateríticos. A Classificação MCT é obtida por meio do uso do gráfico apresentado na Figura 17, onde no eixo das abscissas é representado o coeficiente c' e no eixo das ordenadas o índice e' .

2.4.3.1. Coeficiente c'

O coeficiente c' é numericamente igual ao coeficiente angular da parte mais retilínea e inclinada da curva da curva de deformabilidade de Mini-MCV = 10, obtido do ensaio de compactação Mini-MCV. Quando inexistente uma curva com este valor de Mini-MCV, c' é obtido por interpolação gráfica a partir da reta mais próxima deste valor. Na Figura 16 é indicada a curva de obtenção do c' (MERIGHI, 1990).

O coeficiente c' se relaciona diretamente com os aspectos granulométricos do solo e sua coesão. No entanto, a granulometria é obtida por meio da compactação do solo, diferentes das classificações tradicionais em que a granulometria é determinada em ensaio granulométrico por peneiramento e sedimentação (MOURA, SANT'ANA E BERNUCCI, 2006).

Segundo Nogami e Villibor (1985), valores de c' elevados (superiores a 1,5) indicam argilas e solos argilosos, ao passo que valores baixos (inferiores a 1,0)

indicam areias e siltes não plásticos ou pouco coesivos. Os solos entre este intervalo (1 e 1,5) são caracterizados principalmente por areias siltosas, areais argilosos, argilas arenosas, argilas siltosas. Este coeficiente não é linearmente função do diâmetro do grão da fração, sendo mais dependente da porcentagem de vazios da fração areia.

Portanto, as argilas apresentam curvas de deformabilidade com elevada inclinação, ao passo que as curvas representativas das areias se aproximam de retas praticamente horizontais. Os copos de prova de argila, devido à presença de torrões de resistência média, sofrem grande variação de altura quando submetidos a golpes sucessivos, pois possuem vazios macroscópicos. Os corpos de prova de areia, não apresentam grande variação de altura quando submetidos à compactação (NOGAMI et al., 1998).

2.4.3.2. Coeficiente d'

O coeficiente d' , utilizado na classificação MCT, é numericamente igual ao coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação referente à energia de 12 golpes no ensaio Mini-MCV. Ressalta-se que para a determinação do d' o teor de umidade deve ser expresso em porcentagem e a massa específica em kg/m^3 , vide Figura 12 (NOGAMI E COZZOLINO, 1993).

Na classificação MCT, o coeficiente d' juntamente com parâmetro P_i são indicativos do comportamento laterítico do solo. Os solos de comportamento laterítico, devido à sua micro-estrutura em forma de “pipoca”, apresenta ganho elevado de densificação no ramo seco da curva de compactação, se comparado com solos de comportamento não laterítico. No ramo seco de uma curva de compactação, o ganho de densidade de um solo de comportamento laterítico entre é tanto mais elevado quanto mais evidente o comportamento laterítico, em oposição ao que ocorre nos solos de comportamento não laterítico (MOURA, SANT’ANA E BERNUCCI, 2006).

Segundo Nogami e Cozzolino (1993), os solos de comportamento laterítico apresentam valores de d' superiores que 20. Os solos saprolíticos, principalmente as variedades micáceas e caulíníticas, apresentam d' inferior a 10.

2.4.3.3. Parâmetro P_i

Nogami e Villibor (1982) definem o parâmetro P_i , utilizado para fins classificatórios, como o obtido pela curva P_i em função do Mini-MCV (vide Figura 16), sendo o correspondente a:

- Mini-MCV = 10, para corpos de provas cuja altura final seja igual ou superior a 48 mm;
- Mini-MCV = 15, para corpos de prova cuja altura final seja inferior a 48 mm.

Porém, Vertamatti (1988) verificou que quando estabelecida uma massa de 200 g para a compactação dos corpos de provas, as alturas finais ficavam próximas a 50 mm. Desta forma, o autor considera o Mini-MCV =10 um ponto singular para a classificação dos solos tropicais.

Bernucci (1992) relata que o parâmetro P_i , além de indicar a perda de coesão e resistência do solo quando imerso, também caracteriza seu potencial de expansão. Solos que apresentam valores baixos de P_i , em grande parte, são caracterizados por manterem a coesão imerso, independentemente de sua plasticidade, como exemplo tem-se os solos lateríticos argilosos.

Segundo Cozzolino e Nogami (1993) o parâmetro P_i complementa a identificação do caráter laterítico do solo, obtido pelo coeficiente d' . Este separa os solos arenosos com finos muito expansivos ou com poucos finos lateríticos (portanto não laterítico). Os autores relatam que o parâmetro P_i talvez não seja o mais indicado para esta finalidade, no entanto foi escolhido devido a simplicidade e rapidez de sua obtenção.

As argilas lateríticas, areias argilosas e argilas arenosas apresentam valores de P_i próximos a zero. Valores de P_i superiores a 100%, correspondem a solos constituídos de argilas não lateríticas. Os maiores valores de P_i correspondem às areias finas mal graduadas e siltes expansivos, próximos a 300% (NOGAMI E VILLIBOR, 1985).

2.4.3.4. Índice e'

O índice e' caracteriza o nível de laterização do solo, do ponto de vista geotécnico. Quanto menor o valor de e' , o solo apresenta comportamento de solos mais laterizados (Nogami et al., 1989). Este é obtido por meio de uma fórmula empírica, calculado em função do coeficiente d' e parâmetro P_i , conforme Equação (10).

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (10)$$

Onde:

P_i = Perda de massa por imersão (%);

d' = Coeficiente angular da curva de compactação Mini-MCV ($n= 10$ golpes).

Cozzolino e Nogami (1993) relatam que a raiz cúbica da Equação 10 foi adotada a fim de que no gráfico da classificação MCT (Figura 17), a área ocupada pelos solos de comportamento laterítico (classe L) fosse equivalente a dos solos de comportamento não laterítico (classe N). Na parcela ($P_i/100$), o número 100 foi utilizado pois, no geral, os solos com finos lateríticos apresentam $P_i < 100$ %. Na parcela ($20/d'$), o número 20 deve-se ao fato de que os solos de comportamento laterítico apresentam $d' > 20$.

2.4.3.5. Carta de Classificação MCT e Propriedades dos Grupos

A classificação MCT, proposta por Nogami e Villibor (1981), divide os solos tropicais em duas grandes classes quanto ao comportamento: laterítico (L) e não laterítico (N). Além das classes os solos são subdivididos de acordo com suas características granulométricas, resultando na divisão de 7 grupos. Na Figura 16 é apresentado a carta de classificação da MCT (em função do coeficiente c' e parâmetro P_i) e as propriedades esperadas de cada grupo são indicadas na Figura 17 e 18.

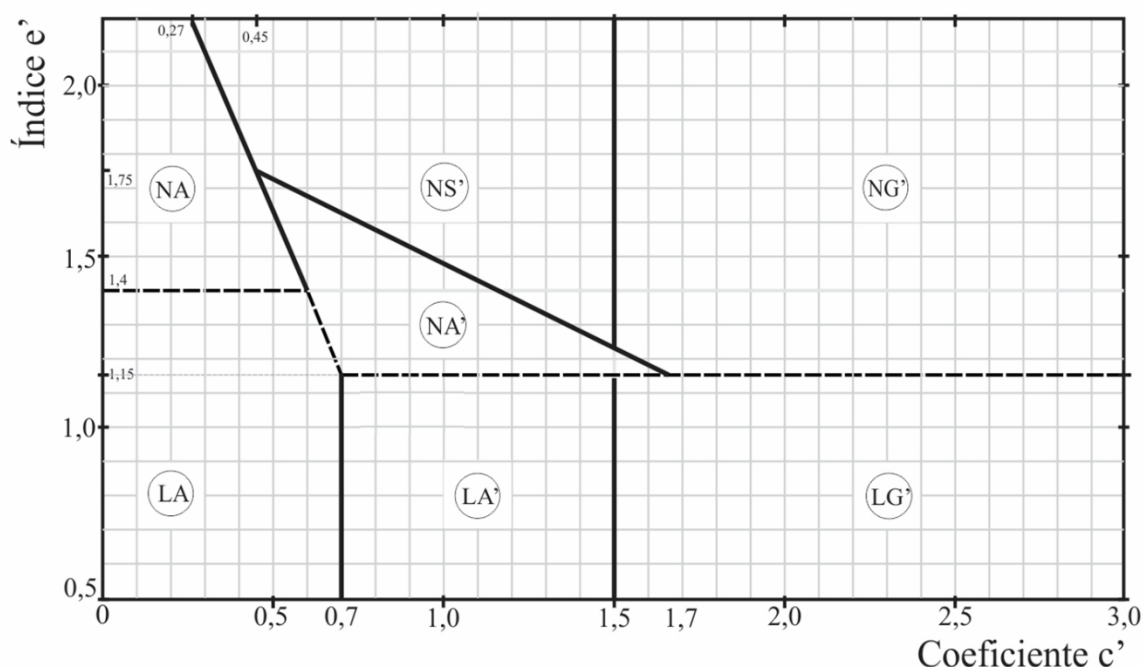


Figura 16- Carta da Classificação MCT, (Nogami e Villibor, 1981)

Segundo Nogami e Villibor (1995), o grupo MCT ao qual o solo pertence é obtido diretamente do gráfico da Figura 16, exceto quando no gráfico da MCT, o solo se localizar próximo à interface que separa os de classe L e N. Neste caso, o solo será considerado de classe L se:

- Na curva “Mini-MCV x P_i ”, o P_i decrescer e atingir valor próximo a zero, no intervalo Mini-MCV = 10 a 20;

- A curva “Mini-MCV x teor de umidade” apresentar concavidade para cima, no intervalo de Mini-MCV de 1 a 15.

No entanto, o solo será considerado de classe N, quando as curvas referidas variarem de maneira distinta da descrita. Caso o solo apresente uma das curvas característica de solo de classe L e outra de classe N, este será considerado de solo transicional, sendo representada por símbolos dos grupos adjacentes.

DESIGNAÇÃO			GRANULOMETRIAS TÍPICAS Designações do T1-71 do DER-SP						
k = caolínico	m = micáceo		areias siltes (q,s)	areias siltosas	siltes (k, m) siltes arenosos	argila argila arenosa argila siltoosa siltes argilosos	areias	areias argilosas	argilas argila arenosa argila siltoosa siltes argilosos
s = sericítico	q = quartzoso								
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico				L = Laterítico		
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR	sem imersão perda por imersão	M, E	E	M, E	E	E	E, EE	E
	EXPANSÃO	(Es)	B, M	B	E	E	B	B	B
	CONTRAÇÃO	(Ct)	B	B	E	M, E	B	B	B
	COEF. DE PERMEABILIDADE	(k)	B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEFICIENTE DE SORÇÃO	(s)	M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = Muito Elevado E = Elevado		M = Médio B = Baixo		Vide Tabela 3.5 para equivalente numérico		
Utilização	Base do pavimento		n	4º	n	n	2º	1º	3º
	Reforço do subleito compactado		4º	5º	n	n	2º	1º	3º
	Subleito compactado		4º	5º	7º	6º	2º	1º	3º
	Aterro (corpo) compactado		4º	5º	6º	7º	2º	1º	3º
	Proteção à erosão		n	3º	n	n	n	2º	1º
	Revestimento primário		5º	3º	n	n	4º	1º	2º
n = não recomendado									
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas		USCS	SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
		AASHTO	A - 2	A - 2 A - 4 A - 7	A - 4 A - 5 A - 7 - 5	A - 6 A - 7 - 5 A - 7 - 5	A - 2	A - 2 A - 4	A - 6 A - 7 - 5

Figura 17 – Resumo das propriedades dos grupos da classificação MCT, (Nogami e Villibor 1995)

PROPRIEDADE	VALOR		PROPRIEDADE	VALOR	
Suporte Mini-CBR [%] com sobrecarga padrão	Muito Elevado	> 30	Suporte Mini-CBR por Imersão [%]	Elevado	> 70
	Elevado	12 a 30		Médio	40 a 70
	Médio	4 a 12		Baixo	< 40
	Baixo	< 4			
Expansão [%]	Elevada	> 3	Contração [%]	Elevada	> 3
	Média	0,5 a 3		Média	0,5 a 3
	Baixa	< 0,5		Baixa	< 0,5
Coeficiente de sorção log s [cm/vmin]	Elevada	> (-1)	Coeficiente de permeabilidade log k [cm/s]	Elevada	> (-3)
	Média	(-1) a (-2)		Média	(-3) a (-6)
	Baixo	< (-2)		Baixo	< (-6)

Figura 18 – Valores numéricos das propriedades, (Nogami e Villibor, 1995)

Nogami e Villibor (1995) relatam as principais características dos grupos da classificação MCT, sendo eles:

- Areias lateríticas (LA): areias com poucos finos de comportamento laterítico, pedologicamente designados de areias quartzosas e regossolos. A porcentagem de finos lateríticos nos solos deste grupo é baixa;
- Solos arenosos lateríticos (LA'): solos tipicamente arenosos, conhecidos pedologicamente por latossolos arenosos e solos podzolizados arenosos (textura média). Estes solos, apresentam coloração vermelho e amarelo. Os solos LA' geram cortes firmes (pouco ou não erodíveis), com presença de trincas, quando expostos às intempéries;
- Solos argilosos lateríticos (LG'): solos constituídos de argilas e argilas arenosas, conhecidos pedologicamente por latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas. Quando constituídos de porcentagem de areia elevada, apresentam comportamento semelhante aos solos do grupo LA';
- Areias não lateríticas (NA): as areias, siltes e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. Estes solos praticamente não possuem finos argilosos coesivos siltes caoliníticos;
- Solos arenosos não lateríticos (NA'): misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades similares) com finos passando na peneira 0,075mm, de comportamento não laterítico. Geneticamente os tipos mais representativos são solos

saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo tais como os granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros;

- Solos siltosos não lateríticos (NS’): solos silto-arenosos, resultantes do intemperismo tropical nas rochas eruptivas e metamórficas, de constituição predominantemente feldspática-micácea-quartzosa. As variedades mais ricas em areia quartzosa podem ter características mecânicas e hidráulicas que se aproximam do solos do grupo NA’;

- Solos argilosos não lateríticos (NG’): solos argilosos, provenientes de rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos, siltitos), ou cristalinas pobres em quartzo e ricas em anfibólios, piroxênios e feldspatos cálcicos. São classificados neste grupo os solos superficiais pedogênicos não lateríticos, como os vertissolos bem como muitos solos transportados.

3. MÉTODO DE PESQUISA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O método de pesquisa do tipo programa experimental é ilustrado na matriz da Figura 19 e apresentado, sendo detalhado neste capítulo.

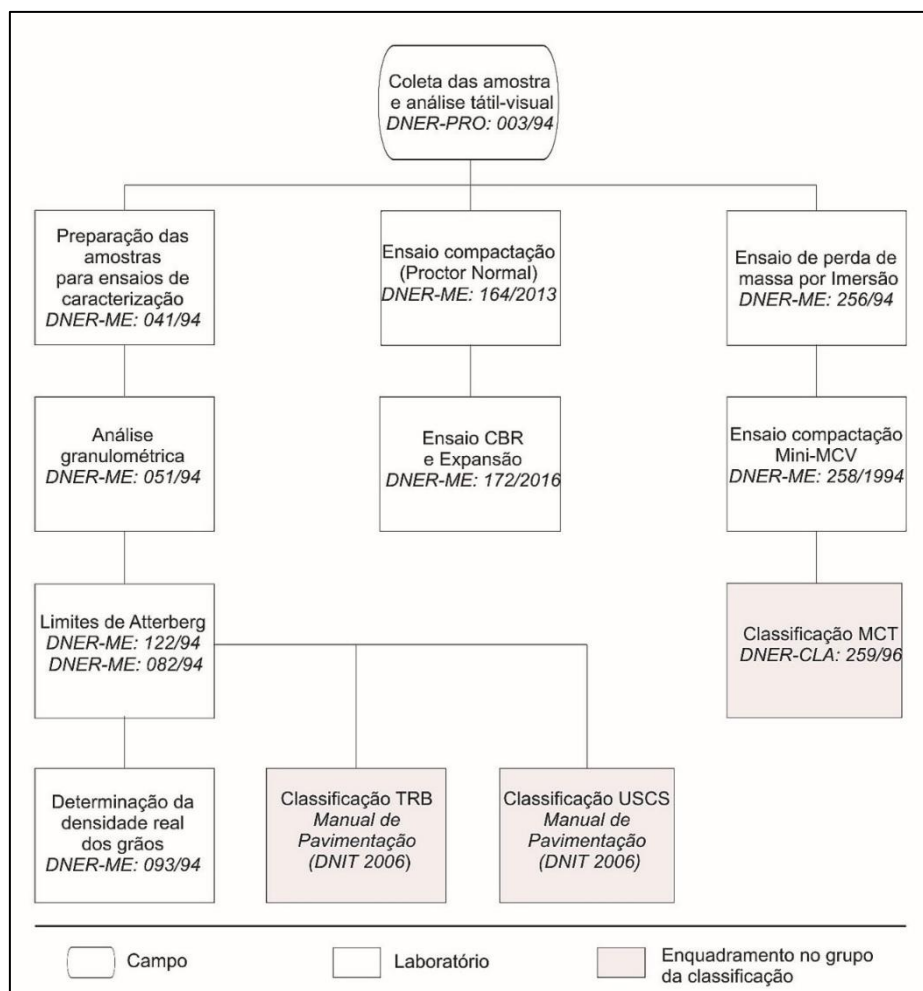


Figura 19 – Matriz do programa de ensaio executado

3.2. ÁREA DE ESTUDO

A área estudada foi próxima ao Município de Nova Mutum, localizado na Região Centro-Oeste do Estado do Mato Grosso a 240,0 km da capital Cuiabá, entre próxima da latitude 13° 49' 44" S e longitude 56° 04' 56" conforme mostra o mapa da Figura (20).



Figura 20- Localização do Município de Nova Mutum/MT.
Fonte: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1177927>

O clima da região classifica-se como úmido tropical com verão úmido e inverno seco (Aw), que corresponde às savanas tropicais. Apresenta temperatura média acima de 18°C e períodos secos variando de quatro a cinco meses por ano, segundo Classificação Climática de Wladimir Koppen (DNER, 1976). As classes pedológicas dos latossolos vermelho-amarelo (LVAd) e vermelho (LV) são as principais ocorrentes próximas à área de estudo, conforme observado no mapa pedológico da Figura 21. Segundo correlações apresentadas por Nogami e Villibor (1995) esta classe pedológica é tipicamente classificada como solos de comportamento laterítico pela MCT.

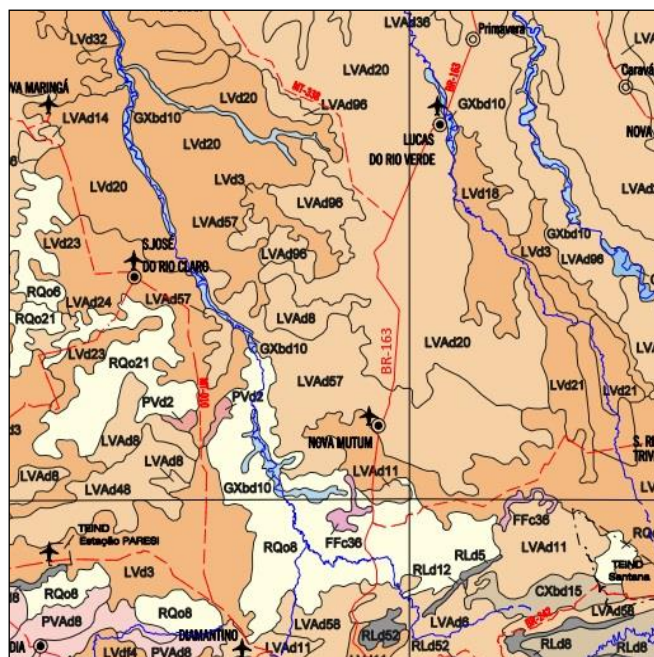


Figura 21 – Mapa pedológico próximo ao município de Nova Mutum/MT. Escala original 1: 1.500.000. (IBGE, 2009)

3.3. COLETA DOS SOLOS

Foram coletadas onze amostras deformadas de solo do subleito nas proximidades de uma importante rodovia próxima ao município de Nova Mutum/MT, conforme o procedimento DNER-PRO 003/94. De cada ponto de coleta, foram coletadas extraíram-se aproximadamente 40,0 kg de solo, em profundidade variando de 70,0 a 150,0 cm, a partir do leito da estrada. As amostras coletadas foram denominadas de SL pela classificação do MCT enumeradas e submetidas à análise tátil visual.

3.4. MÉTODOS DE ENSAIO

Inicialmente, as amostras de solos foram secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira nº 4 (4,8 mm), acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas, para serem empregadas nos métodos geotécnicos dos itens subsequentes.

3.4.1. Ensaios de caracterização

Em laboratório, as amostras foram submetidas ao método DNER-ME 041/94 para preparação para serem utilizadas nos ensaios de caracterização dos itens subsequentes.

3.4.1.1. Ensaio de Granulometria

A análise granulométrica das amostras foi realizada de acordo com o método DNER-ME 080/94 - Solos - análise granulométrica por peneiramento e DNER-ME 051/94 - Solos - análise granulométrica. O defloculante utilizado para a dispersão das amostras foi o hexametáfosfato de sódio.

A determinação da granulometria por peneiramento das amostras foi necessária para classificação dos solos de acordo com a TRB e USCS.

3.4.1.2. Limites de consistência

Para a determinação dos limites de consistência ou de Atterberg foram realizados os ensaios pelos métodos DNER-ME 122/94 - Solos - determinação do limite de liquidez e DNER-ME 082/94 - Solos - determinação do limite de plasticidade

A determinação do e do foi necessária para que os solos pudessem ser classificados de acordo com a classificação TRB e USCS.

3.4.1.3. Densidade Real do Grãos

A densidade real dos grãos foi determinada conforme método DNER-ME 093/94.

3.4.2. Ensaio de Compactação e Índice de Suporte Califórnia

As amostras foram submetidas à compactação na energia do ensaio Proctor Normal, segundo o método DNER-ME 164/2013 - compactação utilizando amostras não trabalhadas, para determinação da massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$) e umidade ótima (h_o) dos solos em estudo.

Definidos os parâmetros ótimos de compactação, determinaram-se os parâmetros respectivos valores de ISC/CBR—das amostras de solo analisadas, segundo o método DNIT 172/2016-ME - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas”.

3.4.3. Ensaio de Compactação Mini-MCV

Para a execução do ensaio foi utilizada a especificação DNER-ME 258/94 - Solos compactados em equipamento miniatura mini-MCV”, com exceção da série de golpe adotada. Para este ensaio foi reservado, para cada uma das onze amostras 1,5 kg de solos na umidade higroscópica e passado na peneira de abertura de 2,0 mm.

Em seguida compactou-se 200,0 g de cada porção, aplicando-se sucessivamente número crescente de golpes, anotando-se os valores de altura A_n após número de golpes n , obedecendo a série proposta por Parsons (1976): 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256. Na Figura 22 são ilustradas as várias etapas do processo de compactação realizado para cada porção.

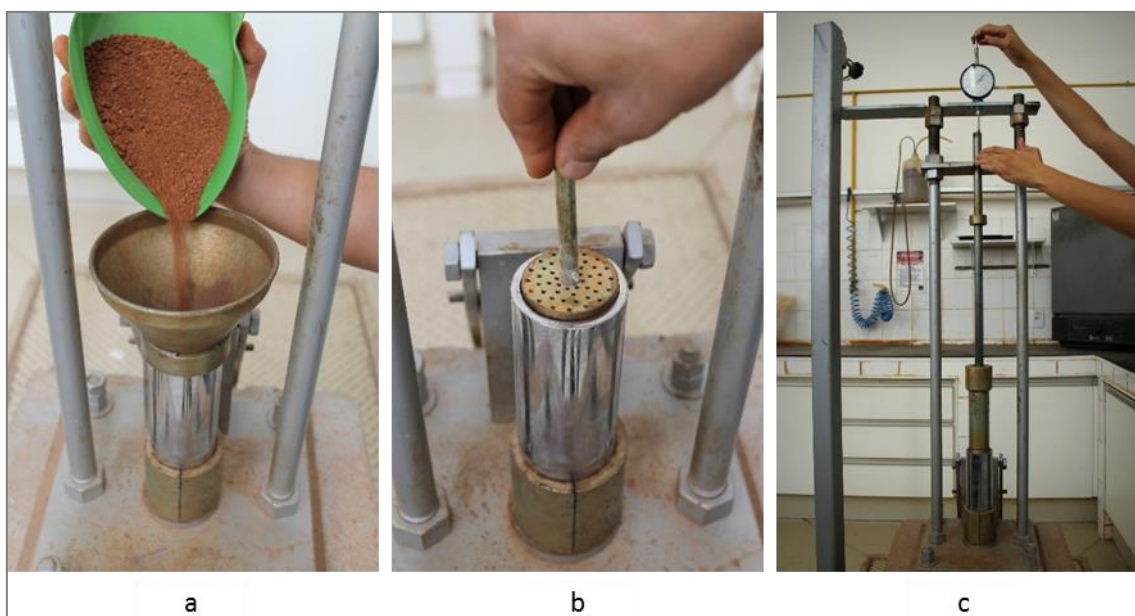


Figura 22 - Etapas do do Ensaio de Compactação Mini-MCV: a) introdução de 200 g da amostra úmida no molde cilíndrico; b) acomodação do solo dentro do molde; c) aplicação dos primeiros golpes (com suporte meia cana na base)

Os resultados deste ensaio são utilizados para classificação MCT das amostras estudadas.

3.4.4. Ensaio de Perda de Massa por Imersão

Para a execução do ensaio foi utilizada a especificação DNER-ME 256/94 - Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão.

Neste ensaio foram utilizados os corpos de provas resultantes da compactação do método Mini-MCV de acordo com o item 3.4.3. Ainda no equipamento compactador os mesmos foram parcialmente extrusados, de forma que ficassem salientes exatamente 10,0 mm. Os moldes contendo os espécimes foram colocados horizontalmente em um tanque de imersão, onde permaneceram por 24 horas.

Os materiais eventualmente desprendidos foram recolhidos, verificando se os mesmos apresentaram aspecto de “bloco”, e secos à 105-110° C

a fim de se obter o peso seco desprendido de cada CP. Na Figura 23 são ilustradas as principais etapas deste ensaio. O resultado deste ensaio é utilizado para classificação MCT das amostras estudadas.

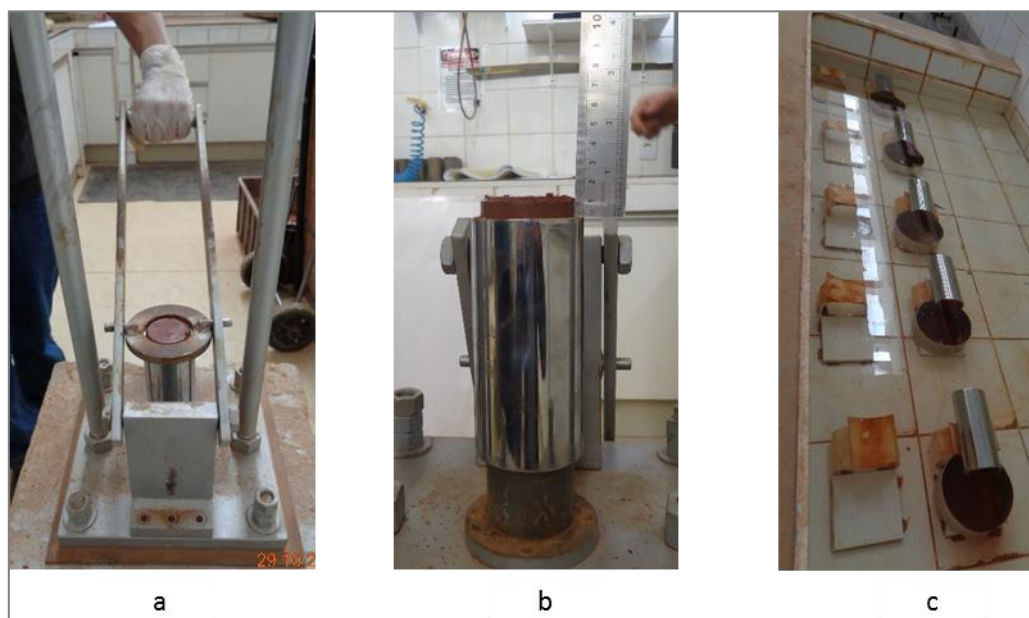


Figura 23 - Etapas do Ensaio de Perda de Massa por Imersão: a) Extrusão parcial do CP após compactação Mini-MCV; b) Medição da altura extrudada do CP (1,0 cm); c) Imersão dos CPs

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Na Tabela 6 são apresentados os resultados referentes as granulométricas proposta pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e a determinação da densidade real dos grãos das 11 amostras analisadas. As curvas granulométricas respectivas estão indicadas nas Figuras 26 a 25 no item 6.1 (Anexos). Verifica-se que a maioria das amostras são constituídas de solos finos sem pedregulhos. Das amostras com pedregulho, a que apresentou maior porcentagem e sua constituição foi a SL10 com 6,9%. Para as demais, SL3, SL4 e SL5 a influência do pedregulho no comportamento do solo pode ser considerado desprezível.

Os percentuais passantes das amostras em cada peneira estão indicados nas curvas granulométricas apresentadas no item 6.1 (Anexos).

Amostra	Densidade real dos grãos (g/cm³)	Granulometria ASTM (%)						
		Pedregulho	Areia			Silte	Argila	Classificação
			Grossa	Média	Fina			
SL1	1.873	1.0	6.0	8.3	46.7	9.6	28.4	Areia silto argilosa
SL2	1.709	0.4	0.3	8.2	45.0	12.4	33.7	Areia silto argilosa
SL3	1.661	1.9	2.7	5.1	32.8	14.9	42.6	Argila silto arenosa com pedregulho
SL4	1.549	1.8	1.3	4.9	29.4	13.5	49.1	Argila silto arenosa com pedregulho
SL5	1.990	2.8	6.7	7.2	37.2	14.3	31.9	Areia silto argilosa com pedregulho
SL6	1.583	0.8	2.2	3.7	14.8	20.6	57.8	Argila areno siltosa
SL7	1.564	0.8	0.2	4.7	6.9	32.0	55.4	Argila areno siltosa
SL8	1.674	0.1	0.1	1.7	35.3	7.4	55.4	Argila silto arenosa
SL9	1.655	0.4	0.2	3.8	44.2	10.6	40.8	Areia silto argilosa
SL10	1.710	6.9	3.5	4.2	33.6	11.5	40.4	Argila silto arenosa com pedregulho
SL11	1.633	0.6	0.7	4.9	35.0	8.5	50.3	Argila silto arenosa

Tabela 6 - Composição granulométrica e densidade real dos grãos

4.2. COMPACTAÇÃO E ISC/CBR

Para cada uma das 11 amostras foram realizados os ensaios de compactação na energia do Proctor Normal (12 golpes), a fim de se obter a umidade ótima (h_o) e massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$). De posse destes resultados foram determinados a capacidade de suporte ISC/CBR e também as expansões correspondentes. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Amostra	Parâmetros de compactação*		Parâmetros de CBR*	
	ho (%)	MEAS _{máx} (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
SL1	12.8	1.873	15.73	0.08
SL2	17.5	1.709	14.74	0.18
SL3	19.0	1.661	6.41	0.18
SL4	21.8	1.549	12.28	0.08
SL5	9.0	1.990	13.87	0.00
SL6	23.2	1.583	7.04	0.70
SL7	21.8	1.564	7.57	0.75
SL8	19.5	1.674	6.80	0.08
SL9	18.5	1.655	8.09	0.03
SL10	17.3	1.710	7.20	0.14
SL11	21.9	1.633	7.98	0.05
*Resultados obtidos na energia normal				

Tabela 7 – Parâmetros de compactação, CBR e expansão

Todas as amostras apresentaram valores baixos de ISC/CBR, sendo que o maior foi de 15,73% (amostra SL1) e menor de 6,41% (amostra SL3). Em relação à propriedade de expansão, todas apresentaram baixos valores, inferiores a 1%, sendo que 82% delas obtiveram expansão menor de 0,5%.

Considerando apenas as propriedades referidas na Tabela 6, o DNIT limita o CBR (para energia de compactação intermediária) no mínimo igual a 20% para sub-bases estabilizadas granulometricamente e de 60% a 80% para bases estabilizadas granulometricamente, expansão no máxima de 1% para sub-bases e 0,5% para bases. Apesar de nenhuma das amostras terem atendido o mínimo valor de CBR suporte exigido para estas camadas, ressalta-se que neste trabalho o ISC/CBR foi obtido na energia do Proctor Normal, ou seja, 12 golpes. Se nos ensaios realizados das amostras SL1 e SL2 fossem aplicados os 26 golpes do Proctor Intermediário, cinco vezes mais de energia de compactação em relação ao Proctor Normal, muito provável que os resultados atenderiam o valor mínimo do ISC/CBR de 20% exigido para estabilização granulométrica nas sub-

bases, mas dificilmente para utilização em bases estabilizadas granulometricamente.

CLASSIFICAÇÃO TRB

Para a Classificação TRB, foram determinados os limites de consistência (LL e IP), granulometria (porcentagem que passa nas peneiras n°s 10, 40 e 200) e IG. Na Tabela 7 são apresentados as propriedades referidas e os grupos da TRB em que as amostras foram classificadas. Para facilitar a análise dos resultados, na Tabela 8 são indicados os valores do CBR e expansão, já indicadas na Tabela 7.

Amostra	Limites de consistência			Análise granulométrica			IG	Grupo TRB	Parâmetros de CBR*	
	LL (%)	LP (%)	IP(%)	F ₁₀	F ₄₀	F ₂₀₀			CBR (%)	Expansão (%)
SL1	NP	NP	NP	93.0	84.8	43.9	0	A-4 (0)	15.73	0.08
SL2	30	22	7.9	99.3	91.1	51.3	0	A-4 (0)	14.74	0.18
SL3	NP	NP	NP	95.3	90.2	61.4	4	A-4 (4)	6.41	0.18
SL4	38.3	27.3	11	96.9	92.0	67.1	6	A-6 (6)	12.28	0.08
SL5	NP	NP	NP	90.5	83.3	52.9	2	A-4 (2)	13.87	0.00
SL6	53.5	34.5	19	97.0	93.3	82.2	8	A-7-5 (8)	7.04	0.70
SL7	43.5	30.7	12.8	99.0	94.3	88.2	8	A-7-5 (8)	7.57	0.75
SL8	NP	NP	NP	99.7	98.0	65.8	4	A-4 (4)	6.80	0.08
SL9	NP	NP	NP	99.4	95.6	60.3	3	A-4 (3)	8.09	0.03
SL10	30.7	20.5	10.2	89.7	85.5	59.6	2	A-6 (2)	7.20	0.14
SL11	37.9	26	11.9	98.8	93.8	63.5	6	A-6 (6)	7.98	0.05
*Resultados obtidos na energia normal							F _n : % qua passa na peneira n° n			

Tabela 8 – Classificação TRB, CBR e expansão

As amostras SL1, SL2, SL3, SL5, SL8 e SL9 se caracterizaram como (A-4), onde apresentam maior parte de sua composição por solos siltsos. Já as amostras SL4, SL10, SL11, SL6 e SL7, denominados como (A-6 e A-7-5) são materiais com predominância de argila em sua composição.

Conforme já visto, a classificação TRB fornece valores esperados da capacidade de suporte do material por correlação com IG, conforme recomendado pelo método de Projeto de Pavimentos Flexíveis- DNER (1981).

Na Tabela 9 são apresentados os valores de ISC/CBR esperados pelo método referido (CBR_{IG}).

Amostra	CBR_{IG} (%)
SL1	20
SL2	20
SL3	13 a 14
SL4	9 a 10
SL5	18 a 20
SL6	7
SL7	7
SL8	12
SL9	13
SL10	15
SL11	9

Tabela 9 – Valores de CBR estimados pelo método CBR_{IG}

Comparando os valores de CBR_{IG} (Tabela 8) e o ISC/CBR real (Tabela 6), para a maioria das amostras o valor do esperado (CBR_{IG}) não coincidiu com o real, no entanto, na maioria dos casos a variação não foi discrepante.

Segundo O’Flaherty (1973), o IP permite avaliar a expansão do solo. Quanto maior o valor do IP, maior é o potencial expansivo deste solo. Apesar de não ter ocorrido grandes discrepâncias, pois todas as amostras obtiveram baixa expansão, verificam-se algumas incoerências nesta relação. Pela análise dos dados apresentados na Tabela 7, destacam-se:

- Para as amostras não plástica (NP ou $IP=0$), a expansão variou entre 0,0 a 0,18%;

- Para as amostras SL4 e SL7 apresentaram valores de IP próximos, respectivamente de 11,0 e 12,8%. No entanto, a expansão obtida foi discrepante, resultando em um aumento de nove vezes a expansão da SL4 para SL7;
- A amostra SL6 apresentou IP=19%, o maior valor obtido das 11 amostras, atingindo expansão de 0,70% uma das maiores obtidas. No entanto, a amostra SL7, com IP=12,8%, atingiu expansão mais elevada de 0,75%;
- As amostras SL1, SL4 e SL8 apresentaram expansão igual a 0,08%. No entanto, diferente das SL1 e SL8 indicadas como não plásticas, a amostra SL4 obteve IP=11%;
- As amostras não plásticas que deveriam apresentar os menores valores de expansão, variaram 0,03 a 0,18%. No entanto, a amostra SL11 de IP=11,9%, obteve expansão igual a 0,05%, a segunda menor entre as analisadas.

4.3. CLASSIFICAÇÃO USCS

Na Tabela 10 são apresentadas as classificações das amostras referente ao método USCS.

Amostra	Limites de consistência Análise granulométrica					Grupo USCS	Parâmetros de CBR*	
	LL (%)	LP (%)	IP(%)	F ₄₀	F ₂₀₀		CBR (%)	Expansão (%)
SL1	NP	NP	NP	84.8	43.9	SM	15.73	0.08
SL2	30	22	7.9	91.1	51.3	SC	14.74	0.18
SL3	NP	NP	NP	90.2	61.4	ML	6.41	0.18
SL4	38.3	27.3	11	92.0	67.1	OL	12.28	0.08
SL5	NP	NP	NP	83.3	52.9	SM	13.87	0.00
SL6	53.5	34.5	19	93.3	82.2	OH	7.04	0.70
SL7	43.5	30.7	12.8	94.3	88.2	OL	7.57	0.75
SL8	NP	NP	NP	98.0	65.8	ML	6.80	0.08
SL9	NP	NP	NP	95.6	60.3	SM	8.09	0.03
SL10	30.7	20.5	10.2	85.5	59.6	SC	7.20	0.14
SL11	37.9	26	11.9	93.8	63.5	OL	7.98	0.05

*Resultados obtidos na energia normal

Tabela 10 - Classificação USCS, CBR e expansão

Pela classificação SUCS, as amostras SL1, SL5 e SL9 encontram-se no grupo (SM) que são denominados como areias siltosas. As amostras SL2 e SL10 estão no grupo (SC) classificados como areias argilosas. As amostras SL3 e SL8 estão classificadas como siltes (ML). Já as amostras SL4, SL6, SL7 e SL11 encontram-se no grupo de materiais orgânicos, (OL e OH) onde L significa que possuem baixa compressibilidade e H significa alta compressibilidade.

Embora na classificação USCS as amostras SL4, SL6, SL7 e SL11 tenham sido denominadas como materiais orgânicos, onde não possuam suporte e expansões adequadas para o meio rodoviário, seus resultados nestes critérios foram opostos, assim obtendo números significativos para o emprego do material.

No Manual de Pavimentação do DNIT, 2006, vide Tabela 3. Encontra-se uma correlação entre os grupos da classificação USCS com a capacidade de suporte medida pelo ensaio de ISC/CBR. Assim, para os resultados obtidos, pode-se comparar o real resultado com o estimado. Onde para os grupos SP e SM que possui CBR estimado entre 10 a 40% e em que as amostras S1, S5 e S9 encontram-se. Vê-se que as amostras S1 e S5 ficaram

dentro do esperado, atingindo CBR entre 14%. Já a amostras S9 obteve CBR de 8,1%, assim ficando abaixo do estabelecido pelo Manual de Pavimentação do DNIT, 2006. Já para o grupo SC que se referem-se às amostras S2 e S10 o ISC/CBR o resultado foi em torno de 7%, ficando dentro do intervalo estimado de 5,0 a 20,0%. Para as amostras S3 e S8 que estão classificadas como ML, os resultados estiveram dentro do estimado (15 a menos de 2%), onde ficaram em torno de 6,5%. E para as amostras S4, S6, S7 e S11 ficaram acima do esperado, atingindo ISC/CBR médio de 8,7%, onde na Tabela 04 obtida no Manual de Pavimentação do DNIT, 2006 é esperado ISC/CBR entre 5,0 a menos de 2,0% para os grupos OL e OH

4.4. CLASSIFICAÇÃO MCT

Na Tabela 11 encontram-se as informações sobre as classificações das amostras segundo a MCT. Os dados obtidos no ensaio, utilizados para o cálculo dos índices e coeficientes da MCT, estão apresentados no item 6.2 (Anexos).

Amostra	Coeficientes e parâmetros				Classificação MCT
	c'	d'	Pi	e'	
SL1	1.28	59.00	100	1.10	LA'
SL2	1.12	55.00	100	1.11	LA'
SL3	0.94	62.50	65	0.99	LA'
SL4	1.32	50.00	100	1.12	LA'
SL5	1.00	17.00	100	1.30	NA'
SL6	1.64	35.00	50	1.02	LG'
SL7	1.65	31.30	145	1.28	NG'
SL8	1.32	66.70	100	1.09	LA'
SL9	1.18	375.00	85	1.11	LA'
SL10	1.14	65.00	75	1.02	LA'
SL11	1.30	45.00	95	1.12	LA'

Tabela 11- Resultados da Classificação MCT

As amostras SL1, SL2, SL3, SL4, SL8, SL9, SL10 e SL11, encontram-se no grupo LA' que são denominados como solos arenosos de comportamento laterítico. A amostra SL6 está no grupo LG', que classifica o material em solos argilosos de comportamento laterítico. Já as amostras SL5 e SL7 foram classificadas como amostras de comportamento não laterítico, dos grupos NA' e NG' respectivamente. Na Figura 24 são apresentadas as localizações das amostras no gráfico da MCT, plotados em função de c' e P_i .

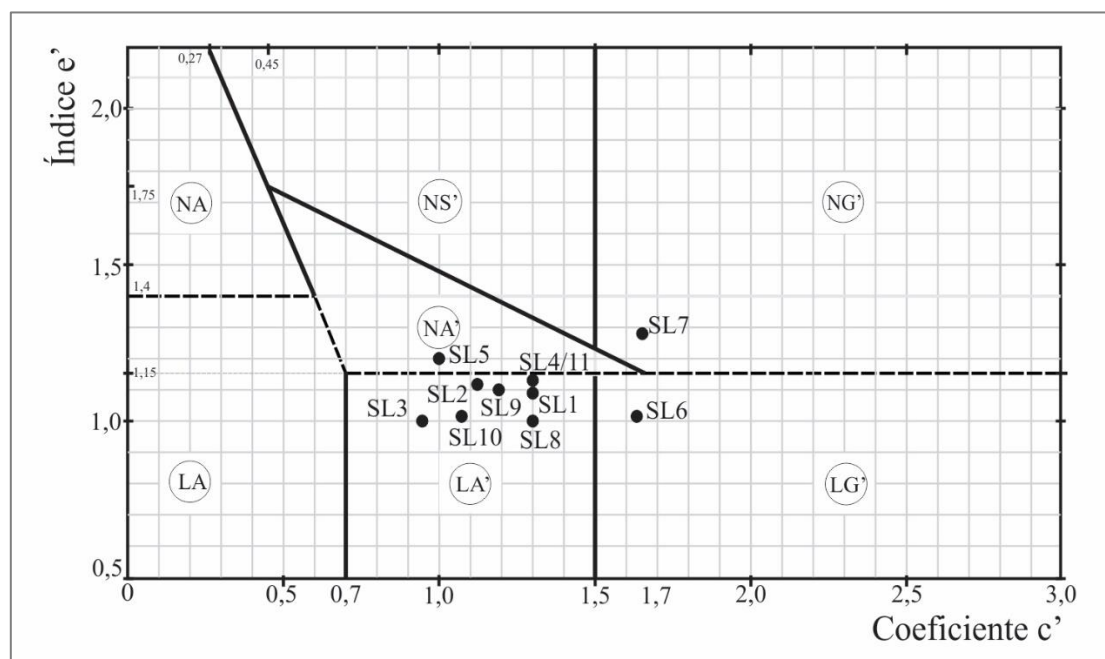


Figura 24 – Localização das amostras no gráfico classificatório da MCT

Pela Figura 24 verifica-se que as amostras se encontram próximas no gráfico da MCT. As amostras SL2, SL4, SL5, SL9 e SL11 se encontram próximas da fronteira que separa os solos de comportamento laterítico e não laterítico. Desta forma, espera-se que independente da classe, estas apresentem comportamento similares, visto que as de classe L não correspondem a solos bem laterizados.

Com relação à granulometria das amostras, apenas a SL7 e SL6 foram classificadas como solos argilosos. O restante que corresponde a 72% das amostras analisadas, foram classificadas como solos arenosos.

Para melhor análise dos resultados, na Tabela 12 estão apresentados os grupos da MCT das amostras e as propriedades de CBR e expansão obtidas por ensaios.

Amostra	Grupo MCT	Parâmetros de CBR*	
		CBR (%)	Expansão (%)
SL1	LA'	15.73	0.08
SL2	LA'	14.74	0.18
SL3	LA'	6.41	0.18
SL4	LA'	12.28	0.08
SL5	NA'	13.87	0.00
SL6	LG'	7.04	0.70
SL7	NG'	7.57	0.75
SL8	LA'	6.80	0.08
SL9	LA'	8.09	0.03
SL10	LA'	7.20	0.14
SL11	LA'	7.98	0.05
*Resultados obtidos na energia normal			

Tabela 12- Classificação MCT, CBR e expansão

Em relação à expansão, segundo a classificação MCT, espera-se que os grupos NA', LA' e LG' apresentem expansão baixa; os solos NG' de média à elevada. As propriedades esperadas de cada grupo da MCT acham-se na Figura 18.

Ressalta-se que para todas as amostras, a expansão foi baixa. Comparando os dados esperados pela MCT com os obtidos por ensaios, verifica-se:

- As amostras SL1, SL2, SL3, SL4, SL8, SL9, SL10 e SL11, classificadas como do grupo LA', apresentaram expansão entre 0,03 a 0,18%, o que representa uma expansão muito baixa conforme esperado pela MCT, por serem amostras arenosas;

- A amostra SL5, classificada como NA' apresentou expansão de 0%, conforme o esperado pela MCT, por serem amostras arenosas;
- As amostras argilosas SL6 e SL7, respectivamente dos grupos LG' e NG' foram as que apresentaram os maiores valores de expansão, respectivamente de 0,70 e 0,75%, considerados valores médios a baixos. Observa-se que SL6 (LG'), apesar de apresentar porcentagem maior de argila, comparado ao SL7 (NG'), obteve expansão ligeiramente menor, isto deve-se à microestrutura peculiar destes solos com presença do argilo-mineral caulinita, revestida por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que são menos expansivos. Destaca-se a diferença de expansibilidade poderia ser maior se a amostra SL6 fosse mais laterizada (índice e' menor);

Quanto ao suporte, a classificação MCT prevê esta propriedade pelo Mini-CBR não imerso, na energia normal. Para uma análise numérica precisa entre valores esperados pela MCT (Figura 18) e os obtidos pelo ensaio CBR (Tabela 11), seria necessário realizar uma correlação de Mini-CBR e CBR das 11 amostras. No entanto, como neste trabalho o suporte foi avaliado apenas pelo CBR, a seguir serão apresentadas considerações apenas sobre a hierarquização dos grupos da MCT em relação a esta propriedade.

- Das amostras do grupo LA', o CBR variou de 6,80 a 15,73%. Segundo a MCT este é o grupo mais indicado para uso em base de pavimento, pois espera-se que estes apresentem elevado suporte, baixa expansão, além de outras propriedades consideradas na MCT (contração principalmente);
- A amostra SL5, classificada como do grupo NA', apresentou CBR igual a 13,87%. Segundo a MCT, os solos deste grupo

apresentam suporte elevado. Destaca-se que esta foi a amostra que apresentou menor expansão, igual a 0%;

- A amostras SL6, classificada como do grupo LG' apresentou CBR de 7,04%. No entanto, a MCT prevê que os solos deste grupo apresentem CBR elevado;
- A amostra SL7, classificada como NG' apresenta CBR próximo ao da amostra SL6 (LG'). Ressalta-se, no entanto, que a MCT considera os solos NG' como um dos piores solos para serem utilizados na estrutura do pavimento. Algumas amostras do grupo LA', considerado o melhor grupo da MCT, como a SL3, apresentaram suporte similares ao da amostra SL7.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não foi possível definir claramente que o método MCT foi mais adequado para classificar os solos estudados, devido ao fato da maioria das amostras ser de predominância arenosa em suas composições granulométricas, além das amostras terem caído na divisa entre laterítico e não laterítico, estando elas em processo de laterização.

Portanto não é possível afirmar que o método MCT seja o mais adequado para a classificação dos solos em questão, apesar da TRB e SUCS terem sido desenvolvidas especificamente para regiões de clima temperado, onde os solos não apresentam a microestrutura peculiar dos tropicais, conforme apontado por Nogami e Villibor (1980).

Pode-se constatar a inadequação na classificação USCS, que considerou algumas amostras como material orgânico, porém estas obtiveram resultados de CBR acima de 7% com expansão menor que 1%.

Por tudo o que foi escrito no presente TCC sugere-se que mais trabalhos sejam realizados nessa linha de pesquisa para avaliar a melhor metodologia aplicada em solos tropicais brasileiros. Para esta continuidade, sugere-se ainda que se siga a seguinte linha de pesquisa, ou seja, que se avalie o mapa geotécnico da região em estudo, a fim de identificar regiões com solos de comportamento laterítico, que se execute serviços de sondagem para coletas de amostras que sejam suficientes para um plano amostral, que se busque maior número de amostras com predominância granulométrica de argilas ou siltes, por estes serem considerados materiais de baixo suporte de acordo com as classificações TRB e USCS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895 – Índice de suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 1987.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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

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

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A.N. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 1: Fundamentos**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARVALHO, J. B. Q.; MEDINA, J. & NOGAMI, J. S. **The concept of tropical soils**. In: Proceedings of 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. TropicalLS'85. Vol. 3, pp. 101-134, Brasilia, 1985.

COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. **Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. Solos e Rochas**, v.16, n.2, p.77-91, 1993.

DNER. **Classificação climática de Wladimir Köppen – DNER – Diretoria de Planejamento**. Mato Grosso, 1976.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Métodos de Projetos de Pavimentos Flexíveis, IPR 667**. 3ª. Edição. Rio de Janeiro – RJ, 1981

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-PRO 003/94: Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 041/94: Solos - preparação das amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 051/94: Solos - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

DER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 122/94: Solos - determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994.

DER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 082/94: Solos - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 093/94: Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
Manual de Pavimentação. 3ª. Edição. Rio de Janeiro – RJ.
, 2006

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 164/2013: Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 2013.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 256/94: Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 2013.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV. Rio de Janeiro, 2013.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER-CLA 259/96: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 2013.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 172/2016: Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhada.** Rio de Janeiro, 2016.

ELIANA, F. S. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos-SP, 2006.

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

FORTES, R.M & MERIGHI, J.V. **The Use of MCT Methodology for Rapid Classification of Tropical Soils in Brazil.** IJP – International Journal of Pavements, Vol.2, No.3, pp.1-13, September, 2003.

Highway Research Board (1961). **The AASHO Road Test, Highway Research Board Special Report 61F**, p. 7 (National Academy of Sciences: Washington, D.C.).

IGNATIUS, S. G. **Limites de Atterberg, Granulometria e Classificação MCT de Solos Tropicais.** IX Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações.

IGNATIUS, S. G. **Uso dos limites de Atterberg e da análise granulométrica na identificação e classificação de solos tropicais para fins de engenharia civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da USP. São Paulo-SP, 1988.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** New York: Ed. Wiley, 1969.

Mapa pedológico Nova Mutum IBGE, 2009. Disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/mt_pedologia.pdf. Acesso em 17/07/2017 às 11:47.

MARSON, M. **Análise crítica da classificação MCT para solos tropicais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2004.

MELFI, A. J. ; CARVALHO, A.; CHAUVEL, A., RODRIGUES E SILVA, F. B.; NÓBREGA, M. T. **Characterization, Identification and Classification of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils for Geotechnical Purposes –**

Topic 1.2: Characterization and Identification. Committee on Tropical Soils of the ISSMFE, Theme 1: Characterization, Identification and Classification Tropical Soils. Progress Report, 1981-1985, 1985.

MERIGHI, J. V. **Classificação MCT através do ensaio S-MCV rápido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da USP. São Paulo-SP, 1990.

NOGAMI, J. S. **A importância da suplementação dos resultados dos ensaios geotécnicos, para finalidades rodoviárias, com dados geológicos e correlatos.** Rio de Janeiro: IPR Publicação 516, 1971.

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. **Soil Characterization of Mapping Units for Highway Purposes in Tropical Area.** Bulletin of the International Association of Engineering Geology, n° 19. Krefeld, Alemanha, 1979.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Caracterização e Classificação Gerais de Solos para Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática.** XV Reunião anual de pavimentação, ABPv, Belo Horizonte, MG, 1980.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Additional Consideration about a New Geotechnical Classification for Tropical Soils.** TropicalS'85, ABMS, 1985.

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. **Caracterização e Classificação Gerais de Solos para Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática.** 15ª Reunião Anual de Pavimentação, pp. 01-38, Belo Horizonte, MG, Agosto, 1984.

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

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. **Ampliação do Uso da Metodologia MCT no Estudo de Solos Tropicais para Pavimentação".** In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação. v.1, pp. 184-209, Belo Horizonte, MG, 1994.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** São Paulo : Editora Villibor, SP. 1995.

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. **A Importância dos Solos Tropicais em Pavimentação**. 7ª Reunião Anual de Pavimentação, pp. 166-181, São José dos Campos, SP, Junho, 1996.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Nova conceituação do coeficiente c' da classificação geotécnica MCT**. Reunião anual de pavimentação, 32., 2000, Brasília. Rio de Janeiro: ABPv, v.1, p.34-41, 2000.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos**. São Paulo, SP : Arte & Ciência, 2009.

O'FLASHERTY., C. A., **Highway Engineering, Vol. 2**. London. UK: Edward Arnold Publishers, 1988.

PARSONS, A. W. **The rapid measurement of the moisture condition of earthwork material**. Transport and Research Board – Supplementary Report N°750, 1976.

PARSONS, A. W.; BOLDEN, B. B. **The moisture condition test and its potencial applications in earthworks**. Transport and Research Board – Supplementary Report N°552, 1979.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000

SANTANA, H.; GONTIJO, P.R.A. **Os Materiais Lateríticos na Pavimentação de Baixo Custo no Brasil**. Apresentado na 22º RAP, Maceió, 1987. 15. ABPV (Associação Brasileira de Pavimentação). Utilização da laterita em pavimentação, Boletim técnico nº 9. Rio de Janeiro, 1976

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1**. São Paulo: Pini, 2007.

SÓRIA, M. H. A.; FABBRI, G. T. P. **O Ensaio Mini-MCV – um ensaio de MCV, Moisture Condition Value, com corpos de prova de dimensões reduzidas**. Reunião anual de pavimentação. 15., 1980, Belo Horizonte. Rio de Janeiro: ABPV. v.1, 1980.

SÓRIA, M. H. A.; NOGAMI, S. N.; VILLIBOR, D. F. **A impacto da tecnologia local para a pavimentação**. Seminário nacional de vicinais. DER – SP. São Paulo, 1988 In: SEMINARIO NACIONAL DE VICINAIS, 1., 1988, São Paulo. Anais... São Paulo: DER- SP, 1988.

SPORIA, M. H. A. **Reflexões sobre Classificações de Solos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Carlos, SP, 1985.

VARGAS, M. **The concept of tropical soils. In: Proceedings of 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils.** TropicaLS'85. Brasília, Vol. 3, pp. 101-134, 1985.

VERTAMATTI, E., **Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e resiliente.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 1988.

VILLIBOR, D. F. **Pavimentos econômicos. Novas considerações.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 1981.

6. ANEXOS

6.1. Composição Granulométrica das Amostras

São apresentados neste item, os resultados obtidos da análise granulométrica (DNER-ME: 041/94).

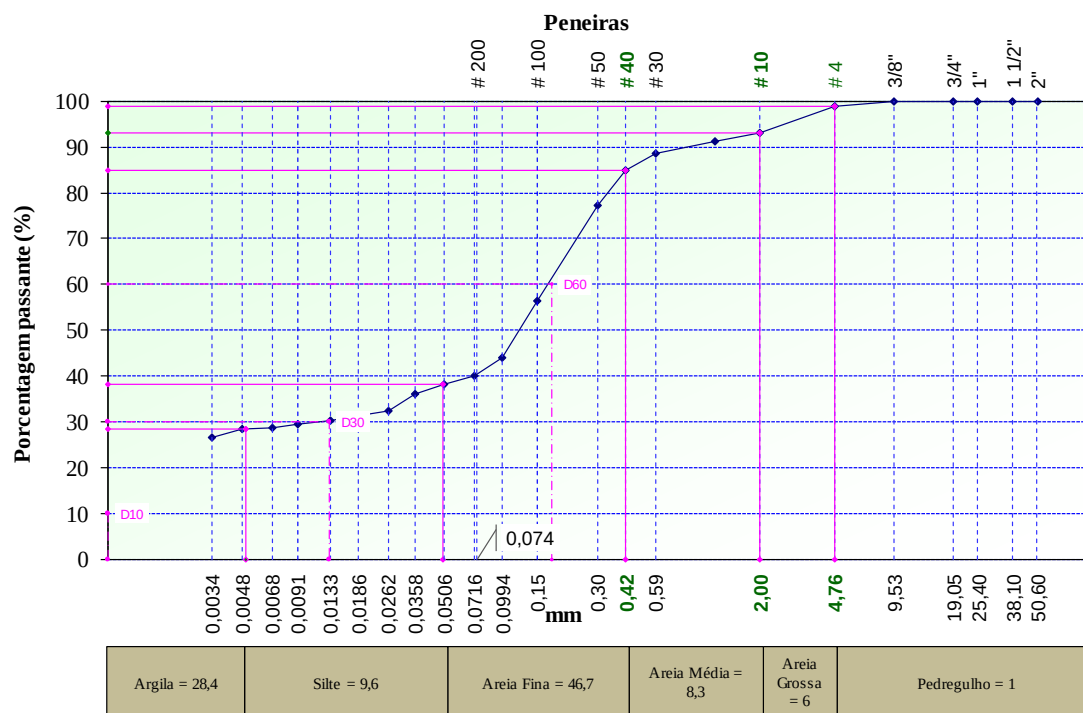


Figura 25 – Composição granulométrica da amostra SL01

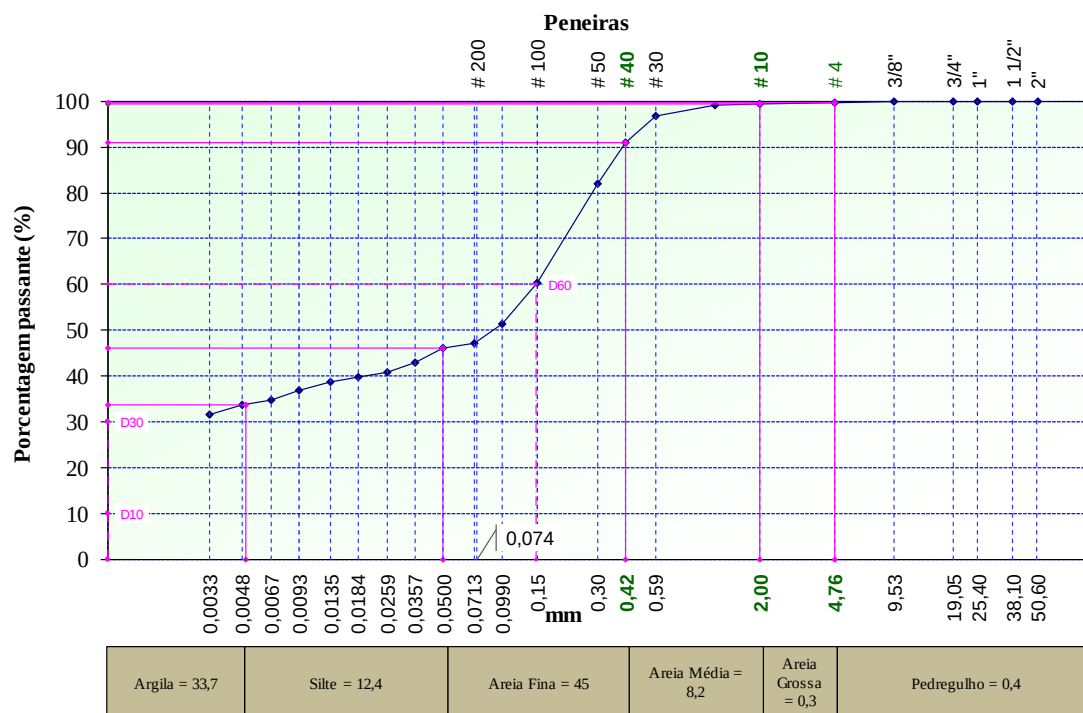


Figura 26 – Composição granulométrica da amostra SL02

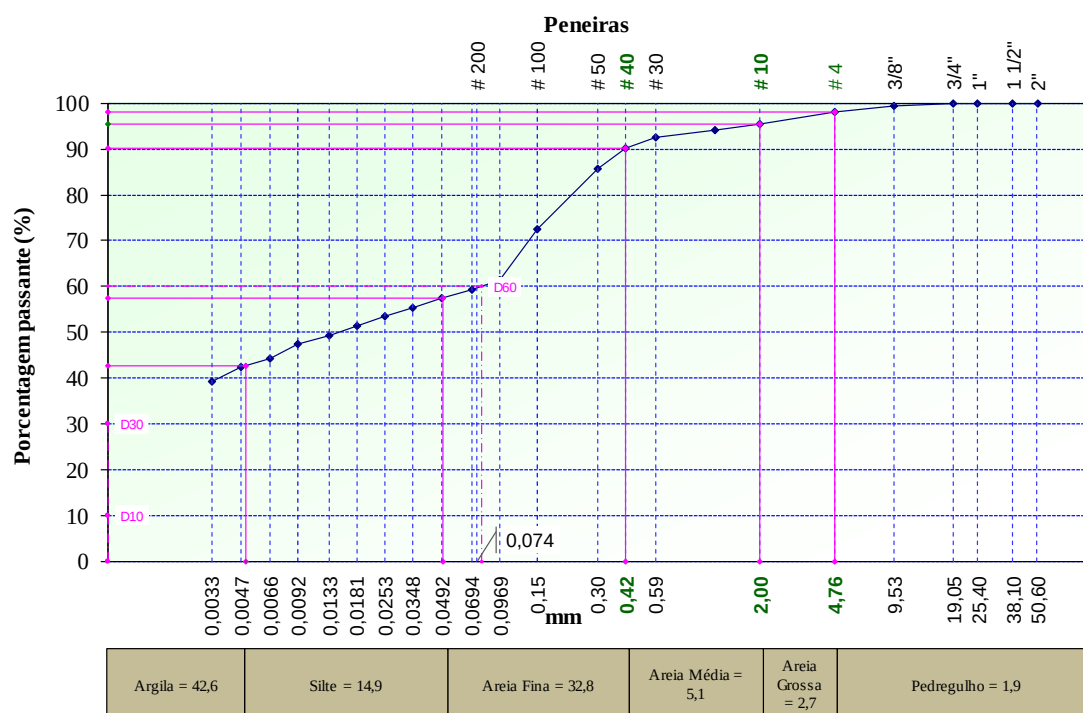


Figura 27 – Composição granulométrica da amostra SL03

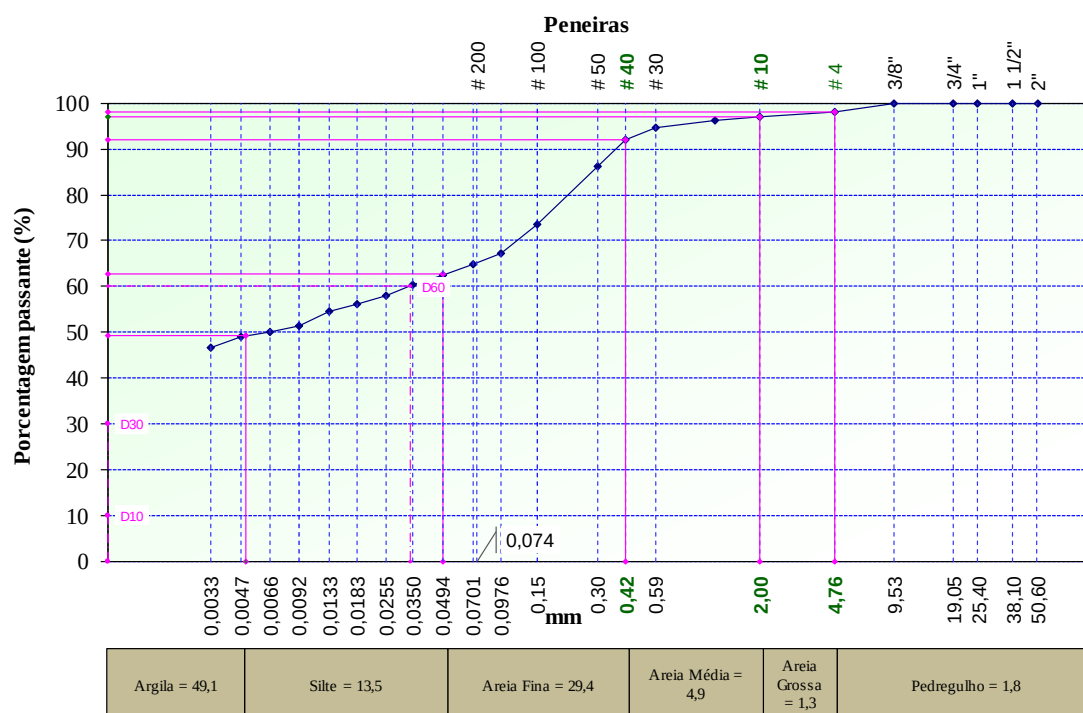


Figura 28 – Composição granulométrica da amostra SL04

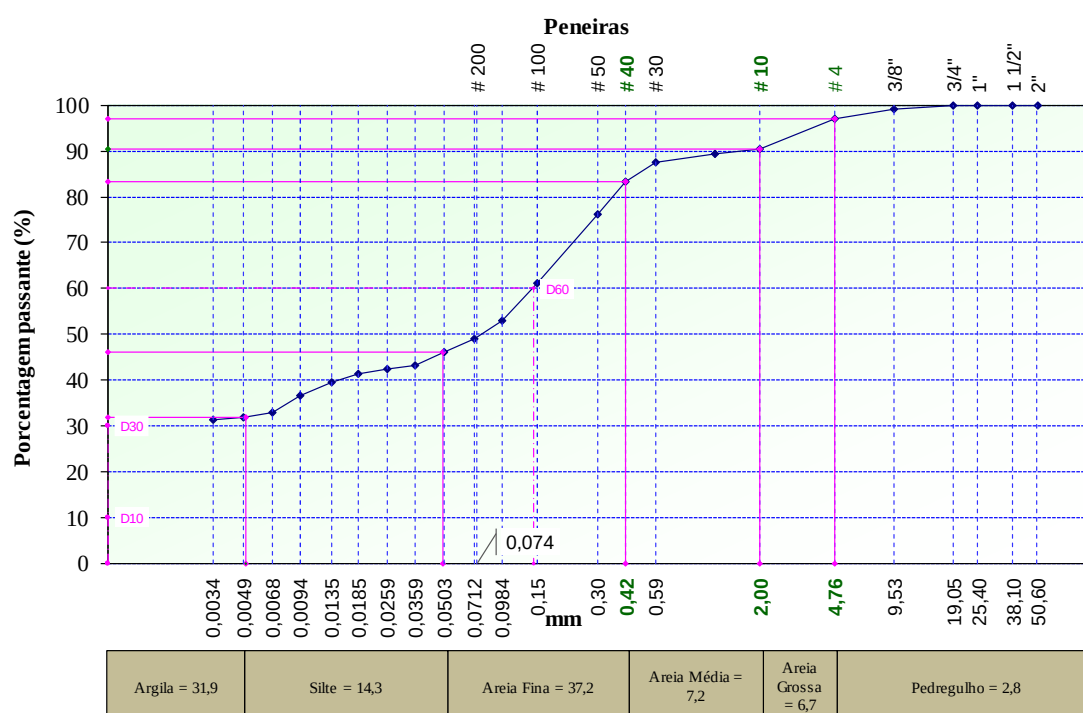


Figura 29 – Composição granulométrica da amostra SL05

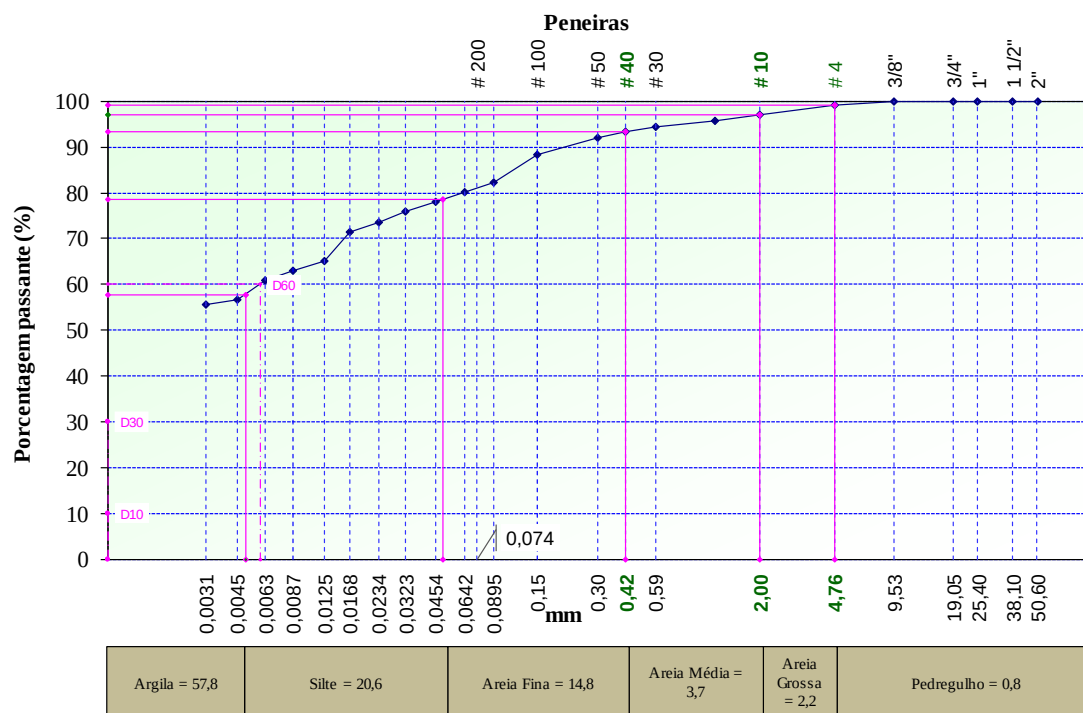


Figura 30 – Composição granulométrica da amostra SL 06

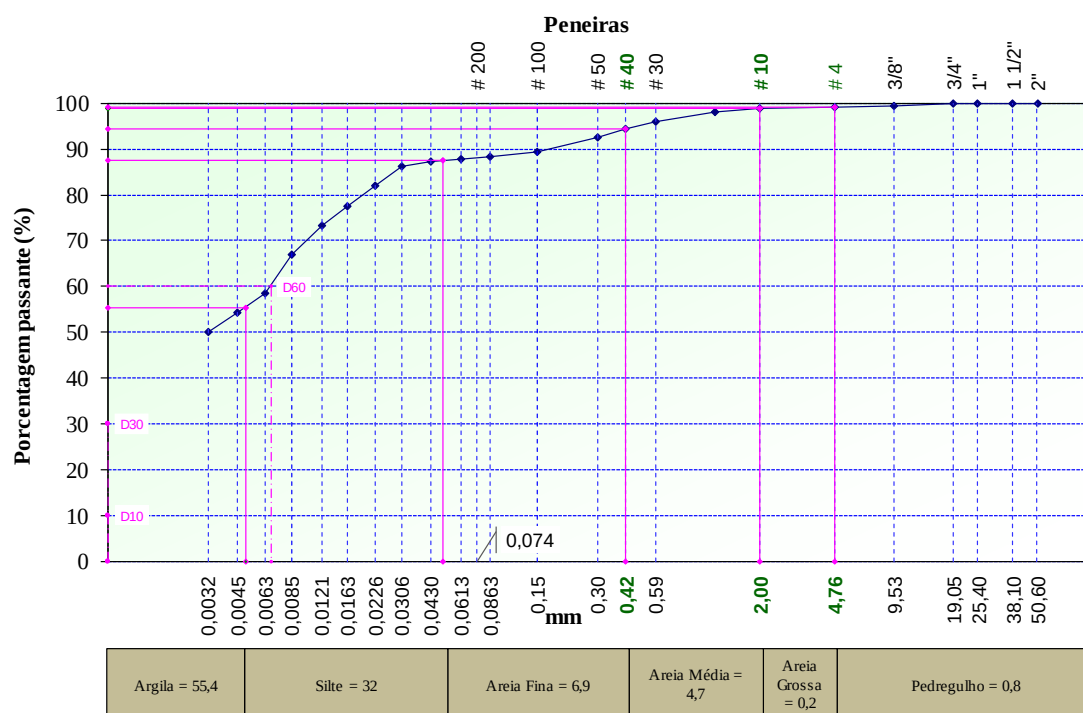


Figura 31 – Composição granulométrica da amostra SL07

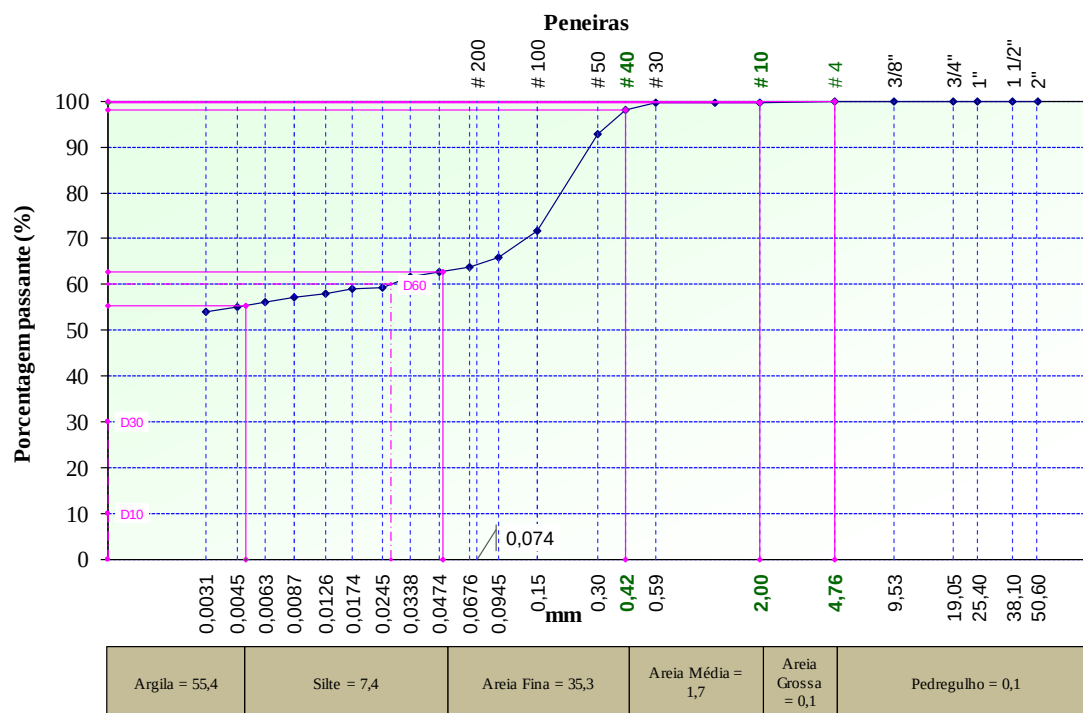


Figura 32 – Composição granulométrica da amostra SL08

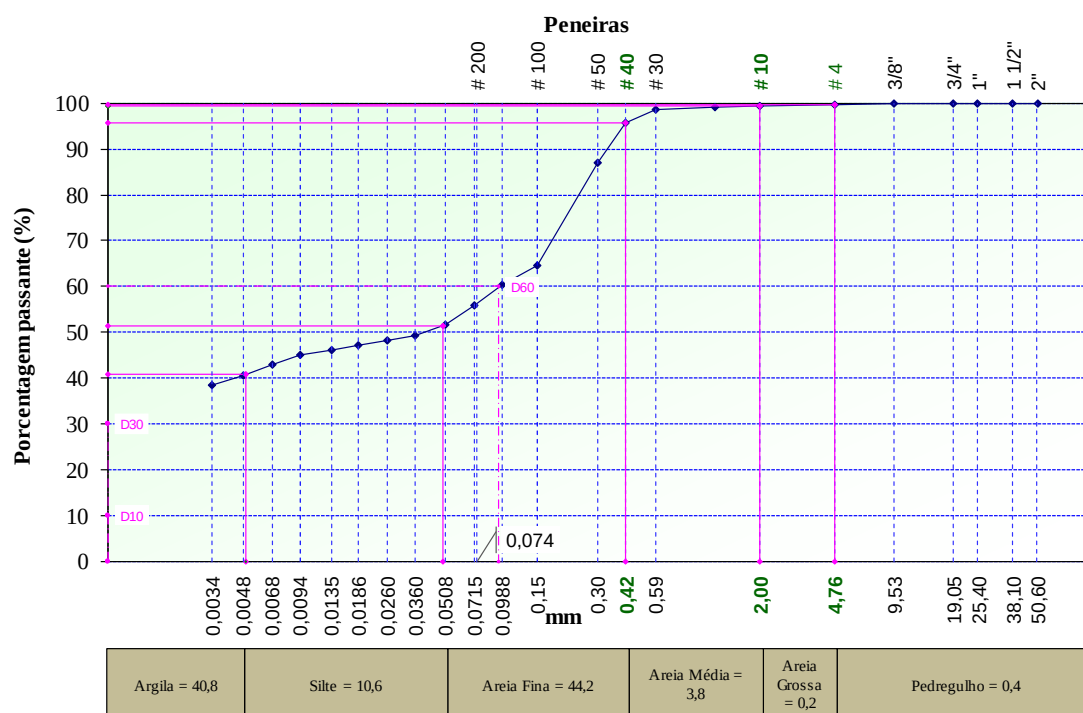


Figura 33 – Composição granulométrica da amostra SL09

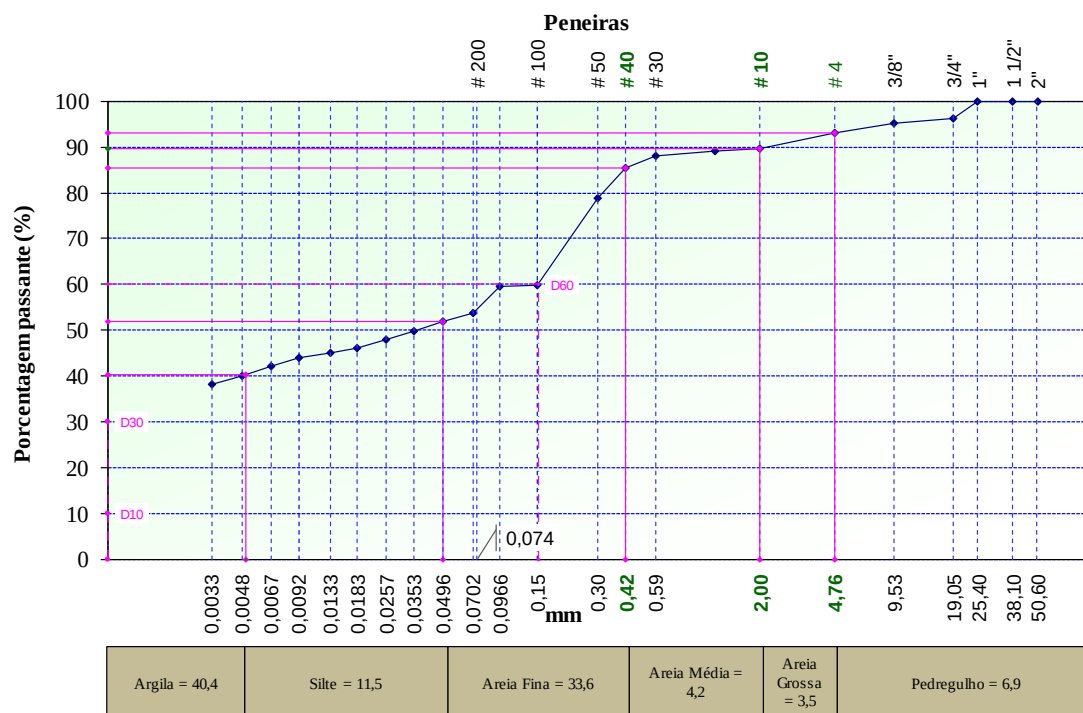


Figura 34 – Composição granulométrica da amostra SL10

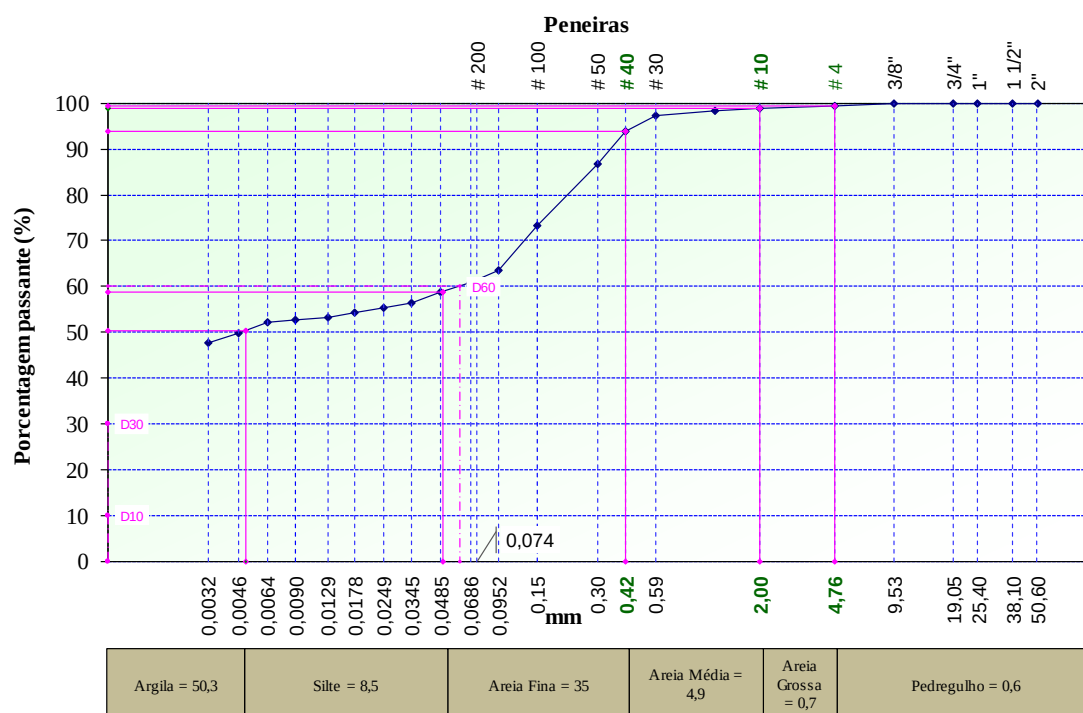


Figura 35 – Composição granulométrica da amostra SL11

6.2. Classificação MCT

São apresentados neste item, os resultados obtidos na classificação MCT das amostras.

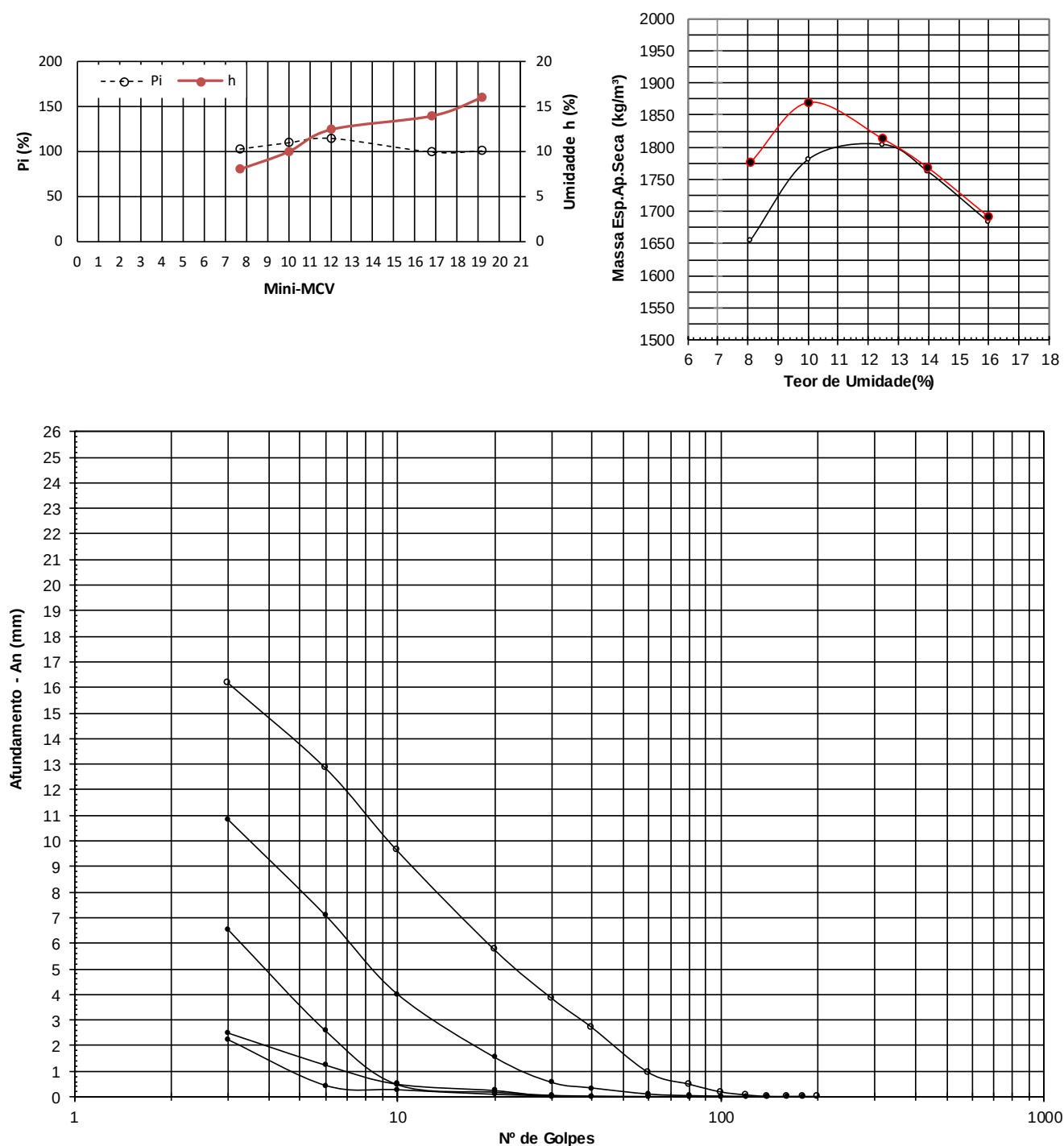


Figura 36- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL1

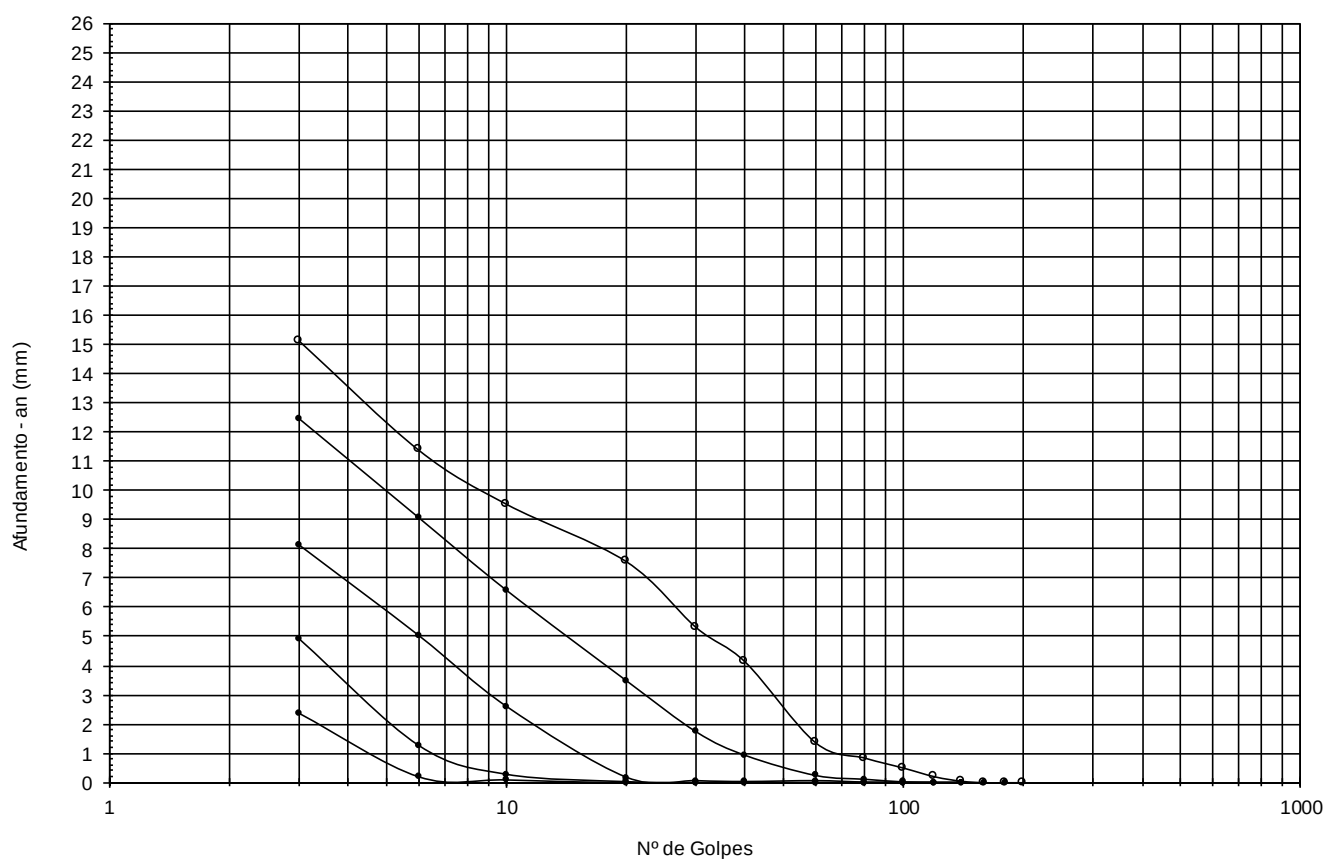
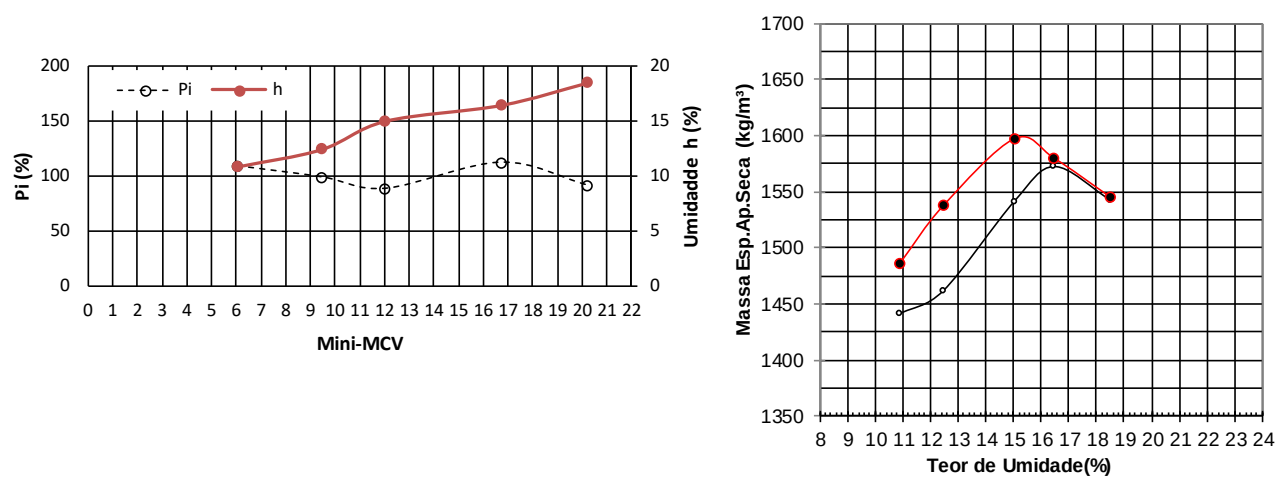


Figura 37- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL2

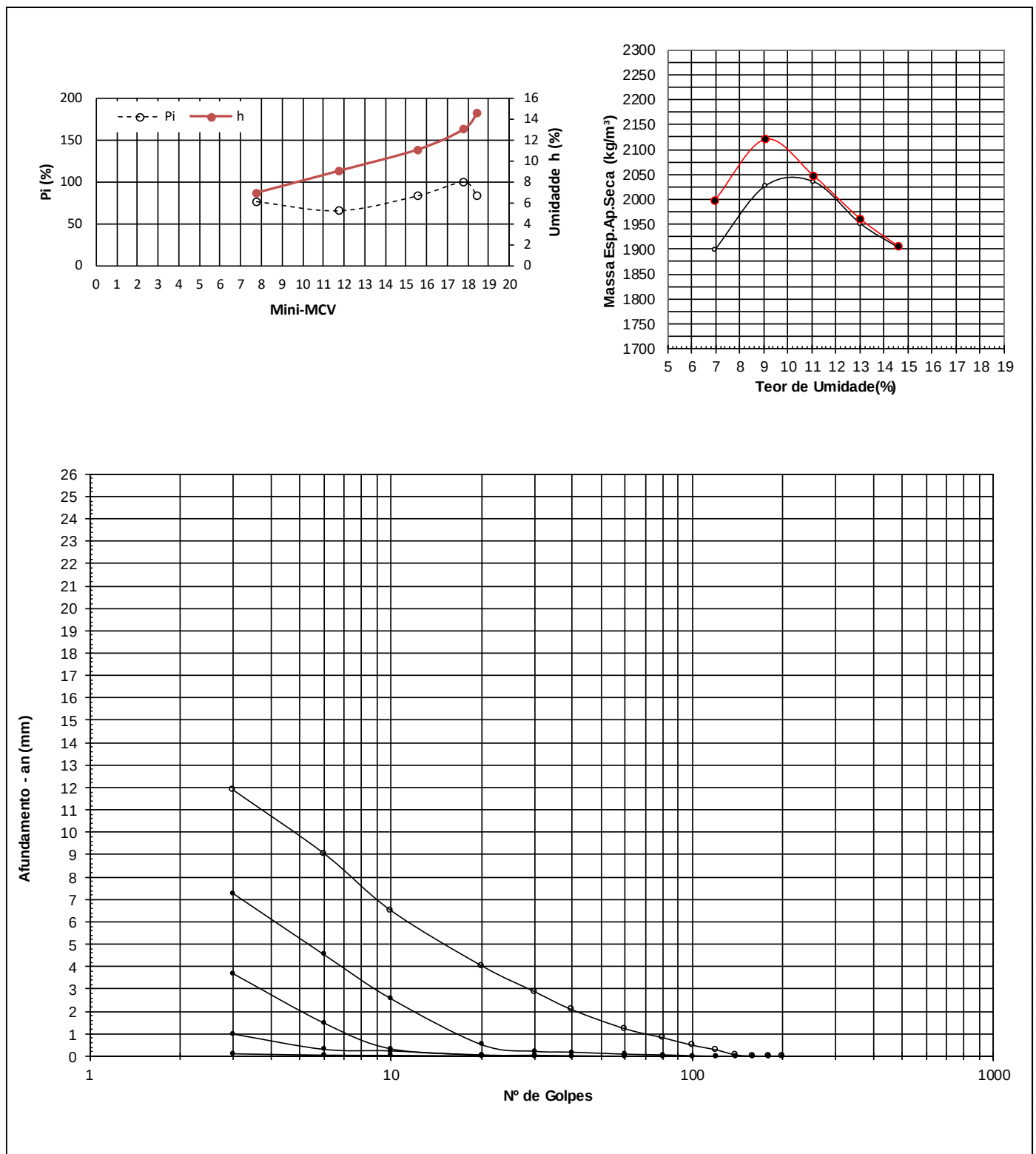


Figura 38 - Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL3

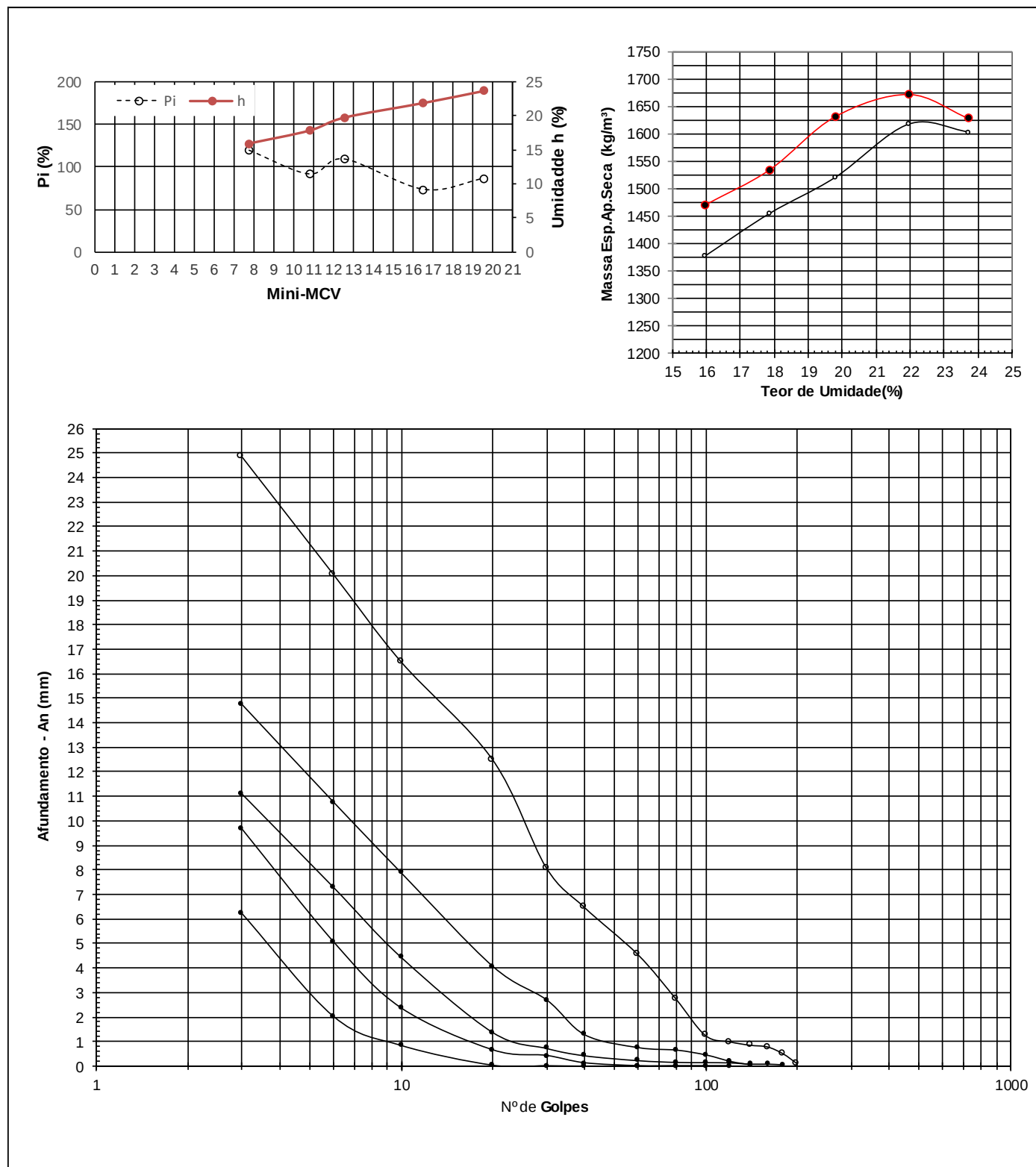


Figura 39- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL4

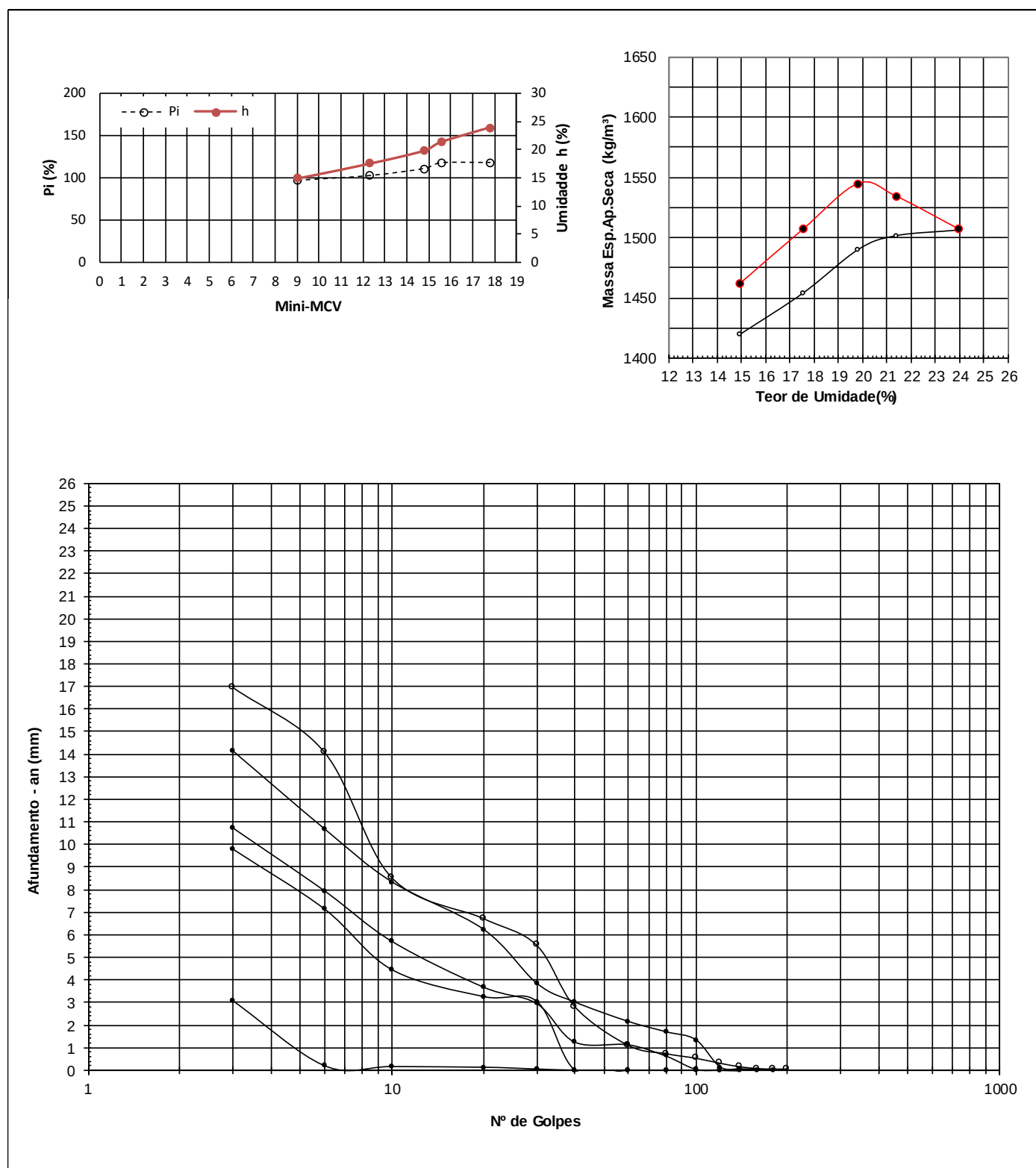


Figura 40- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL5

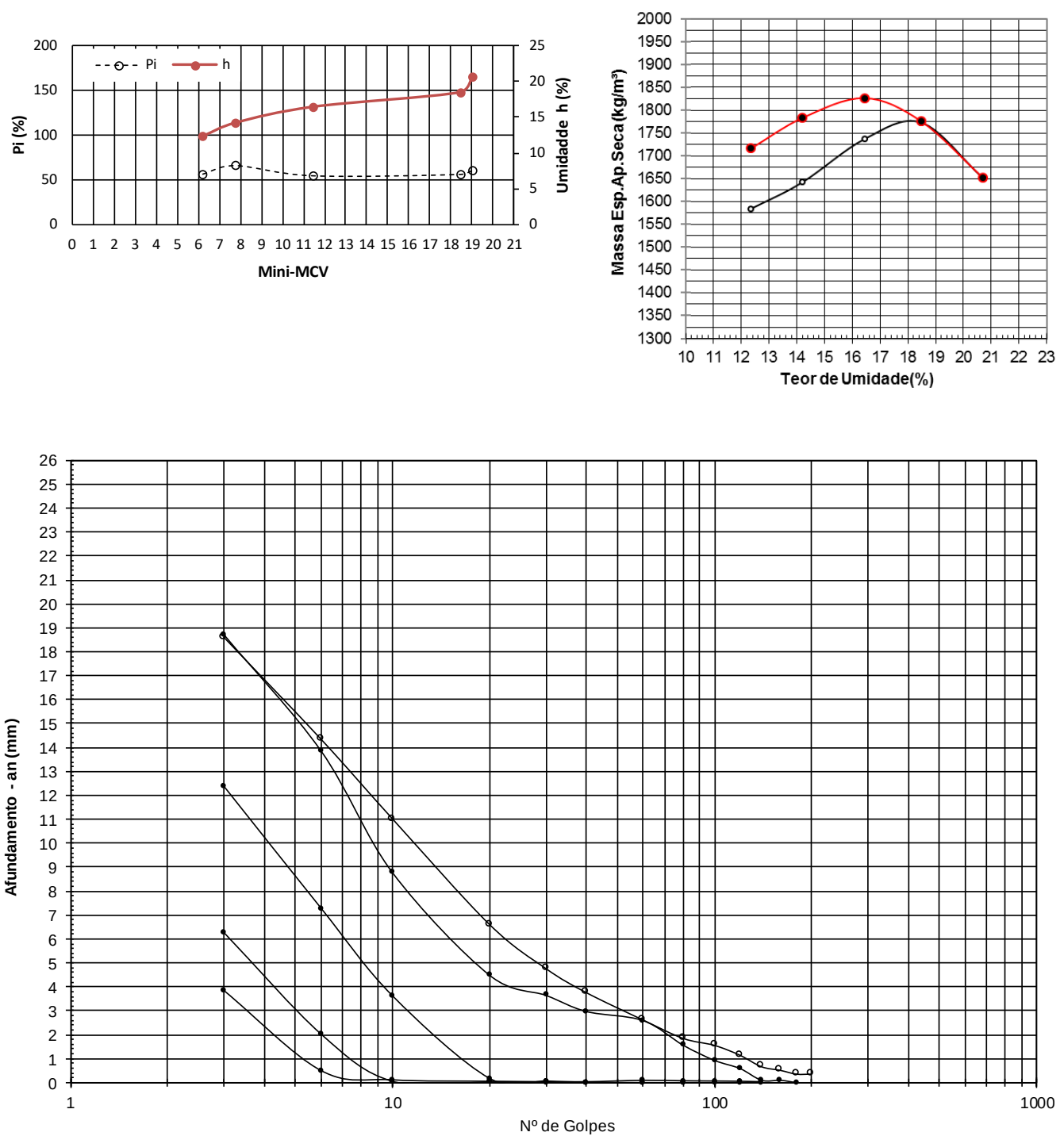


Figura 41- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL6

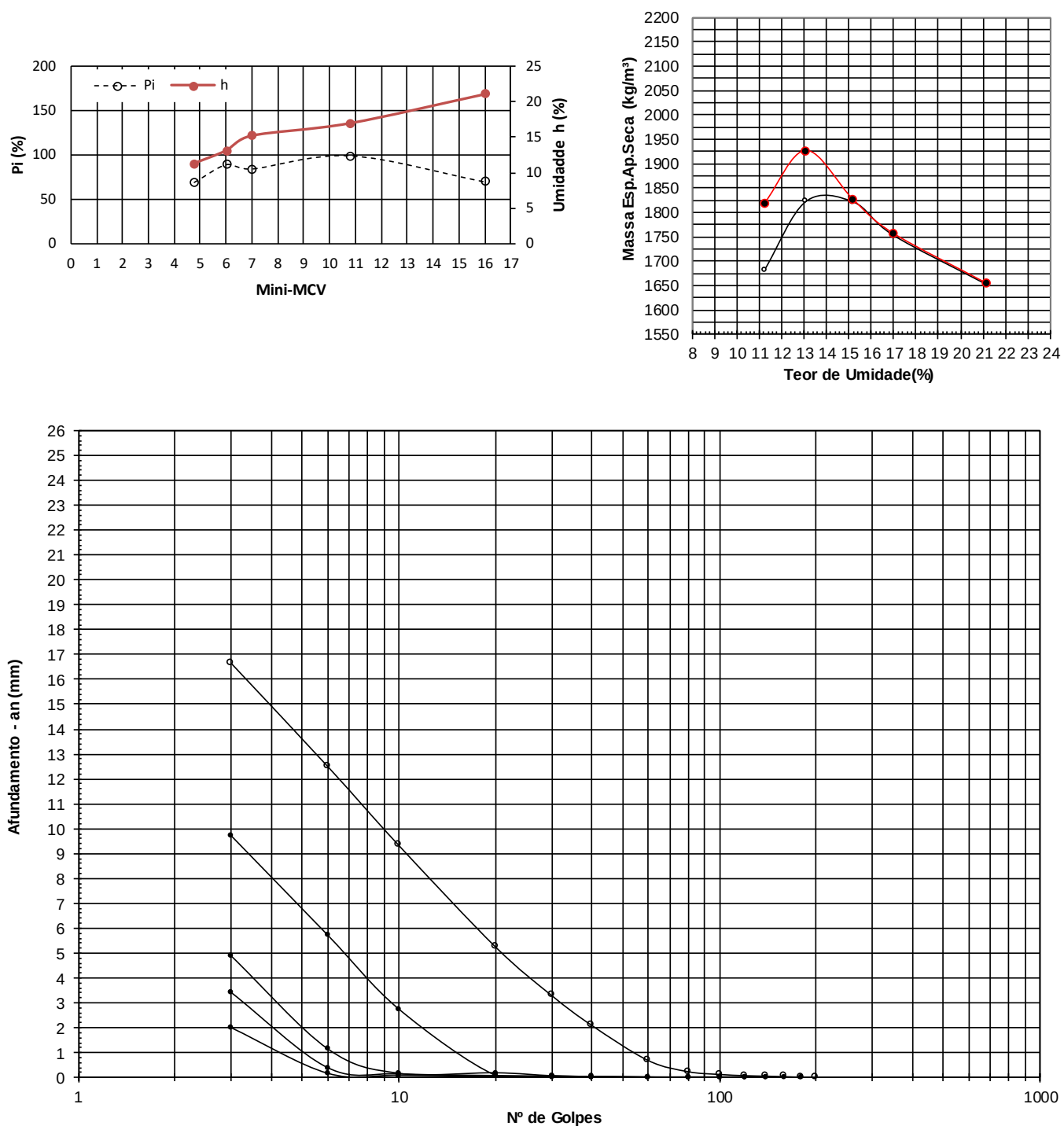


Figura 42- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL7

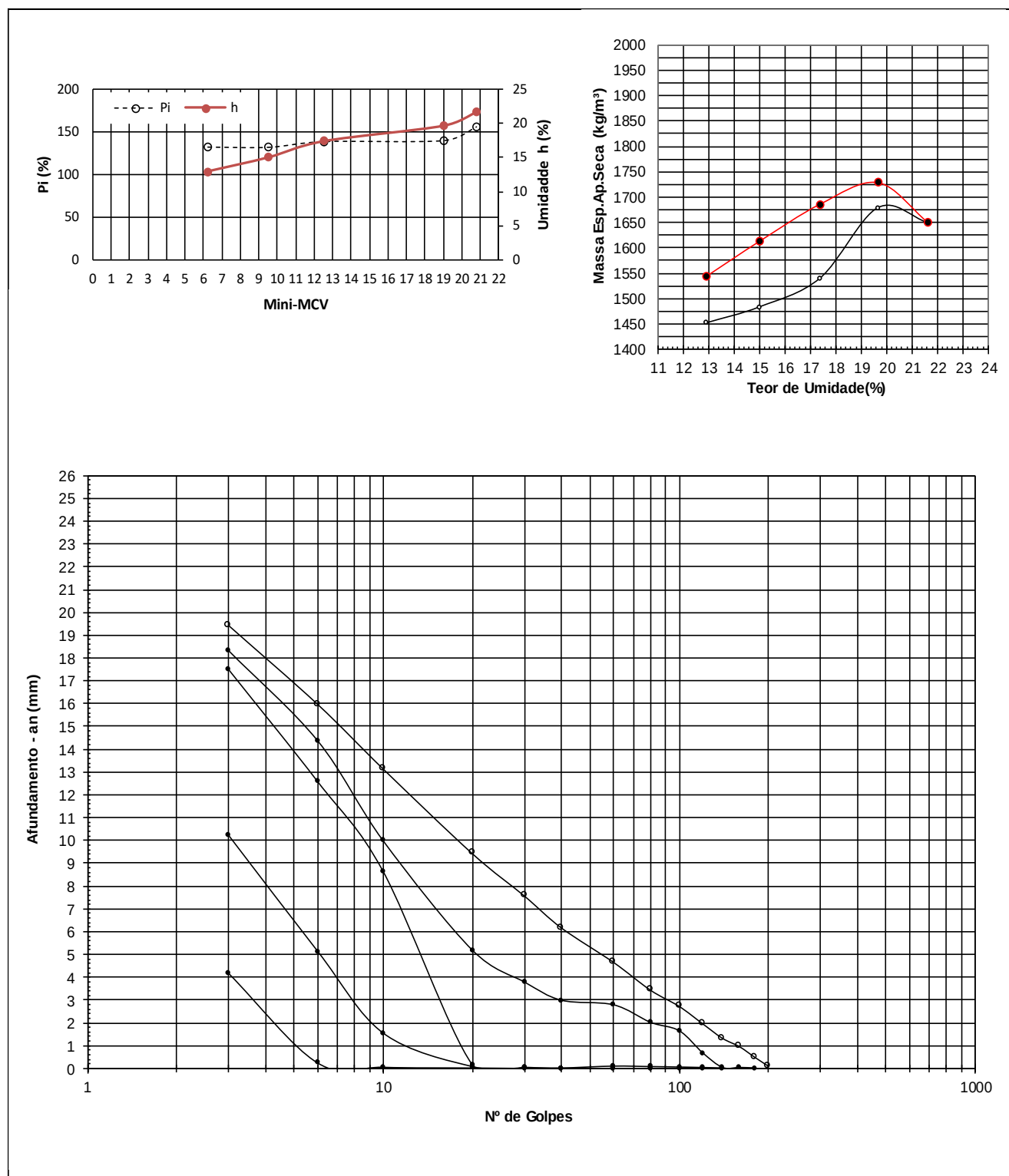


Figura 43- Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL8

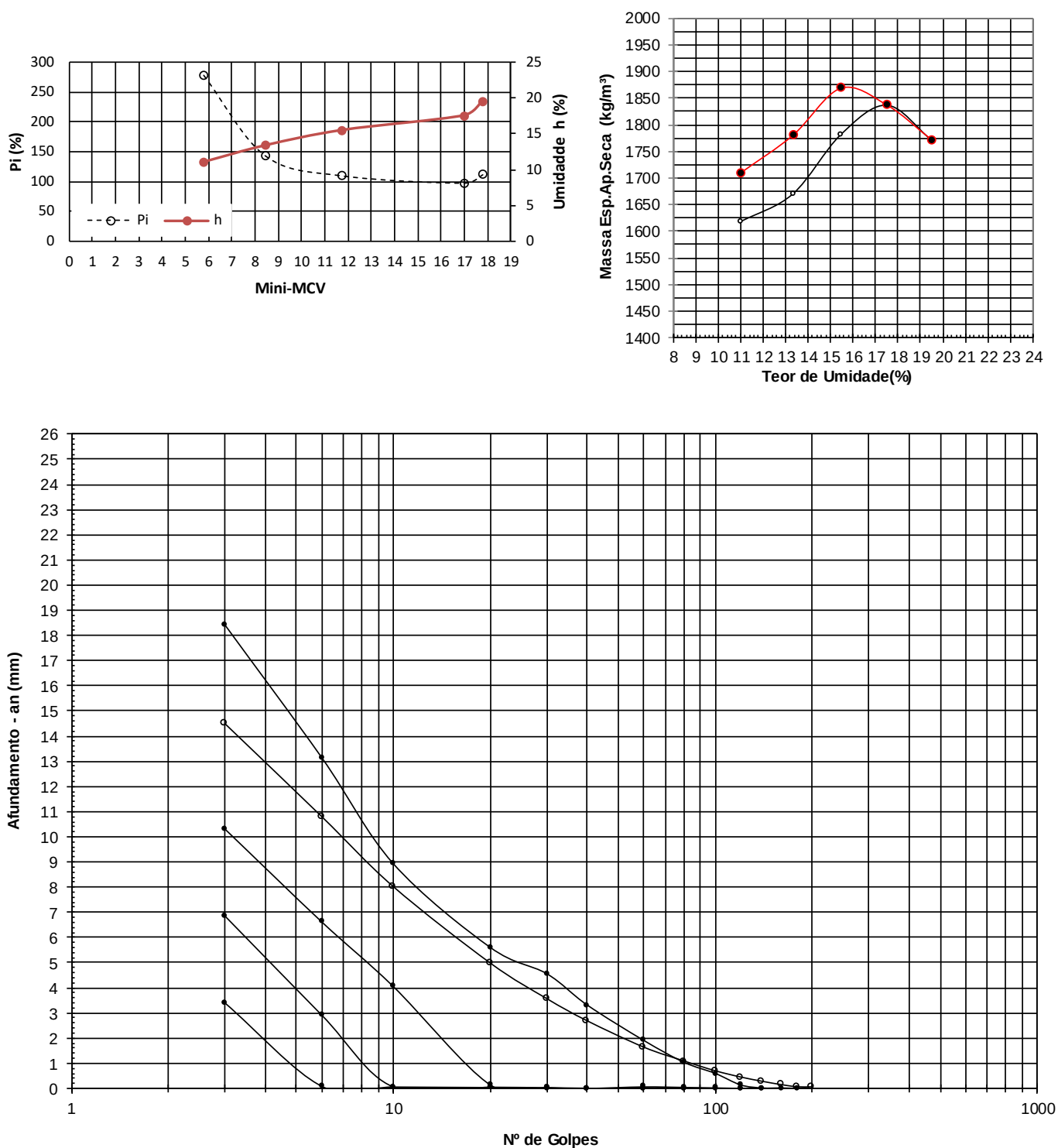


Figura 44 Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL9

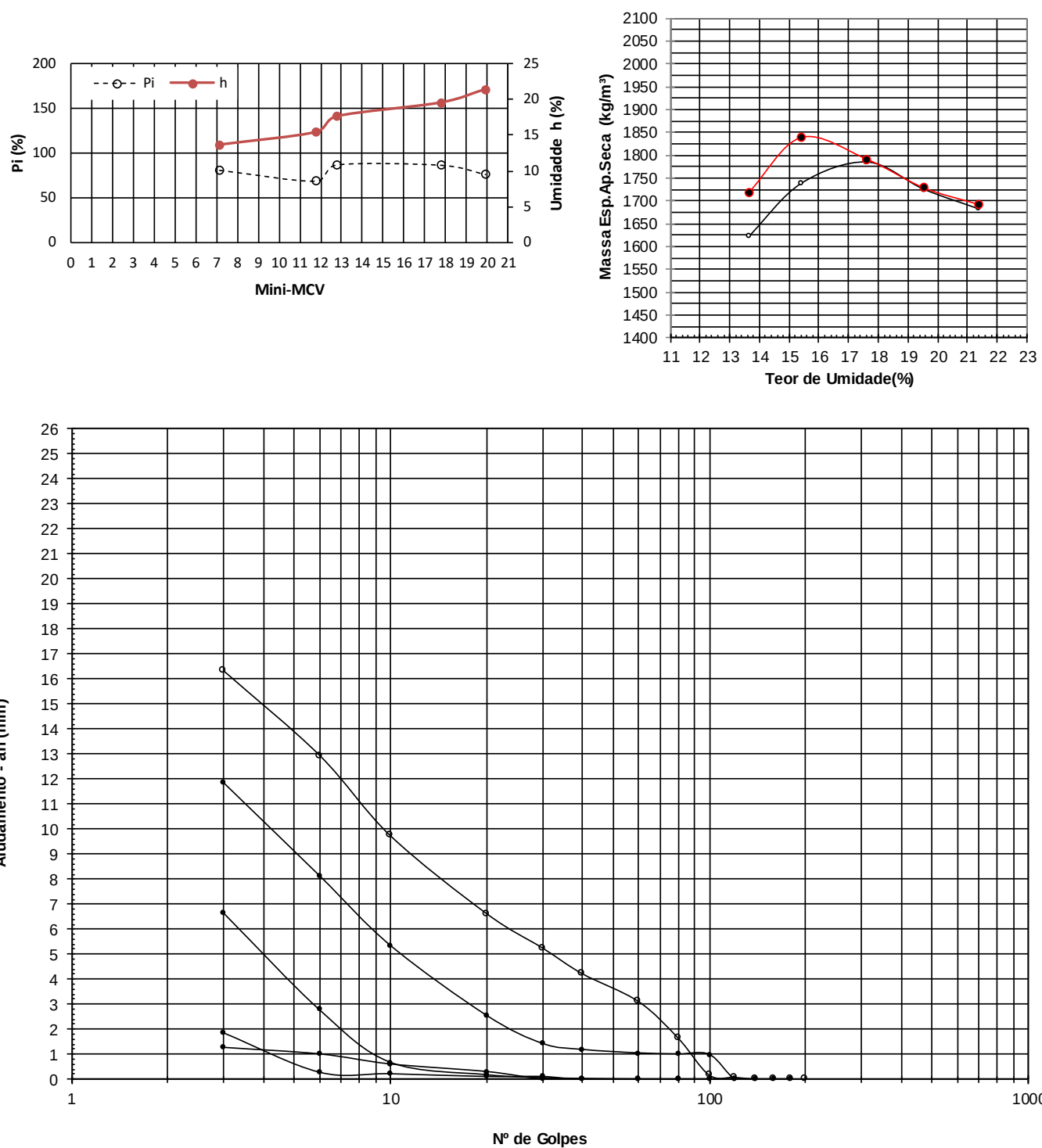


Figura 45 Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL10

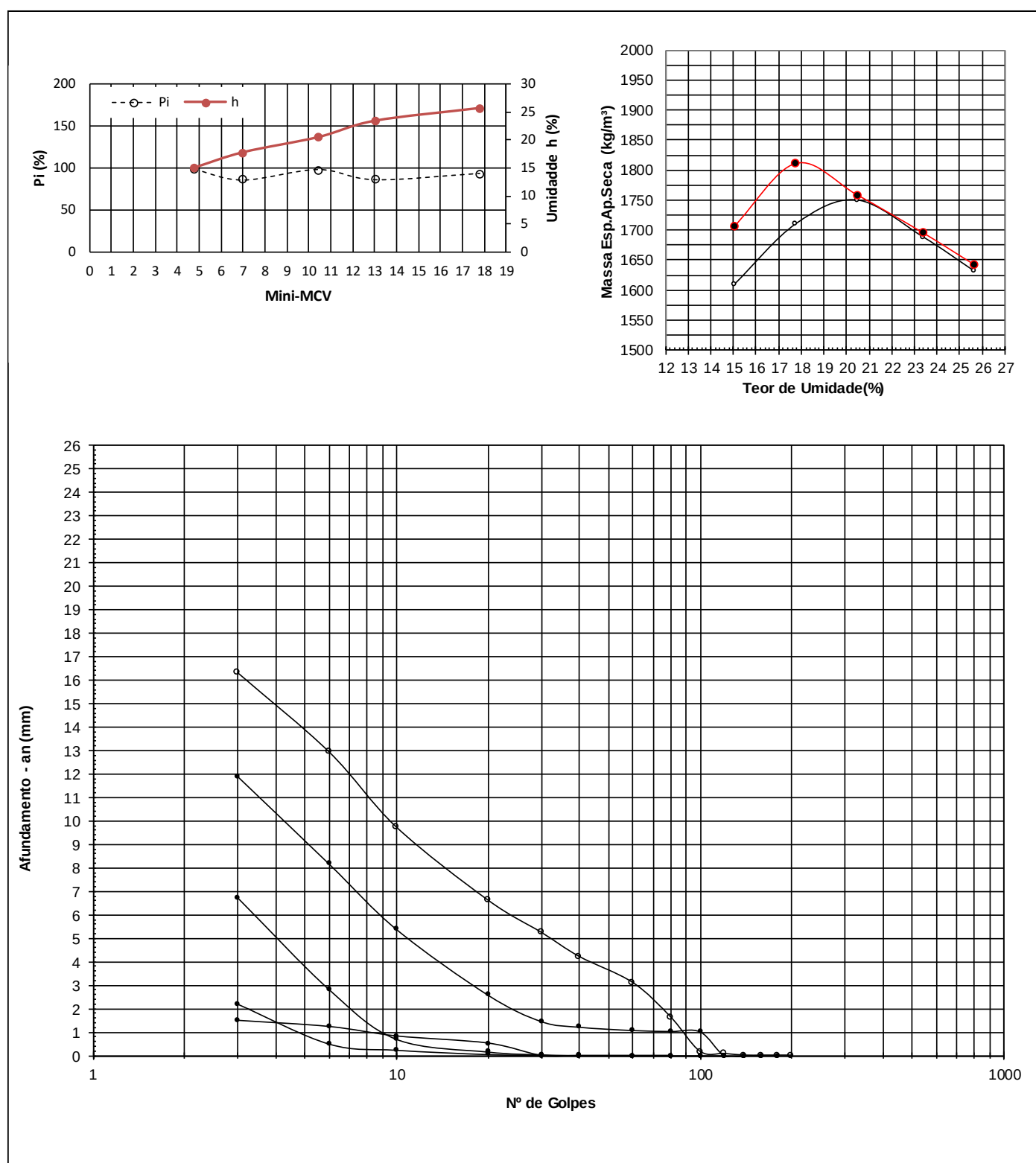


Figura 46-Resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão do SL11

Tabela 13 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL01

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	11				15				16				77				92			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	172,4				175,4				177,8				181,8				185,0			
Úmidade (%)	16,0				14,0				12,5				10,0				8,1			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	22,25	64,8			19,85	67,2			17,15	69,9			12,35	74,7			10,55	76,5		
3	32,89	54,16	2,51	1621,994	34,35	52,7	2,24	1696,072	30,81	56,24	6,51	1610,551	28,22	58,83	10,85	1574,411	23,55	63,5	16,18	1484,599
6	34,15	52,9	1,25	1660,628	36,15	50,9	0,44	1756,051	34,75	52,3	2,57	1731,881	31,97	55,08	7,1	1681,601	26,88	60,17	12,85	1566,761
10	34,9	52,15	0,5	1684,51	36,32	50,73	0,27	1761,936	36,85	50,2	0,47	1804,33	35,05	52	4,02	1781,204	30,11	56,94	9,62	1655,638
20	35,15	51,9	0,25	1692,625	36,5	50,55	0,09	1768,209	37,1	49,95	0,22	1813,361	37,53	49,52	1,54	1870,408	33,99	53,06	5,74	1776,706
30	35,4	51,65	0	1700,817	36,56	50,49	0,03	1770,311	37,16	49,89	0,16	1815,542	38,51	48,54	0,56	1908,171	35,88	51,17	3,85	1842,33
40	35,4	51,65	0	1700,817	36,59	50,46	0	1771,363	37,25	49,8	0,07	1818,823	38,73	48,32	0,34	1916,859	37,03	50,02	2,7	1884,687
60					36,59	50,46	0	1771,363	37,32	49,73	0	1821,383	38,97	48,08	0,1	1926,427	38,8	48,25	0,93	1953,825
80									37,32	49,73	0	1821,383	39,03	48,02	0,04	1928,834	39,25	47,8	0,48	1972,218
100													39,05	48	0,02	1929,638	39,55	47,5	0,18	1984,674
120													39,07	47,98	0	1930,442	39,67	47,38	0,06	1989,701
140													39,07	47,98	0	1930,442	39,73	47,32	0	1992,224
160																	39,73	47,32	0	1992,224
180																				
200																				
220																				
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (n°)	14				74				70				59				28			
Massa Seca + Tara (g)	87,75				85,64				94,95				91,54				91,50			
Massa da Tara (g)	54,10				51,06				54,07				50,00				51,29			
Massa Desprendida (g)	33,65				34,58				40,88				41,54				40,21			
Perda por Imersão (%)	100,8				99,4				114,3				109,6				102,8			

Tabela 14 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL02

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	46				22				15				30				28			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	168,9				171,7				173,9				177,9				180,3			
Úmidade (%)	18,4				16,5				15,0				12,4				10,9			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	18,72	67,05			14,44	71,33			12,00	73,77			7,54	78,23			6,21	79,56		
3	27,74	58,03	2,38	1481,764	25,51	60,26	4,90	1451,762	22,77	63,00	8,13	1405,963	17,89	67,88	12,44	1334,813	16,38	69,39	15,14	1324,335
6	29,91	55,86	0,21	1539,326	29,14	56,63	1,27	1544,821	25,87	59,90	5,03	1478,725	21,27	64,50	9,06	1404,761	20,12	65,65	11,40	1399,781
10	30,02	55,75	0,10	1542,363	30,13	55,64	0,28	1572,308	28,31	57,46	2,59	1541,518	23,76	62,01	6,57	1461,169	21,98	63,79	9,54	1440,596
20	30,12	55,65	0,00	1545,135	30,38	55,39	0,03	1579,404	30,30	55,47	0,60	1596,821	26,84	58,93	3,49	1537,538	23,94	61,83	7,58	1486,262
30	30,12	55,65	0,00	1545,135	30,41	55,36	0,00	1580,260	30,64	55,13	0,26	1606,669	28,59	57,18	1,74	1584,594	26,20	59,57	5,32	1542,649
40	30,12	55,65	0,00	1545,135	30,41	55,36	0,00	1580,260	30,74	55,03	0,16	1609,588	29,40	56,37	0,93	1607,364	27,40	58,37	4,12	1574,363
60					30,41	55,36	0,00	1580,260	30,85	54,92	0,05	1612,812	30,08	55,69	0,25	1626,991	30,15	55,62	1,37	1652,204
80									30,90	54,87	0,00	1614,282	30,21	55,56	0,12	1630,797	30,68	55,09	0,84	1668,099
100													30,30	55,47	0,03	1633,443	31,02	54,75	0,50	1678,458
120													30,33	55,44	0,00	1634,327	31,32	54,45	0,20	1687,706
140													30,33	55,44	0,00	1634,327	31,47	54,30	0,05	1692,368
160																	31,52	54,25	0,00	1693,928
180																				
200																				
220																				
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	64				79				73				66				24			
Massa Seca + Tara (g)	74,63				83,00				80,34				81,37				87,99			
Massa da Tara (g)	46,77				48,57				52,19				49,56				51,70			
Massa Desprendida (g)	27,86				34,86				28,15				31,81				36,29			
Perda por Imersão (%)	91,9				112,4				88,8				99,2				109,1			

Tabela 15 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL03

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	32				25				7				5				35			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	174,5				177,0				180,0				183,5				187,1			
Úmidade (%)	14,6				13,0				11,1				9,0				6,9			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	34,21	50,81			30,84	54,18			27,72	57,30			24,22	60,80			19,61	65,41		
3	38,27	46,75	0,09	1901,546	38,07	46,95	1,00	1920,046	36,60	48,42	3,67	1894,327	34,20	50,82	7,28	1838,556	29,49	55,53	11,88	1715,549
6	38,32	46,70	0,04	1903,582	38,76	46,26	0,31	1948,685	38,79	46,23	1,48	1984,065	36,93	48,09	4,55	1942,928	32,32	52,70	9,05	1807,674
10	38,33	46,69	0,03	1903,989	38,83	46,19	0,24	1951,638	39,94	45,08	0,33	2034,679	38,90	46,12	2,58	2025,920	34,86	50,16	6,51	1899,211
20	38,35	46,67	0,01	1904,805	39,03	45,99	0,04	1960,125	40,21	44,81	0,06	2046,939	40,96	44,06	0,52	2120,641	37,33	47,69	4,04	1997,577
30	38,36	46,66	0,00	1905,214	39,05	45,97	0,02	1960,978	40,23	44,79	0,04	2047,853	41,26	43,76	0,22	2135,179	38,49	46,53	2,88	2047,377
40	38,36	46,66	0,00	1905,214	39,07	45,95	0,00	1961,831	40,25	44,77	0,02	2048,767	41,30	43,72	0,18	2137,132	39,30	45,72	2,07	2083,649
60					39,07	45,95	0,00	1961,831	40,27	44,75	0,00	2049,683	41,39	43,63	0,09	2141,541	40,15	44,87	1,22	2123,121
80									40,27	44,75	0,00	2049,683	41,42	43,60	0,06	2143,014	40,55	44,47	0,82	2142,218
100													41,46	43,56	0,02	2144,982	40,88	44,14	0,49	2158,234
120													41,48	43,54	0,00	2145,968	41,09	43,93	0,28	2168,551
140													41,48	43,54	0,00	2145,968	41,32	43,70	0,05	2179,964
160																	41,37	43,65	0,00	2182,461
180																				
200																				
220																				
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	72				95				68				12				57			
Massa Seca + Tara (g)	84,66				87,21				82,09				83,23				87,72			
Massa da Tara (g)	53,18				48,98				48,50				55,27				54,80			
Massa Desprendida (g)	31,48				38,23				33,59				27,96				32,92			
Perda por Imersão (%)	84,2				99,3				83,5				66,4				76,8			

Tabela 16 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL04

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	23				37				39				6				15			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	161,7				163,9				166,9				169,6				172,4			
Úmidade (%)	23,7				22,0				19,8				17,9				16,0			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	19,00	68,92			15,08	72,84			14,52	73,40			9,59	78,33			8,52	79,40		
3	31,14	56,78	6,26	1450,097	28,91	59,01	9,71	1415,594	25,11	62,81	14,76	1353,981	21,85	66,07	11,12	1308,324	15,78	72,14	24,86	1217,990
6	35,36	52,56	2,04	1566,525	33,54	54,38	5,08	1536,120	29,10	58,82	10,77	1445,827	25,66	62,26	7,31	1388,387	20,59	67,33	20,05	1304,948
10	36,55	51,37	0,85	1602,814	36,25	51,67	2,37	1616,687	31,98	55,94	7,89	1520,263	28,51	59,41	4,46	1454,991	24,15	63,77	16,49	1377,797
20	37,36	50,56	0,04	1628,492	37,97	49,95	0,65	1672,357	35,80	52,12	4,07	1631,687	31,58	56,34	1,39	1534,274	28,15	59,77	12,49	1470,004
30	37,38	50,54	0,02	1629,136	38,20	49,72	0,42	1680,093	37,16	50,76	2,71	1675,404	32,23	55,69	0,74	1552,182	32,55	55,37	8,09	1586,818
40	37,40	50,52	0,00	1629,781	38,50	49,42	0,12	1690,292	38,58	49,34	1,29	1723,622	32,53	55,39	0,44	1560,588	34,17	53,75	6,47	1634,644
60					38,62	49,30	0,00	1694,406	39,10	48,82	0,77	1741,981	32,73	55,19	0,24	1566,244	36,10	51,82	4,54	1695,525
80									39,20	48,72	0,67	1745,557	32,80	55,12	0,17	1568,233	37,91	50,01	2,73	1756,891
100									39,40	48,52	0,47	1752,752	32,81	55,11	0,16	1568,517	39,40	48,52	1,24	1810,844
120									39,66	48,26	0,21	1762,195	32,82	55,10	0,15	1568,802	39,66	48,26	0,98	1820,599
140									39,80	48,12	0,07	1767,322	32,86	55,06	0,11	1569,942	39,80	48,12	0,84	1825,896
160									39,87	48,05	0,00	1769,897	32,87	55,05	0,10	1570,227	39,87	48,05	0,77	1828,556
180													32,90	55,02	0,07	1571,083	40,15	47,77	0,49	1839,274
200													32,97	54,95	0,00	1573,085	40,55	47,37	0,09	1854,805
220																	40,62	47,30	0,02	1857,550
240																	40,64	47,28	0,00	1858,336
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	55				95				97				21				57			
Massa Seca + Tara (g)	83,07				74,36				89,24				78,75				98,48			
Massa da Tara (g)	55,39				50,00				51,14				50,41				54,65			
Massa Desprendida (g)	27,68				24,36				38,10				28,34				43,83			
Perda por Imersão (%)	86,5				73,2				109,7				91,8				120,2			

Tabela 17 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL05

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	31				35				1				122				127			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	161,3				164,7				166,9				170,1				173,9			
Úmidade (%)	24,0				21,4				19,8				17,6				15,0			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	17,22	74,34			14,67	76,89			16,27	75,29			17,80	73,76			12,38	79,18		
3	34,07	57,49	3,08	1429,782	30,32	61,24	9,80	1370,668	29,50	62,06	10,72	1370,091	26,15	65,41	14,13	1325,013	20,68	70,88	16,97	1250,460
6	36,95	54,61	0,20	1505,185	32,97	58,59	7,15	1432,662	32,27	59,29	7,95	1434,101	29,60	61,96	10,68	1398,791	23,55	68,01	14,10	1303,229
10	36,99	54,57	0,16	1506,288	35,66	55,90	4,46	1501,604	34,50	57,06	5,72	1490,148	31,95	59,61	8,33	1453,935	29,12	62,44	8,53	1419,485
20	37,02	54,54	0,13	1507,117	36,85	54,71	3,27	1534,266	36,52	55,04	3,70	1544,838	34,05	57,51	6,23	1507,026	30,93	60,63	6,72	1461,861
30	37,10	54,46	0,05	1509,331	37,07	54,49	3,05	1540,460	37,25	54,31	2,97	1565,602	36,45	55,11	3,83	1572,656	32,12	59,44	5,53	1491,128
40	37,15	54,41	0,00	1510,718	40,11	51,45	0,01	1631,481	38,95	52,61	1,27	1616,192	37,28	54,28	3,00	1596,704	34,84	56,72	2,81	1562,635
60					40,12	51,44	0,00	1631,798	39,07	52,49	1,15	1619,887	38,14	53,42	2,14	1622,409	36,56	55,00	1,09	1611,502
80									39,57	51,99	0,65	1635,466	38,60	52,96	1,68	1636,501	36,93	54,63	0,72	1622,417
100									40,15	51,41	0,07	1653,917	38,95	52,61	1,33	1647,388	37,13	54,43	0,52	1628,378
120									40,20	51,36	0,02	1655,527	40,15	51,41	0,13	1685,841	37,35	54,21	0,30	1634,987
140									40,22	51,34	0,00	1656,172	40,24	51,32	0,04	1688,797	37,51	54,05	0,14	1639,827
160													40,26	51,30	0,02	1689,456	37,59	53,97	0,06	1642,257
180													40,28	51,28	0,00	1690,115	37,61	53,95	0,04	1642,866
200																	37,63	53,93	0,02	1643,476
220																	37,65	53,91	0,00	1644,085
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	103				21				62				76				55			
Massa Seca + Tara (g)	81,94				88,14				82,96				87,46				86,99			
Massa da Tara (g)	46,98				50,46				46,88				83,29				55,52			
Massa Desprendida (g)	34,96				37,68				36,08				34,17				31,47			
Perda por Imersão (%)	117,9				117,6				111,0				103,0				97,5			

Tabela 18 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL06

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	23				12				53				29				16			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	165,7				168,8				171,8				175,1				178,1			
Úmidade (%)	20,7				18,5				16,4				14,2				12,3			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	19,00	69,44			20,67	67,77			14,21	74,23			10,40	78,04			11,93	76,51		
3	31,14	57,30	6,26	1473,247	36,21	52,23	3,85	1646,480	29,32	59,12	12,36	1480,142	24,20	64,24	18,71	1388,794	23,63	64,81	18,59	1399,326
6	35,36	53,08	2,04	1590,374	39,55	48,89	0,51	1758,962	34,40	54,04	7,28	1619,282	29,04	59,40	13,87	1501,955	27,87	60,57	14,35	1497,281
10	37,33	51,11	0,07	1651,674	39,94	48,50	0,12	1773,106	38,06	50,38	3,62	1736,920	34,12	54,32	8,79	1642,417	31,19	57,25	11,03	1584,110
20	37,36	51,08	0,04	1652,644	40,00	48,44	0,06	1775,303	40,52	47,92	1,16	1826,085	38,40	50,04	4,51	1782,896	35,59	52,85	6,63	1715,994
30	37,38	51,06	0,02	1653,291	40,02	48,42	0,04	1776,036	41,52	46,92	0,16	1865,005	39,25	49,19	3,66	1813,704	37,44	51,00	4,78	1778,241
40	37,40	51,04	0,00	1653,939	40,04	48,40	0,02	1776,770	41,58	46,86	0,10	1867,393	39,92	48,52	2,99	1838,749	38,44	50,00	3,78	1813,806
60					40,06	48,38	0,00	1777,504	41,60	46,84	0,08	1868,190	40,30	48,14	2,61	1853,264	39,58	48,86	2,64	1856,126
80									41,62	46,82	0,06	1868,988	41,33	47,11	1,58	1893,783	40,35	48,09	1,87	1885,845
100									41,63	46,81	0,05	1869,387	41,96	46,48	0,95	1919,452	40,64	47,80	1,58	1897,287
120									41,64	46,80	0,04	1869,787	42,30	46,14	0,61	1933,596	41,05	47,39	1,17	1913,701
140									41,66	46,78	0,02	1870,586	42,56	45,88	0,35	1944,553	41,53	46,91	0,69	1933,283
160									41,68	46,76	0,00	1871,386	42,79	45,65	0,12	1954,351	41,68	46,76	0,54	1939,485
180													42,89	45,55	0,02	1958,641	41,84	46,60	0,38	1946,144
200													42,91	45,53	0,00	1959,502	42,12	46,32	0,10	1957,908
220																	42,20	46,24	0,02	1961,295
240																	42,22	46,22	0,00	1962,144
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	55				43				18				27				21			
Massa Seca + Tara (g)	75,07				70,90				71,55				76,15				72,15			
Massa da Tara (g)	55,39				51,32				51,48				51,00				50,42			
Massa Desprendida (g)	19,68				19,58				20,07				25,15				21,73			
Perda por Imersão (%)	60,6				56,1				54,6				65,4				56,4			

Tabela 19 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL07

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	19				31				49				125				30			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	164,5				167,1				170,4				173,9				177,1			
Úmidade (%)	21,6				19,7				17,4				15,0				12,9			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	21,36	69,31			16,87	73,80			12,54	78,13			13,16	77,51			13,63	77,04		
3	35,76	54,91	4,18	1525,538	31,30	59,37	10,21	1434,082	25,45	65,22	17,52	1330,608	22,59	68,08	18,35	1301,085	22,24	68,43	19,45	1318,239
6	39,68	50,99	0,26	1642,818	36,37	54,30	5,14	1567,983	30,37	60,30	12,60	1439,175	26,55	64,12	14,39	1381,439	25,70	64,97	15,99	1388,442
10	39,87	50,80	0,07	1648,963	39,95	50,72	1,56	1678,656	34,32	56,35	8,65	1540,058	30,95	59,72	9,99	1483,219	28,54	62,13	13,15	1451,909
20	39,90	50,77	0,04	1649,937	41,41	49,26	0,10	1728,409	39,20	51,47	3,77	1686,075	35,75	54,92	5,19	1612,852	32,25	58,42	9,44	1544,113
30	39,92	50,75	0,02	1650,587	41,47	49,20	0,04	1730,517	41,88	48,79	1,09	1778,690	37,15	53,52	3,79	1655,042	34,11	56,56	7,58	1594,892
40	39,94	50,73	0,00	1651,238	41,49	49,18	0,02	1731,221	42,80	47,87	0,17	1812,874	37,95	52,72	2,99	1680,157	35,51	55,16	6,18	1635,371
60					41,51	49,16	0,00	1731,925	42,87	47,80	0,10	1815,529	38,15	52,52	2,79	1686,555	37,02	53,65	4,67	1681,399
80									42,89	47,78	0,08	1816,289	38,92	51,75	2,02	1711,649	38,24	52,43	3,45	1720,524
100									42,91	47,76	0,06	1817,049	39,29	51,38	1,65	1723,975	38,95	51,72	2,74	1744,143
120									42,93	47,74	0,04	1817,811	40,26	50,41	0,68	1757,149	39,71	50,96	1,98	1770,155
140									42,95	47,72	0,02	1818,572	40,84	49,83	0,10	1777,601	40,35	50,32	1,34	1792,668
160									42,97	47,70	0,00	1819,335	40,90	49,77	0,04	1779,744	40,72	49,95	0,97	1805,947
180													40,92	49,75	0,02	1780,459	41,18	49,49	0,51	1822,733
200													40,94	49,73	0,00	1781,176	41,57	49,10	0,12	1837,211
220																	41,61	49,06	0,08	1838,709
240																	41,69	48,98	0,00	1841,712
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	13				20				56				65				92			
Massa Seca + Tara (g)	104,81				99,54				102,00				99,38				96,90			
Massa da Tara (g)	54,16				51,87				52,36				53,11				48,98			
Massa Desprendida (g)	50,65				47,67				49,64				46,27				47,92			
Perda por Imersão (%)	156,3				140,2				139,0				132,3				132,5			

Tabela 20 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL08

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	2				52				47				125				49			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	165,2				170,9				173,6				176,8				179,9			
Úmidade (%)	21,1				17,0				15,2				13,1				11,2			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	30,39	61,75			30,41	61,73			28,06	64,08			24,52	67,62			19,88	72,26		
3	39,31	52,83	2,02	1592,073	39,20	52,94	3,41	1645,394	38,87	53,27	4,88	1660,551	35,75	56,39	9,72	1598,084	30,39	61,75	16,64	1483,562
6	41,17	50,97	0,16	1650,171	42,23	49,91	0,38	1745,285	42,61	49,53	1,14	1785,939	39,74	52,40	5,73	1719,770	34,53	57,61	12,50	1590,174
10	41,25	50,89	0,08	1652,765	42,48	49,66	0,13	1754,071	43,60	48,54	0,15	1822,364	42,71	49,43	2,76	1823,102	37,70	54,44	9,33	1682,769
20	41,29	50,85	0,04	1654,065	42,55	49,59	0,06	1756,547	43,69	48,45	0,06	1825,749	45,37	46,77	0,10	1926,790	41,77	50,37	5,26	1818,740
30	41,32	50,82	0,01	1655,042	42,57	49,57	0,04	1757,256	43,71	48,43	0,04	1826,503	45,40	46,74	0,07	1928,026	43,73	48,41	3,30	1892,376
40	41,33	50,81	0,00	1655,367	42,59	49,55	0,02	1757,965	43,73	48,41	0,02	1827,258	45,42	46,72	0,05	1928,852	44,93	47,21	2,10	1940,477
60					42,61	49,53	0,00	1758,675	43,75	48,39	0,00	1828,013	45,44	46,70	0,03	1929,678	46,34	45,80	0,69	2000,217
80													45,47	46,67	0,00	1930,918	46,79	45,35	0,24	2020,065
100																	46,90	45,24	0,13	2024,977
120																	46,95	45,19	0,08	2027,217
140																	46,97	45,17	0,06	2028,115
160																	46,99	45,15	0,04	2029,013
180																	47,01	45,13	0,02	2029,912
200																	47,03	45,11	0,00	2030,812
220																				
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	145				116				37				101				33			
Massa Seca + Tara (g)	75,56				85,36				84,86				85,23				77,55			
Massa da Tara (g)	52,86				51,23				54,62				51,45				49,85			
Massa Desprendida (g)	22,70				34,13				30,24				33,78				27,70			
Perda por Imersão (%)	69,9				98,9				84,3				89,1				69,5			

Tabela 21 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL09

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	3				24				27				45				6			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	167,4				170,2				173,2				176,5				180,2			
Úmidade (%)	19,5				17,5				15,5				13,3				11,0			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	28,78	61,97			21,49	69,26			18,20	72,55			18,11	72,64			19,08	71,67		
3	39,31	51,44	3,39	1657,131	36,77	53,98	6,88	1605,931	35,00	55,75	10,33	1582,570	27,46	63,29	18,43	1420,229	27,58	63,17	14,49	1452,622
6	42,61	48,14	0,09	1770,727	40,72	50,03	2,93	1732,723	38,69	52,06	6,64	1694,742	32,74	58,01	13,15	1549,497	31,28	59,47	10,79	1542,998
10	42,64	48,11	0,06	1771,831	43,58	47,17	0,07	1837,781	41,25	49,50	4,08	1782,389	36,95	53,80	8,94	1670,749	34,06	56,69	8,01	1618,665
20	42,66	48,09	0,04	1772,568	43,59	47,16	0,06	1838,171	43,56	47,19	1,77	1869,639	40,28	50,47	5,61	1780,985	37,10	53,65	4,97	1710,384
30	42,68	48,07	0,02	1773,305	43,61	47,14	0,04	1838,951	45,00	45,75	0,33	1928,487	41,33	49,42	4,56	1818,825	38,52	52,23	3,55	1756,885
40	42,70	48,05	0,00	1774,044	43,63	47,12	0,02	1839,731	45,22	45,53	0,11	1937,805	42,57	48,18	3,32	1865,635	39,40	51,35	2,67	1786,993
60					43,65	47,10	0,00	1840,512	45,25	45,50	0,08	1939,083	43,98	46,77	1,91	1921,880	40,45	50,30	1,62	1824,296
80									45,27	45,48	0,06	1939,935	44,85	45,90	1,04	1958,307	41,00	49,75	1,07	1844,464
100									45,29	45,46	0,04	1940,789	45,29	45,46	0,60	1977,261	41,39	49,36	0,68	1859,038
120									45,31	45,44	0,02	1941,643	45,75	45,00	0,14	1997,473	41,64	49,11	0,43	1868,501
140									45,33	45,42	0,00	1942,498	45,85	44,90	0,04	2001,922	41,81	48,94	0,26	1874,992
160													45,87	44,88	0,02	2002,814	41,94	48,81	0,13	1879,986
180													45,89	44,86	0,00	2003,707	42,03	48,72	0,04	1883,459
200																	42,05	48,70	0,02	1884,232
220																	42,07	48,68	0,00	1885,006
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	33				25				83				42				1			
Massa Seca + Tara (g)	93,74				86,60				89,36				107,15				153,98			
Massa da Tara (g)	54,78				51,21				47,44				50,77				51,07			
Massa Desprendida (g)	38,96				35,39				41,92				56,38				102,91			
Perda por Imersão (%)	111,9				98,0				109,9				143,3				278,1			

Tabela 22 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL10

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	18				22				97				1				11			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	164,7				167,4				170,1				173,3				175,9			
Úmidade (%)	21,4				19,5				17,6				15,4				13,7			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	24,98	60,47			22,32	63,13			18,14	67,31			13,96	71,49			11,55	73,90		
3	34,89	50,56	1,26	1660,207	34,41	51,04	1,87	1669,965	30,91	54,54	6,67	1588,176	28,14	57,31	11,87	1540,269	23,62	61,83	16,32	1449,723
6	35,15	50,30	1,00	1668,789	35,98	49,47	0,30	1722,964	34,80	50,65	2,78	1710,150	31,87	53,58	8,14	1647,496	27,00	58,45	12,94	1533,556
10	35,55	49,90	0,60	1682,166	36,04	49,41	0,24	1725,056	36,91	48,54	0,67	1784,489	34,66	50,79	5,35	1737,996	30,21	55,24	9,73	1622,671
20	35,85	49,60	0,30	1692,340	36,15	49,30	0,13	1728,905	37,10	48,35	0,48	1791,502	37,46	47,99	2,55	1839,400	33,32	52,13	6,62	1719,478
30	36,15	49,30	0,00	1702,638	36,15	49,30	0,13	1728,905	37,22	48,23	0,36	1795,959	38,59	46,86	1,42	1883,757	34,70	50,75	5,24	1766,234
40	36,15	49,30	0,00	1702,638	36,28	49,17	0,00	1733,476	37,28	48,17	0,30	1798,196	38,83	46,62	1,18	1893,454	35,73	49,72	4,21	1802,823
60					36,28	49,17	0,00	1733,476	37,58	47,87	0,00	1809,465	38,97	46,48	1,04	1899,157	36,84	48,61	3,10	1843,990
80									37,58	47,87	0,00	1809,465	39,01	46,44	1,00	1900,793	38,31	47,14	1,63	1901,493
100													39,03	46,42	0,98	1901,612	39,78	45,67	0,16	1962,697
120													40,01	45,44	0,00	1942,624	39,87	45,58	0,07	1966,572
140													40,01	45,44	0,00	1942,624	39,94	45,51	0,00	1969,597
160																	39,94	45,51	0,00	1969,597
180																				
200																				
220																				
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	10				30				83				24				8			
Massa Seca + Tara (g)	76,83				80,34				105,00				87,68				72,98			
Massa da Tara (g)	51,42				51,02				50,00				62,00				42,88			
Massa Desprendida (g)	25,41				29,32				30,56				25,68				30,10			
Perda por Imersão (%)	76,0				86,2				86,6				68,8				80,6			

Tabela 23 - Dados do ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão da amostra SL11

Ensaio de mini-MCV																				
Cilindro (n°)	1				22				42				55				122			
Massa do solo úmido (g)	200,0				200,0				200,0				200,0				200,0			
Massa do solo seco (g)	159,2				162,1				166,0				169,8				173,9			
Úmidade (%)	25,6				23,4				20,5				17,8				15,0			
Constante Ka	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00	Ac (mm)	37,05	La (mm)	50,00
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Ah (mm)	MEAS (g/cm³)
0	25,00	60,23			21,00	64,23			17,00	68,23			14,13	71,10			12,00	73,23		
3	34,89	50,34	1,48	1610,854	34,41	50,82	2,17	1624,916	30,91	54,32	6,71	1557,168	28,14	57,09	11,91	1515,508	23,62	61,61	16,32	1437,602
6	35,15	50,08	1,22	1619,217	36,08	49,15	0,50	1680,127	34,80	50,43	2,82	1677,283	31,87	53,36	8,18	1621,446	27,00	58,23	12,94	1521,048
10	35,55	49,68	0,82	1632,254	36,34	48,89	0,24	1689,062	36,91	48,32	0,71	1750,525	34,66	50,57	5,39	1710,903	30,21	55,02	9,73	1609,790
20	35,85	49,38	0,52	1642,171	36,52	48,71	0,06	1695,303	37,14	48,09	0,48	1758,898	37,46	47,77	2,59	1811,186	33,32	51,91	6,62	1706,235
30	36,37	48,86	0,00	1659,648	36,55	48,68	0,03	1696,348	37,26	47,97	0,36	1763,298	38,59	46,64	1,46	1855,067	34,70	50,53	5,24	1752,833
40	36,37	48,86	0,00	1659,648	36,58	48,65	0,00	1697,394	37,32	47,91	0,30	1765,506	38,83	46,40	1,22	1864,663	35,73	49,50	4,21	1789,306
60					36,58	48,65	0,00	1697,394	37,62	47,61	0,00	1776,631	38,97	46,26	1,08	1870,306	36,84	48,39	3,10	1830,350
80									37,62	47,61	0,00	1776,631	39,01	46,22	1,04	1871,924	38,31	46,92	1,63	1887,695
100													39,03	46,20	1,02	1872,735	39,78	45,45	0,16	1948,749
120													40,05	45,18	0,00	1915,014	39,87	45,36	0,07	1952,615
140													40,05	45,18	0,00	1915,014	39,94	45,29	0,00	1955,633
160																	39,94	45,29	0,00	1955,633
180																				
200																				
220																				
240																				
Perda por Imersão																				
Cápsula (nº)	11				27				19				36				51			
Massa Seca + Tara (g)	87,62				79,90				85,01				86,90				87,88			
Massa da Tara (g)	57,23				51,12				51,00				54,56				50,33			
Massa Desprendida (g)	30,39				28,78				34,01				32,34				37,55			
Perda por Imersão (%)	93,3				86,4				97,5				86,0				97,8			

