

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Taiana Poerschke Damo

**CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS E ROCHAS SEDIMENTARES DA  
REGIÃO DE SANTA MARIA/RS SEGUNDO A METODOLOGIA MCT**

Santa Maria, RS  
2016



**Taiana Poerschke Damo**

**CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS E ROCHAS SEDIMENTARES DA REGIÃO DE  
SANTA MARIA/RS SEGUNDO A METODOLOGIA MCT**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Santa Maria, RS  
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Damo, Taiana Poerschke  
Classificação dos solos e rochas sedimentares da  
região de Santa Maria/RS segundo a metodologia MCT /  
Taiana Poerschke Damo.- 2016.  
121 p.; 30 cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2016

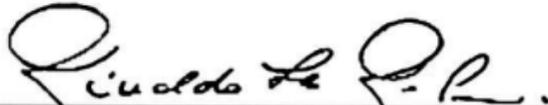
1. Classificação de solos 2. Solos tropicais 3.  
Metodologia MCT I. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa II.  
Titulo.

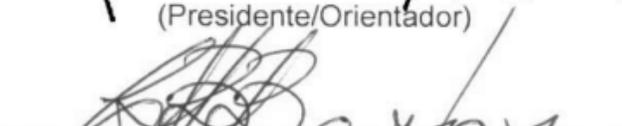
Taiana Poerschke Damo

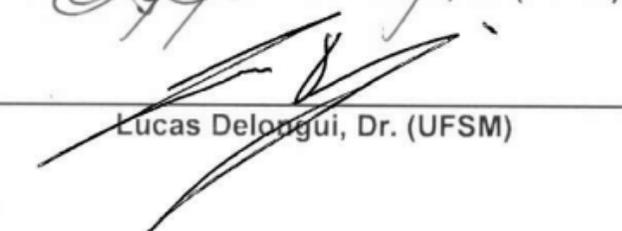
**CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS E ROCHAS SEDIMENTARES DA REGIÃO DE  
SANTA MARIA/RS SEGUNDO A METODOLOGIA MCT**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 16 de dezembro de 2016:

  
Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
Cezar Augusto Burkert Bastos, Dr. (FURG)

  
Lucas Delongui, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS  
2016



## DEDICATÓRIA

*À minha família, minha mãe Margareth e meus irmãos Eduardo, Thaise e Henrique, que apesar da distância, sempre deram o apoio e carinho necessários para que eu pudesse concretizar mais esta etapa. Dedico em especial, ao meu amado pai Nelson José Damo, que se faz presente neste momento através do extenso amor, ensinamentos e valores que hoje carrego comigo, graças aos quinze anos em que tive a honra do seu convívio.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela minha família e por guiar o meu destino, colocando no meu caminho pessoas iluminadas, as quais tenho o privilégio de agradecer a seguir.

À minha família pelo apoio, incentivo e compreensão nos momentos de incertezas, medos e angústias, sem a qual, certamente, essa jornada teria sido muito mais difícil.

Ao meu orientador, Prof. Rinaldo Pinheiro, pela confiança depositada por ocasião do processo seletivo para a pós-graduação, pelos ensinamentos transmitidos e pela dedicação nesse período.

Aos membros do GEOMA, Ildomar, Leila, Lucas e João, pela parceria, risadas e ensinamentos nesses dois anos de convívio.

Aos laboratoristas, Sr. João e Alison, por toda a ajuda e atenção dispensadas nessa longa jornada de ensaios.

Aos membros do LAPAV da UFRGS, Daniel, Junior e Felipe, pela receptividade e por todo o apoio na realização dos ensaios triaxiais.

Às minhas amigas, Letícia, Elisa, Jocielle e Mariana, pela amizade e carinho, amenizando a saudade da família e tornando Santa Maria minha segunda casa. Que possa o Senhor estar entre nós, enquanto estivermos separadas umas das outras.

Enfim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo.



## RESUMO

### CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS E ROCHAS SEDIMENTARES DA REGIÃO DE SANTA MARIA/RS SEGUNDO A METODOLOGIA MCT

AUTORA: Taiana Poerschke Damo

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Esta pesquisa teve como objetivo classificar os solos da região de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, segundo a metodologia MCT, objetivando conhecer as peculiaridades dos solos tropicais da região. A metodologia aplicada neste trabalho consistiu na localização, coleta e caracterização das jazidas de solos, e na realização de ensaios laboratoriais. Escolheram-se dois perfis típicos de solos das unidades geotécnicas da região e dois materiais provenientes de jazidas compreendidas na área de estudo. Através de ensaios laboratoriais, os materiais foram classificados segundo os sistemas tradicionais de classificação geotécnica, USCS e TRB, os quais são baseados em normativas dos Estados Unidos e Europa, regiões de clima temperado, e fundamentam-se nos valores de limites de consistência e na granulometria dos solos. Além da caracterização física, química e mecânica, foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas para obtenção do módulo de resiliência e classificação resiliente dos solos em estudo. Os ensaios de classificação MCT, MCT-M e o Método das Pastilhas foram realizados para o conhecimento do comportamento dos solos, tendo em vista o clima subtropical do estado e a presença de solos lateríticos. Possibilitando assim, a comparação entre os métodos de classificação, verificando a deficiência nos métodos tradicionais em se tratando de solos lateríticos e a validade do Método das Pastilhas como uma forma simplificada de caracterização dos solos. Os resultados desta pesquisa mostram que a metodologia MCT, desenvolvida para solos tropicais, é uma ferramenta importante para viabilizar projetos de pavimentação de baixo volume de tráfego, minimizando custos e otimizando o uso de solos tropicais nesses empreendimentos.

**Palavras-chaves:** Classificação de solos. Solos tropicais. Metodologia MCT.



## **ABSTRACT**

### **CLASSIFICATION OF SOILS AND SEDIMENTARY ROCKS FROM THE REGION OF SANTA MARIA/RS ACCORDING TO MCT METHODOLOGY**

AUTHOR: Taiana Poerschke Damo  
ADVISOR: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

This research aimed to classify soils from the region of Santa Maria, in the state of Rio Grande do Sul, according to the MCT Methodology, seeking to know the peculiarities of the tropical soils of the region. The methodology applied in this study consisted in situate, collect and characterization of the soil deposits, and the conduction of laboratory tests. It was chosen two typical soil profiles from the geotechnical units of the region and two materials from deposits inside the studied area. Through laboratory tests, materials were classified according to the traditional systems of geotechnical classification, USCS and TRB, which are based in regulations from United States and Europe, temperate climate regions, and are substantiated in the value of consistence limit and soil granulometry. Besides the physical, chemical and mechanical characterization, it was performed triaxial tests with repeated loads to obtain the resilience modulus and resilient classification of the studied soils. The experiments of the MCT, MCT-M and Tablets Method were performed to understand the behavior of the soils, in view of the subtropical climate in the state and the presence of lateritic soils. Thus, it is possible to compare the classification methods, verifying the deficiency in the traditional methods related to lateritic soils and prove the validity of the Tablets Method as a simplified form to soils characterization. The results of this research show that MCT Methodology, developed to tropical soils, is an important tool to make feasible projects of low traffic pavements, minimizing costs and optimizing the use of tropical soils in these enterprises.

**Keywords:** Soil classification. Tropical Soils. MCT Methodology



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação dos solos (USCS).....	21
Figura 2.2 - Gráfico de Plasticidade .....	22
Figura 2.3 - Classificação dos solos (TRB) .....	23
Figura 2.4 - Classificação resiliente dos solos granulares.....	26
Figura 2.5 - Classificação resiliente dos solos finos.....	27
Figura 2.6 - Classificação resiliente dos solos finos (método indireto).....	28
Figura 2.7 - Interrelação entre a classificação MCT e a resiliente.....	28
Figura 2.8 - Mapa climático brasileiro.....	30
Figura 2.9 - Perfil esquemático do solo tropical típico.....	31
Figura 2.10 - Ocorrência de solos de comportamento laterítico no território brasileiro .....	31
Figura 2.11 - Propriedades e utilização dos grupos de solos MCT .....	35
Figura 2.12 - Valores numéricos das propriedades.....	36
Figura 2.13 - Gráfico da classificação MCT .....	38
Figura 2.14 - Ábaco da classificação MCT-M.....	39
Figura 2.15 - Gráfico da classificação MCT pelo Método das Pastilhas.....	40
Figura 3.1 - Mapa do Rio Grande do Sul .....	42
Figura 4.1 - Mapa de localização dos perfis típicos e jazidas .....	51
Figura 4.2 - Formação Botucatu (BOT1) .....	52
Figura 4.3 - Formação Botucatu (BOT2) .....	53
Figura 4.4 - Formação Caturrita (CAT1).....	53
Figura 4.5 - Formação Caturrita (CAT2).....	54
Figura 4.6 - Formação Rosário do Sul (SC1) .....	54
Figura 4.7 - Formação Rosário do Sul (SC2) .....	55
Figura 4.8 - Formação Santa Maria / Alemoa (ALE1) .....	55
Figura 4.9 - Formação Santa Maria / Alemoa (ALE2) .....	56
Figura 4.10 - Formação Santa Maria / Passo das Tropas (PT1).....	56
Figura 4.11 - Formação Santa Maria / Passo das Tropas (PT2).....	57
Figura 4.12 - Jazida Canabarro.....	57
Figura 4.13 - Jazida Distrito Industrial.....	58
Figura 4.14 - Amostras para Análise Química.....	59
Figura 4.15 - Equipamento do ensaio triaxial de cargas repetidas.....	61
Figura 4.16 - Equipamento para compactação miniatura .....	63
Figura 4.17 - Ensaio de Perda de Massa por Imersão .....	63
Figura 4.18 - Penetrômetro .....	64
Figura 4.19 - Prensa Mini-CBR .....	66
Figura 4.20 - Ensaio de Expansão .....	68
Figura 4.21 - Ensaio de Contração.....	68
Figura 4.22 - Ensaio de Infiltrabilidade .....	70
Figura 4.23 - Curva Típica do deslocamento do menisco x tempo para o ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT .....	70
Figura 4.24 - Ensaio de Permeabilidade .....	71
Figura 4.25 - Gráfico do ensaio de Permeabilidade .....	72
Figura 5.1 – Índice de Plasticidade (%) x Teor de Argila (%) .....	76
Figura 5.2 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – BOT .....	77
Figura 5.3 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – CAT.....	78
Figura 5.4 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – SC.....	78
Figura 5.5 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – ALE .....	79

Figura 5.6 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – PT.....	79
Figura 5.7 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – BOT.....	82
Figura 5.8 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – CAT.....	83
Figura 5.9 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – SC.....	83
Figura 5.10 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – ALE.....	84
Figura 5.11 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – PT.....	84
Figura 5.12 - MR x $\sigma_3$ e MR x $\sigma_d$ – Formação Botucatu.....	86
Figura 5.13 - MR x $\sigma_3$ e MR x $\sigma_d$ – Formação Caturrita.....	86
Figura 5.14 - MR x $\sigma_3$ e MR x $\sigma_d$ – Formação Rosário do Sul.....	87
Figura 5.15 - MR x $\sigma_3$ e MR x $\sigma_d$ – Formação Santa Maria (Alemoa).....	87
Figura 5.16 - MR x $\sigma_3$ e MR x $\sigma_d$ – Formação Santa Maria (Passo das Tropas).....	87
Figura 5.17 - Valor médio de módulo de resiliência para cada solo.....	90
Figura 5.18 - Classificação MCT.....	92
Figura 5.19 - Classificação MCT-M.....	94
Figura 5.20 - Classificação Método das Pastilhas.....	95
Figura 5.21 - Infiltrabilidade (log s) versus energia de compactação.....	101
Figura 5.22 - Coeficiente de permeabilidade (log k) versus energia de compactação.....	102
Figura 5.23 – Coeficiente de permeabilidade (log k) na energia de compactação normal versus % de argila.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Coordenadas de localização dos perfis típicos e jazidas .....	50
Tabela 5.1 - Resumo dos resultados da Análise Química .....	74
Tabela 5.2 - Resumo dos ensaios de caracterização e classificação dos solos .....	75
Tabela 5.3 - Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação e CBR 81	
Tabela 5.4 - Características de compactação para o ensaio triaxial de cargas repetidas .....	85
Tabela 5.5 - Parâmetros de $M_R$ dos diversos modelos matemáticos .....	89
Tabela 5.6 - Classificação Resiliente (Método Direto, Método Indireto e MCT) .....	90
Tabela 5.7 - Índices e Classificação MCT dos solos em estudo .....	92
Tabela 5.8 - Índices e Classificação MCT-M dos solos em estudo .....	93
Tabela 5.9 - Índices e Classificação dos solos pelo Método das Pastilhas .....	94
Tabela 5.10 - Ensaio Mini-Proctor .....	96
Tabela 5.11 - Resultados dos Ensaio Mini-CBR e coeficientes RIS e PSI .....	98
Tabela 5.12 - Ensaio Infiltrabilidade e Permeabilidade .....	100
Tabela 5.13 - Resumo geral dos resultados dos ensaios .....	104



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALE	Formação Santa Maria – Membro Alemoa
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing Materials
BOT	Formação Botucatu
CAT	Formação Caturrita
CBR	California Bearing Ratio
CCR	Centro de Ciências Rurais
CD	Com defloculante
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP(s)	Corpo(s) de Prova(s)
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EI	Energia Intermediária
EM	Energia Modificada
EN	Energia Normal
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
GC	Grau de Compactação
HRB	Highway Research Board
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
L	Laterítico
LA'	Laterítico Arenoso
LG'	Laterítico Argiloso
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MCT-M	Miniatura Compactado Tropical Modificada
MCV	Moisture Condition Value
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MO	Matéria orgânica
NA'	Não Laterítico Arenoso
NG'	Não Laterítico Argiloso
NS'	Não Laterítico Siltoso
NBR	Norma Brasileira Referenciada
Nº, nº	Número
pH	Potencial Hidrogeniônico
PT	Formação Santa Maria – Membro Passo das Tropas
PSI	Perda de suporte de carga por imersão
RS	Jazida Canabarro
RIS	Capacidade de suporte de carga
S	Silte
SC	Formação Rosário do Sul

SD	Sem defloculante
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TA'G'	Transicional Arenoso Argiloso
TR	Travessia Urbana
TRB	Transportation Research Board
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USCS	Unified Soil Classification System

## LISTA DE SÍMBOLOS

### ALFABETO BRASILEIRO

a	Altura inicial do CP
C1, C2	Cargas em kgf
c'	Coeficiente angular da curva Mini-MCV = 10
Ct	Coeficiente de contração das pastilhas
e'	Índice de laterização
E	Coeficiente de expansão
d'	Coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação para 12 golpes
h	Altura inicial de referência do corpo de prova cilíndrico
H <sub>1</sub> , H <sub>2</sub>	Níveis do menisco nos tempos correspondentes
K	Coeficiente de permeabilidade
K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub>	Constantes determinadas experimentalmente
L <sub>i</sub> , L <sub>f</sub>	Leitura inicial e final do CP
L <sub>o</sub>	Comprimento inicial do CP
M <sub>R</sub>	Módulo de deformação resiliente ou módulo de resiliência
P <sub>i</sub>	Perda de massa por imersão
R <sup>2</sup>	Coeficiente de correlação entre variáveis independentes e a variável dependente
S	Coeficiente de sorção
S <sub>b</sub>	Seção interna média da bureta
S <sub>p</sub>	Seção do CP
S <sub>t</sub>	Seção interna do tubo horizontal
t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub>	Tempos correspondentes
t <sub>a</sub>	Tempo de ascensão
v	Velocidade de caminamento de frente de umidade
W <sub>ót</sub>	Umidade ótima
W <sub>cp</sub>	Umidade do corpo de prova seco em estufa

### ALFABETO GREGO

$\Delta h$	Deslocamento vertical máximo
$\gamma_{d_{max}}$	Massa específica aparente seca máxima
$\gamma_s$	Peso específico dos sólidos
$\sigma_1$	Tensão principal axial
$\sigma_2$	Tensão principal
$\sigma_3$	Tensão confinante
$\sigma_d$	Tensão-desvio
$\theta$	Soma das tensões principais



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	20
2.1	CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS TRADICIONAIS	20
2.1.1	<b>Sistema unificado de classificação de solos (USCS)</b>	20
2.1.2	<b>Sistema rodoviário de classificação de solos (TRB)</b>	21
2.2	CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DOS SOLOS (DNER, 1996)	23
2.3	SOLOS TROPICAIS	29
2.3.1	<b>Solos Lateríticos</b>	32
2.3.2	<b>Solos Saprolíticos</b>	32
2.3.3	<b>Solos Transicionais</b>	33
2.4	CLASSIFICAÇÕES PARA SOLOS TROPICAIS	34
2.4.1	<b>Metodologia MCT</b>	35
2.4.2	<b>Classificação MCT (Miniatura, Compactada, Tropical)</b>	37
2.4.3	<b>Classificação MCT-M (Modificado)</b>	39
2.4.4	<b>Método das Pastilhas</b>	40
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	42
3.1	CLIMA E VEGETAÇÃO	43
3.2	GEOLOGIA	43
3.3	GEOTECNIA	45
3.4	GEOMORFOLOGIA	46
3.5	PEDOLOGIA	46
3.6	HIDROGAFIA E HIDROGEOLOGIA	47
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	50
4.1	ETAPA DE GABINETE	50
4.2	ETAPA DE CAMPO	52
4.3	ETAPA DE LABORATÓRIO	58
4.3.1	<b>Análise Química</b>	58
4.3.2	<b>Ensaio de Caracterização</b>	59
4.3.3	<b>Ensaio de Compactação, Índice de Suporte Califórnia e Expansão</b>	60
4.3.4	<b>Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas</b>	61
4.3.5	<b>Classificação MCT</b>	62
4.3.6	<b>Método das Pastilhas</b>	64
4.3.7	<b>Ensaio Complementares da MCT</b>	65
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	74
5.1	ANÁLISE QUÍMICA	74
5.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	75
5.3	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, CBR E EXPANSÃO	80
5.4	CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE	85
5.5	CLASSIFICAÇÃO MCT	91
5.6	CLASSIFICAÇÃO MCT-M	93
5.7	CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA DA MCT	94
5.8	ENSAIOS COMPLEMENTARES DA MCT	95
5.9	COMENTÁRIOS FINAIS	103
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	108
6.1	CONCLUSÕES	108
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO A – MAPA GEOLÓGICO DA FOLHA DE SANTA MARIA .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXO B – CARTA DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS DE SANTA MARIA.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO C – LAUDO QUÍMICO: ALE1, ALE2, BOT1, BOT2, CAT1 e CAT2 .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO D – LAUDO QUÍMICO: PT1, PT2, SC1 e SC2 .....</b>	<b>121</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os solos resultam do intemperismo por desagregação e alteração das rochas. De acordo com Silva et al. (2010), a intensidade dos processos intempéricos está diretamente associada com o material de origem (rocha), o relevo, o clima, os organismos vivos e o tempo. Segundo Machado et al. (2007), os parâmetros físicos de um solo são indicadores do seu comportamento mecânico e estão relacionados às suas propriedades químicas.

A identificação e classificação dos solos são essenciais em quase todos os estudos geotécnicos para a construção de barragens, cortes e aterros, fundações de grandes estruturas e obras viárias. Em projetos de estradas, que se caracterizam por apresentar grandes extensões no sentido longitudinal, os solos encontrados nos subleitos dessas vias, devido às suas peculiaridades físico-químicas e mineralógicas, apresentam em geral comportamento geotécnico bastante diferenciados.

As classificações geotécnicas dos solos mais difundidas no Brasil são: a USCS (Unified Soil Classification System) ou SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), proposta pela ASCE - American Society of Civil Engineers e a TRB (Transportation Research Board), recomendada pela AASHTO - American Association of State Highways and Transportation Officials.

Como ambos os sistemas foram desenvolvidos para serem empregados em países com clima temperado, os profissionais do meio geotécnico brasileiro encontram dificuldades na aplicação dos métodos tradicionais, uma vez que estes não condizem com o verdadeiro comportamento dos solos nas obras, pois o Brasil é um país de clima predominantemente tropical e os solos tropicais apresentam peculiaridades de comportamento mecânico e hídrico que os diferem dos solos das regiões em que as metodologias tradicionais foram desenvolvidas.

Após estudos do comportamento de solos do estado de São Paulo, Nogami e Villibor (1981) propuseram uma nova sistemática de classificação, denominada MCT (Miniatura, Compactada, Tropical), que caracteriza as propriedades e o comportamento mecânico dos solos tropicais, fornecendo dados que podem ser utilizados para a hierarquização e especificações dos materiais, assim como, para a elaboração de projeto final de engenharia.

Esta metodologia permite estabelecer duas principais classes de solos: solos de comportamento laterítico e de comportamento não laterítico. Os solos lateríticos apresentam ótimas propriedades geotécnicas, geralmente no seu estado natural são pouco suscetíveis a erosão e quando compactados adequadamente apresentam elevadas resistências e capacidade de suporte.

Sendo a área geográfica brasileira muito extensa, diversos pesquisadores e técnicos têm-se dedicado ao estudo desses solos e de seu comportamento em pavimentos rodoviários e aeroportuários, taludes, barragens, entre outros. Com base nos trabalhos de Passos et al. (1991) e Bastos e Dias (1993) na região sul, de Vertamatti (1988) na região norte e de Barbosa Filho et al. (1999) e Nobre Junior et al. (1999) na região nordeste, constata-se a adequação da classificação MCT aos solos das demais localidades do país, que apesar de alguns apresentarem características pedológicas diferentes dos solos de São Paulo, também são considerados solos tropicais.

A partir dos diversos estudos, surgiram novas considerações para a sistemática MCT, como a de Vertamatti (1988), que incluiu na classificação MCT os solos transicionais, além de métodos expeditos de classificação, como o Método das Pastilhas, desenvolvido por Nogami e Cozzolino (1985), visando simplificar a determinação do comportamento laterítico dos solos tropicais.

Diante do exposto, buscou-se, nesta pesquisa, estudar os solos e rochas sedimentares da região de Santa Maria/RS através do sistema de classificação MCT, para a obtenção de uma classificação mais adequada destes materiais.

## 1.1 OBJETIVOS

A pesquisa tem por objetivo principal classificar os solos e rochas sedimentares da região de Santa Maria/RS segundo a metodologia MCT, possibilitando a comparação entre os métodos de classificação geotécnica tradicionais e os métodos de classificação para solos tropicais.

Os objetivos específicos do estudo são:

- a) analisar dois perfis típicos de materiais das unidades geotécnicas de Santa Maria/RS;

- b) realizar ensaios complementares de dois solos provenientes de jazidas da região de Santa Maria/RS, estudados por Santos (2016);
- c) classificar os materiais pelos métodos tradicionais, pelas metodologias MCT, MCT-M e pelo método das pastilhas;
- d) analisar o módulo de resiliência dos materiais através do modelo da tensão confinante, da tensão desvio, da soma das tensões e do modelo composto, e realizar a classificação resiliente dos mesmos segundo Preussler e Pinto, pelo método indireto e pela interrelação com a classificação MCT;
- e) realizar os ensaios Mini-Proctor, Mini-CBR, Expansão, Contração, Infiltrabilidade e Permeabilidade, considerados ensaios complementares da MCT.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo é a presente introdução, os objetivos do estudo e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, destacando os aspectos mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, sendo os principais temas: as classificações geotécnicas tradicionais; a classificação resiliente; os solos tropicais e as classificações para solos tropicais.

O Capítulo 3 descreve a área de estudo, no que se refere ao clima e vegetação, a geologia, geotecnia e geomorfologia, a pedologia, e a hidrografia e hidrogeologia da região de Santa Maria/RS.

No Capítulo 4 é descrita a metodologia aplicada no desenvolvimento desta pesquisa, que consiste na definição dos pontos de coleta, no planejamento da pesquisa, estudos sobre o tema e na apresentação dos ensaios laboratoriais e análises realizadas.

No Capítulo 5 são apresentados e confrontados os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais propostos no capítulo anterior. Também são analisadas e discutidas as propriedades físicas, mecânicas e as classificações obtidas para os solos em estudo.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros, considerando-se os aspectos relevantes verificados durante o

desenvolvimento do trabalho. Na sequência, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica de temas pertinentes ao assunto, introduzindo os conceitos que foram e serão mencionados no decorrer do trabalho. Os tópicos abordados serão as classificações geotécnicas tradicionais, a classificação resiliente, os solos tropicais e as classificações geotécnicas para solos tropicais.

### 2.1 CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS TRADICIONAIS

Os sistemas de classificação de solos surgiram devido a diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentada pelos diversos solos, possibilitando o agrupamento em conjuntos distintos, aos quais podem ser atribuídas algumas propriedades.

Sob o ponto de vista de engenharia, a classificação permite prever o comportamento geotécnico dos solos quando submetidos às solicitações mecânicas e hidráulicas decorrentes de carregamentos estruturais e de variações das condições ambientais. Para o uso em pavimentação, Balbo (2007) considera uma classificação ideal aquela que busca relacionar o potencial de um solo quanto a uma dada aplicação em camada de pavimento, a partir de testes de suas propriedades físicas e correlação com o comportamento observado em obras.

Segundo o DNER (1996), as classificações tradicionais de solos, desenvolvidas originalmente em países de clima temperado e posteriormente adotadas no Brasil, são as classificações USCS ou SUCS, proposta pela ASCE e a TRB, recomendada pela AASHTO. Ambas baseadas nas propriedades índices (limites de Atterberg) e na composição granulométrica dos solos.

#### 2.1.1 Sistema unificado de classificação de solos (USCS)

Este sistema foi proposto por Casagrande (1947), com o objetivo de selecionar materiais para pavimentos de aeroportos e tornou-se uma das classificações mais difundidas no Brasil. Descrito pela norma americana D2488-69 (ASTM, 1980), seus parâmetros de classificação referem-se à distribuição granulométrica, à forma da

curva granulométrica, ao limite de liquidez, ao índice de plasticidade e à compressibilidade dos solos.

A Figura 2.1 apresenta a classificação dos solos, onde se identificam duas principais divisões: solos de granulometria grossa (mais de 50% do solo retido na peneira nº 200) e solos de granulometria fina (mais de 50% do passando na peneira nº 200), sendo subdivididas em quinze grupos distintos.

Figura 2.1 - Classificação dos solos (USCS)

<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA:</b> mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA:</b> 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$	ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SILTES e ARGILAS com $LL > 50$	MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.	
Solos Altamente Orgânicos				

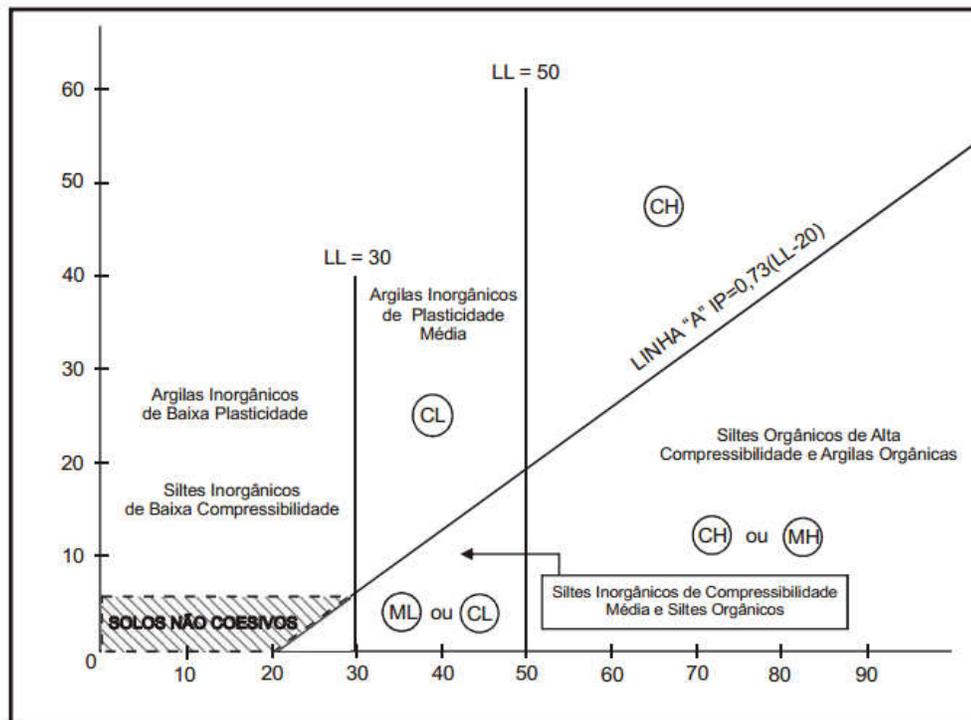
Fonte: DNIT (2006, p.59)

A plasticidade dos solos é definida pelos índices de Atterberg através da correlação apresentada no Gráfico de Plasticidade de Casagrande, pelo diagrama cartesiano da Figura 2.2, no qual o limite de liquidez (LL) está representado nas abcissas e o índice de plasticidade (IP) nas ordenadas.

### 2.1.2 Sistema rodoviário de classificação de solos (TRB)

Dentre os sistemas tradicionais de classificação para fins rodoviários, destaque-se a classificação de solos TRB, descrita pela norma americana D3282-73 (ASTM, 1973).

Figura 2.2 - Gráfico de Plasticidade



Fonte: DNIT (2006, p.60)

Aprovada em 1945, tendo sido aperfeiçoada do antigo sistema Bureau Public Roads Administration, proposto em 1929, tem como pretensão identificar os solos dos subleitos a partir de resultados de ensaios simples como granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade e de prática rotineira nos Departamentos de Estradas dos Estados Unidos.

Este sistema se diferencia do Sistema Unificado ao considerar a diferença entre solos granulares e finos a partir de 35% de percentual passante na peneira nº 200, ao considerar os percentuais passantes das peneiras nº 10 e nº 40 e por não oferecer parâmetros qualitativos de graduação e compressibilidade.

De acordo com o DNIT (2006), os solos são reunidos em grupos e subgrupos em função da granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. A Figura 2.3 apresenta o quadro de classificação, a determinação do grupo do solo é feita por processo de eliminação da esquerda para a direita, sendo a classificação correta o primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir.

Figura 2.3 - Classificação dos solos (TRB)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	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 máx.	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.

Fonte: DNIT (2006, p.56)

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE DOS SOLOS (DNER, 1996)

O termo resiliência define a energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações, ou seja, é a energia potencial de deformação. Segundo Córdova e Guimarães (2011), a deformação resiliente corresponde à parcela recuperável da deformação, que dura enquanto a tensão estiver sendo aplicada e após o término do carregamento esta deixa de existir.

O primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem (MEDINA, 1997). Hveem utilizou o termo deformação resiliente, ao invés de elástica, por entender que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos, como o concreto e o aço.

O referido autor concluiu em seus estudos que, uma vez que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos está ligado à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial o subleito, em decorrência da ação do carregamento cíclico, o método de dimensionamento utilizado para evitar deformações permanentes não impedia que a estrutura rompesse por fadiga.

A partir deste contexto, deu-se origem ao termo módulo de resiliência ( $M_R$ ), o qual caracteriza os materiais utilizados nas diversas camadas do pavimento, incluindo o solo do subleito, sob várias condições como, teor de umidade, massa específica e o estado de tensões, simulando as condições de campo.

Em 1977, tendo como referência o “Special Report 162” do TRB, de 1975, iniciou-se um programa de pesquisas na COPPE/UFRJ, sob a orientação do professor Jacques de Medina, cujos resultados iniciais, apresentados por Preussler (1978) e Svenson (1980), trataram das propriedades resilientes de solos arenosos e argilosos, respectivamente.

De acordo com Medina (1997), o módulo resiliente depende da natureza do solo (condição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina), da umidade, peso específico aparente seco e estado de tensões atuantes. Em seu estudo, Preussler (1978) apresenta as Equações 2.1 e 2.2, citadas por Hicks (1970), que relacionam os módulos resilientes com as tensões principais, sendo esses modelos propostos por Medina (1997) para modelar o comportamento resiliente em solos granulares.

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (2.1)$$

$$M_R = k'_1 \theta^{k'_2} \quad (2.2)$$

Onde:

$M_R$  é o módulo de resiliência;

$\sigma_3$  é a tensão confinante;

$\theta$  é a soma das tensões ( $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$ );

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k'_1$  e  $k'_2$  são os parâmetros dos modelos, determinados no ensaio.

Diversos estudos indicam que o módulo de resiliência de solos não coesivos (areia e pedregulhos), quando submetidos à tensões axiais repetidas, aumenta muito

com a tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e é pouco influenciado pela tensão desvio ( $\sigma_d$ ), desde que esta tensão não cause grandes deformações plásticas (SANTOS, 2016).

Segundo Preussler (1978), o módulo de resiliência do material é influenciado pelo grau de saturação e pelas condições de umidade e densidade de compactação, com o aumento do teor de umidade e a saturação próxima de 100%, o valor do módulo tende a diminuir. As magnitudes destas variações dependem do valor das tensões confinantes ( $\sigma_3$ ), ou seja, com o aumento da umidade de compactação, quanto menor a tensão confinante, menor o valor do módulo de resiliência. Dessa forma, para os materiais estudados pelo autor, quanto maior a tensão confinante menos se faziam sentir os efeitos das condições de compactação nas propriedades resilientes.

Segundo Bernucci et al. (2008), em solos coesivos, o módulo de resiliência reduz com o número de repetições da tensão desvio, uma vez que a deformação resiliente axial depende consideravelmente da tensão desvio aplicada. A intensidade da tensão desvio também influencia fortemente nas deformações elásticas. Em amostras de solo argiloso compactado, o módulo de resiliência decresce rapidamente com o aumento da tensão desvio, para baixos níveis de tensão (SEED et al., 1962).

Para os solos coesivos, Svenson (1980), propôs o modelo expresso pela Equação 2.3.

$$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (2.3)$$

Onde:

$M_R$  é o módulo de resiliência;

$\sigma_d$  é a tensão desvio;

$k_1$  e  $k_2$  são parâmetros do modelo.

Segundo Macêdo (1996), solos que apresentam comportamento composto, dependem tanto da tensão de confinamento quando da tensão desvio aplicada, assim a Equação 2.4 apresenta o modelo a ser utilizado para determinar o módulo de resiliente desses solos.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2.4)$$

Onde:

$M_R$  é o módulo de resiliência;

$\sigma_3$  é a tensão confinante;

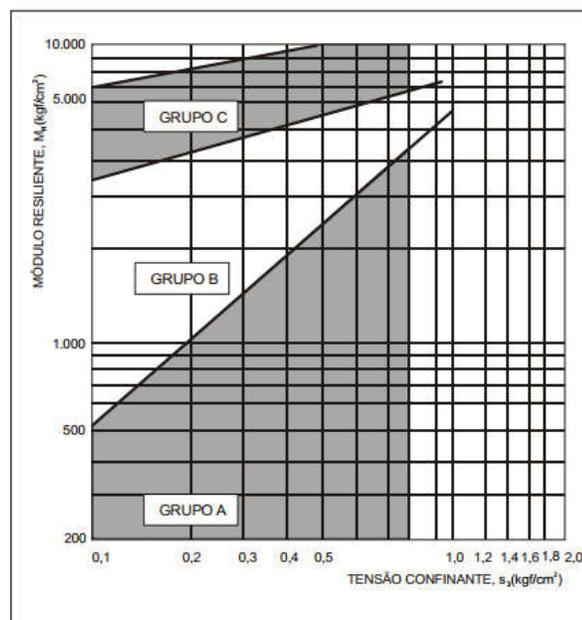
$\sigma_d$  é a tensão desvio;

$k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são parâmetros do modelo.

Descrita pelo DNIT-ME 134/2010, o módulo de resiliência é determinado para caracterização mecânica de materiais utilizados na pavimentação, utilizando o conceito de classificação resiliente de solos para subleito proposto por Preussler e Pinto (1982). A classificação resiliente divide os solos em dois grandes grupos: solos granulares e solos finos, sendo o parâmetro que os diferencia a porcentagem (%) em peso de material passante na peneira de nº 200 (0,075mm).

Os solos granulares são aqueles que apresentam menos que 35% de peso em material passando na peneira nº 200, sendo o módulo de resiliência definido pela Equação 2.1. O comportamento desses solos é separado em três grupos conforme apresentado na Figura 2.4, que ilustra a classificação resiliente dos solos granulares.

Figura 2.4 - Classificação resiliente dos solos granulares

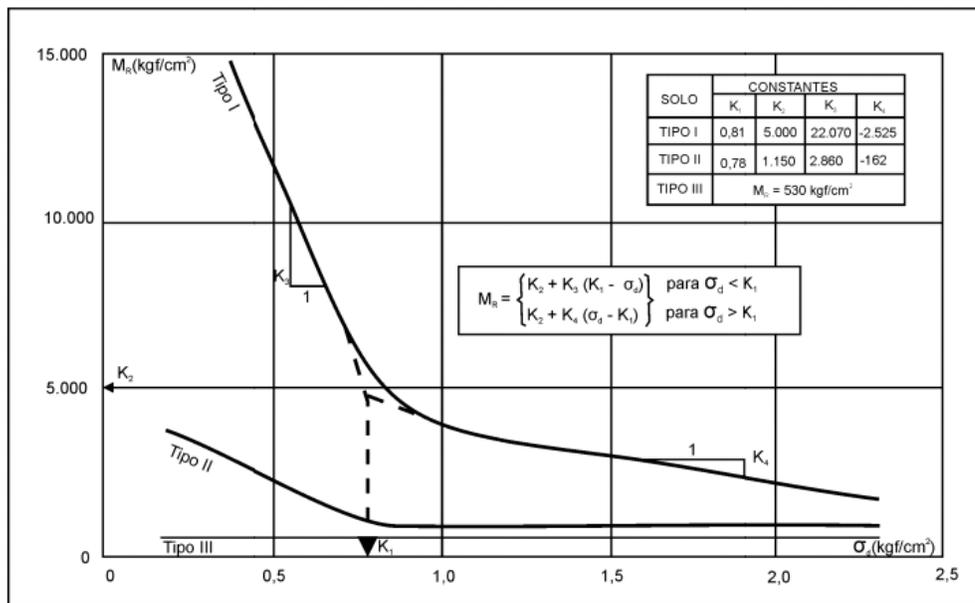


Fonte: DNIT (2006, p.70)

Os solos do Grupo A apresentam grau de resiliência elevado, constituindo subleitos de má qualidade, não sendo recomendados para o uso em estruturas de pavimentos. Os solos pertencentes ao Grupo B têm grau de resiliência intermediário, podem ser utilizados como base, sub-base e reforço de subleito, dependendo dos valores de  $K_2$ , que quando maior que 0,50, dependerá da espessura da camada e da qualidade do subleito para apresentar um bom comportamento. E por fim, o Grupo C representa os solos com baixo grau de resiliência, que podem ser empregados em todas as camadas do pavimento, proporcionando estruturas com baixas deflexões.

No que se refere aos solos finos, estes apresentam mais de 35% em peso de material que passa pela peneira nº 200 e são classificados como solos do Tipo I, II e III, conforme ilustrado na Figura 2.5 Os módulos de resiliência são definidos pelos modelos matemáticos propostos por Preussler e Pinto (1982) e apresentados no Manual do DNIT (2006).

Figura 2.5 - Classificação resiliente dos solos finos



Fonte: DNIT (2006, p.73)

Os solos classificados como Tipo I apresentam bom comportamento quanto à resiliência, podendo ser utilizados como subleito, reforço do subleito e camada de sub-base. Os solos do Tipo II têm um comportamento regular quando empregados como

subleito e reforço do subleito. Já os solos do Tipo III, não devem ser utilizados em camadas do pavimento e requerem estudos especiais para emprego em subleitos.

Na impossibilidade de determinar o  $M_R$  pelo método acima, o Manual do DNIT (2006) permite estimar a classificação resiliente através de um método indireto (Figura 2.6), que correlaciona a percentagem de silte (S%) e o CBR.

Figura 2.6 - Classificação resiliente dos solos finos (método indireto)

CBR	S%		
	$\leq 35$	35 - 65	$\geq 65$
$\leq 5$	III	III	III
6 - 9	II	II	III
$\geq 10$	I	II	III

Fonte: DNIT (2006, p.72)

O mesmo manual também apresenta uma interrelação entre o  $M_R$  e os grupos classificatórios MCT (Figura 2.7), baseada nos estudos realizados pelo IPR/DNER com 355 amostras de solos tropicais.

Figura 2.7 - Interrelação entre a classificação MCT e a resiliente

MCT	Resiliente	Predominância	Comportamento
NA	III	III	grau de resiliência alto
LA	III	III	grau de resiliência alto
NA'	II - III	II	grau de resiliência médio e alto
NS'	II - III	II	grau de resiliência médio a alto
NG'	II - I	II	grau de resiliência médio a baixo
LA'	II - I	II - I	grau de resiliência médio a baixo
LG'	I - II	I	grau de resiliência baixo

Fonte: DNIT (2006, p.75)

Vertamatti (1988) relata que, à medida que novas considerações sobre as propriedades resilientes dos materiais foram surgindo, tornou-se possível destacar as marcantes diferenças de comportamento entre solos tropicais lateríticos e saprolíticos.

Em estudos realizados com solos lateríticos, Franzoi (1990) relata que, independente das peculiaridades granulométricas, as argilas lateríticas apresentaram valores de módulo de resiliência tão elevados quanto os solos arenosos lateríticos.

Passos (2000) observou em seus estudos que, as argilas lateríticas apresentaram comportamento granular nos ensaios de carregamento cíclico para a determinação do módulo resiliente e que não houve uma variação clara do módulo em relação a tensão desvio.

De acordo com Balbo (2007), para os solos do estado de São Paulo, o comportamento resiliente dos solos lateríticos tende a ser superior ao dos não lateríticos. As argilas lateríticas da capital paulista e de regiões de solos com alterações de basalto, que ocorrem também no Rio Grande de Sul, estudadas pelo referido autor, possuem elevado módulo de resiliência, geralmente acima de 200 MPa.

### 2.3 SOLOS TROPICAIS

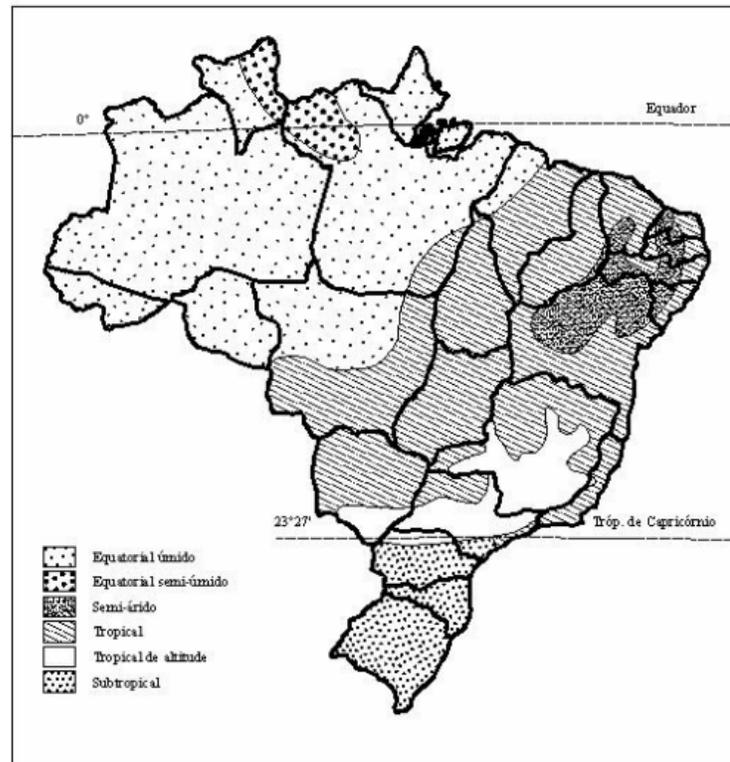
Segundo Barroso (2002), não existe uma terminologia consagrada para a definição do que são solos tropicais. Para o autor, as características de um solo são determinadas em função do clima, topografia, fauna e do tempo. Sendo as principais características das regiões de clima tropical as altas temperaturas, altos índices pluviométricos, ausência de congelamento do subsolo, entre outros.

Em 1996, Nogami descreveu os solos tropicais segundo a conceituação astronômica, na qual a zona tropical é compreendida entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio, conforme ilustrado na Figura 2.8.

Entretanto, para Barroso (2002) essa definição não é suficiente, porque podem ser encontrados solos com diferentes características entre os trópicos, em função das diferentes condições geológicas e climáticas a que estão submetidos.

A conceituação climática que, de forma racional e genérica, conceitua os solos tropicais como sendo aqueles que ocorrem em áreas de clima quente e úmidos, também apresenta falhas, pois solos diferentes poderiam ser enquadrados em uma mesma classe, já que alguns tipos de solos se formam independente do clima ser tropical ou não, tendo como exemplos os solos de dunas, de tálus e aluviais.

Figura 2.8 - Mapa climático brasileiro



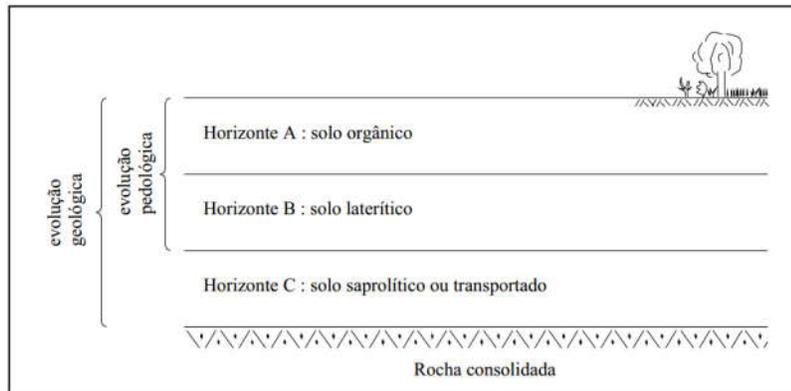
Fonte: Conti e Furlan (2001)

Portanto, a maneira mais adequada para definir os solos tropicais é através da conceituação geotécnica, que os descreve como aqueles que apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamento, que os diferenciam dos solos formados em ambientes não tropicais, em decorrência da atuação de processos geológicos e/ou pedológicos desencadeados pela ação alternada de temperaturas elevadas e chuvas intensas, conforme exposto pelo Committee on Tropical Soils of ISSMFE – International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (1985).

Sendo assim, para que um solo seja considerado tropical não basta simplesmente que tenha sido formado na faixa astronômica tropical ou em região de clima tropical úmido, é indispensável que possua peculiaridades de interesse geotécnico.

A Figura 2.9 apresenta um perfil esquemático de solo típico das regiões tropicais, que sofreu ações dos processos geológicos e pedológicos.

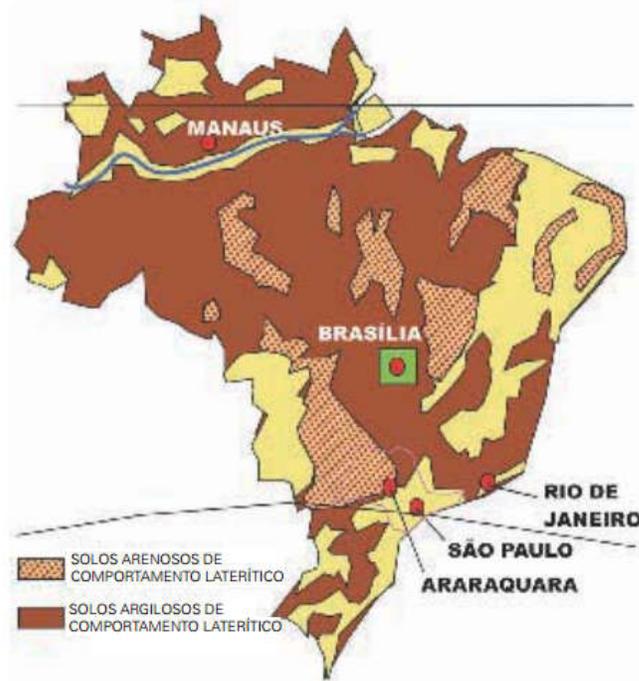
Figura 2.9 - Perfil esquemático do solo tropical típico



Fonte: Vertamatti (1994)

Nogami e Villibor (1995) separam estes solos em duas grandes classes, solos de comportamento laterítico e solos de comportamento não laterítico. A Figura 2.10 ilustra as áreas de ocorrência de solos de comportamento laterítico no Brasil.

Figura 2.10 - Ocorrência de solos de comportamento laterítico no território brasileiro



Fonte: Villibor et al. (2009, p.22)

### **2.3.1 Solos Lateríticos**

Os solos lateríticos são superficiais, resultantes da transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. Com relação a sua coloração, predominam os matizes vermelho e amarelo, com espessuras que podem atingir mais de dois metros, porém dificilmente ultrapassam dez metros.

Segundo Godoy e Bernucci (2000), a principal peculiaridade dos solos tropicais lateríticos, que os diferencia dos solos de clima temperado, é a presença de uma cimentação natural causada pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Em geral, estes solos apresentam CBR relativamente alto e expansão baixa, assim como, limite de liquidez, índice de plasticidade e módulo de resiliência, elevados.

Santana e Gontijo (1987) acrescentam que, estes podem apresentar contração elevada quando secos e possuem aglomeração bem desenvolvida, tornando-os permeáveis e resistentes a erosão.

Para Godoy e Bernucci (2000), na engenharia rodoviária, os solos lateríticos são aqueles que quando devidamente compactados, ao perderem umidade adquirem condição de baixa perda de resistência ou até nenhuma perda, mesmo na presença posterior de água, apresentando em estado natural, menor susceptibilidade à erosão, quanto maior for o grau de laterização.

Portanto, a distinção deste tipo de solo é de fundamental interesse no meio geotécnico, uma vez que os solos de comportamento laterítico constituem uma preciosa fonte de matéria prima em obras de terra e pavimentação, podendo ser utilizadas em aterros, proteção de taludes contra erosão, estruturas de pavimentos como reforços de subleito, sub-bases e bases (GODOY E BERNUCCI, 2002).

### **2.3.2 Solos Saprólíticos**

O Committee on Tropical Soils of ISSMFE (1985) descreve os solos saprólíticos como sendo resultantes da decomposição e/ou desagregação "in situ" da rocha matriz pela ação das intempéries (chuvas, insolação, geadas), mantendo ainda de maneira nítida a estrutura da rocha que lhe deu origem. São, portanto, solos genuinamente residuais, que constituem, em suas condições naturais, a parte subjacente à camada

de solo superficial (lateríticos), aparecendo somente na superfície do terreno através de obras executadas pelo homem ou erosões.

Apresentam-se em camadas de espessuras variadas, atingindo frequentemente várias dezenas de metros, são bastante heterogêneos, de cores variadas, cuja aparência macroscópica é em geral caracterizada pela presença de manchas, xistosidades, vazios, etc.

De acordo com a rocha de origem, este solo pode variar de extremamente plástico até não plástico e de altamente expansivo, quando encharcado, até muito contrátil, quando seco. Geralmente apresentam valores de CBR e módulo de resiliências baixos, sendo bastante erodíveis.

Nogami e Villibor (1995) acrescentam que, solos saprolíticos siltosos, micáceos e/ou caoliníticos ou arenosos micáceos, normalmente, possuem valor de suporte abaixo dos previstos pelos índices e classificações tradicionais. Sendo o valor da expansão relativamente alto, devido aos baixos valores de limite de liquidez e índice de plasticidade. Na fração areia, a presença de mica pode mudar o comportamento do solo, e na fração silte, uma elevada concentração desse mineral torna-o muito expansivo, tanto na molhagem quanto na secagem.

### **2.3.3 Solos Transicionais**

Esta denominação visa classificar os solos que cobrem as formações sedimentares no Brasil e que se diferem dos solos lateríticos muito evoluídos e saprolíticos, por apresentarem peculiaridades geotécnicas.

Vertamatti (1988) denomina de transicionais os solos transportados, geralmente coluvionares, ou que não foram muito afetados pelos processos pedogênicos. A partir de estudos dos solos plínticos da Amazônia, o referido autor propôs a introdução dos solos transicionais na classificação MCT, os quais se posicionam na faixa central do ábaco, evidenciando o caráter de transição no processo de evolução genética dos solos tropicais.

Estes solos apresentam perfis bastante homogêneos no que se refere à cor e estrutura, sendo formados por minerais que não foram totalmente intemperizados. Suas características geotécnicas variam em função do grau de laterização, quanto mais evoluído geneticamente, melhor o comportamento esperado, necessitando estudos apropriados para que possam ser empregados em pavimentação.

## 2.4 CLASSIFICAÇÕES PARA SOLOS TROPICAIS

O emprego dos solos tropicais como material de construção rodoviária, segundo Nogami e Villibor (1995), teve início na década de 30, a partir da introdução da Mecânica dos Solos.

No entanto, devido as peculiaridades geológicas e geotécnicas desses solos, mencionadas no tópico anterior, a aplicação das classificações tradicionais é restrita e a hierarquização dos solos a serem utilizados em pavimentação não correspondem ao real desempenho dos mesmos nas obras, conforme consta nos estudos de Silva et al (1950).

Segundo Nogami e Villibor (1994a), a variação dos valores das propriedades índices nos solos lateríticos conforme a destruição dos torrões, a impossibilidade de determinar através do gráfico de plasticidade o comportamento laterítico ou não laterítico de um solo e a modificação dos valores do limite de liquidez dos solos saprolíticos, quando estes são compostos por mica e macrocristais, são algumas deficiências encontradas ao classificar estes solos utilizando os índices de Atterberg.

Conforme demonstrado por Fortes et al. (2002), solos considerados inapropriados pelos critérios tradicionais, classificados no grupo A-7-5 pela classificação TRB, quando adequadamente compactados, podem apresentar um ótimo comportamento como subleito (caso laterítico), assim como, os solos do grupo A-4 (lateríticos) que podem ser utilizados em bases de pavimentos.

Diversos estudos baseados nas classificações e propriedades dos solos tropicais constataam o exposto por Abitante (1997), que o estudo da pedogênese dos solos tropicais e subtropicais orienta e corrige os erros decorrentes da utilização dos sistemas tradicionais de estudo e classificação, possibilitando ainda a utilização de materiais, até então pouco aceitos, como opção em pavimentos rodoviários, em especial os destinados ao pavimento de baixo volume de tráfego.

Com a finalidade de aprimorar a identificação e caracterização desses solos, surge na década de 80, um novo sistema de classificação denominado MCT (Miniatura, Compactada, Tropical), o qual possibilitou uma classificação mais adequada para os solos das regiões de clima tropical, passando a ser considerado o Sistema Brasileiro de Classificação Geotécnica dos Solos.

## 2.4.1 Metodologia MCT

Desenvolvida por Nogami e Villibor (1995), a denominação MCT provém da utilização de amostras compactadas de dimensões reduzidas (corpos de prova com 50 mm de diâmetro) e da destinação específica para os solos tropicais. As dimensões limitam sua aplicação a solos de granulação fina, que passam integralmente na peneira nº 10 (abertura de 2 mm) ou que possuam percentagem de até 5% de grãos que ficam retidos nesta peneira.

Esta metodologia é composta por uma série de ensaios que permitem avaliar as propriedades fundamentais dos solos. Conforme Nogami e Villibor (1995), a Figura 2.11 apresenta as propriedades dos ensaios, a utilização dos grupos de solos da MCT na pavimentação e, também, correlaciona as classificações geotécnicas tradicionais com a classificação MCT.

Figura 2.11 - Propriedades e utilização dos grupos de solos MCT

GRANULOMETRIAS TÍPICAS		Argilas,	Areias	Siltos (k,m),	Argilas,	Areias	Areias	Argilas,	
Designações do T1-71 do DER SP (equivalentes da Mississippi River Commission, USA) k=caolinitico; m=micáceo; s=sericitico; q=quartzoso		Siltos (q,s)	siltosas	e Siltos arenosos	Argilas arenosas, Argilas siltosas, Siltos argilosos	siltosas	argilosas	Argilas, Argilas arenosas, Argilas siltosas, Siltos argilosos	
COMPORTAMENTO		N = Não Laterítico				L = Laterítico			
GRUPO MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'	
Propriedades	MINI-CBR (%)	Sem Imersão	M,E	E	M,E	E	E	E,EE	E
		Perda por imersão	B,M	B	E	E	B	B	B
	EXPANSÃO		B	B	E	M,E	B	B	B
	CONTRAÇÃO		B	B,M	M	M,E	B	B,M	M,E
	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (k)		M,E	B	B,M	B,M	B,M	B	B
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)		E	B,M	E	M,E	B	B	B
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima de energia normal		EE=Muito elevado (a); E=Elevado (a); M=Médio (a); B=Baixo (a)							
Utilização	Base de pavimento		n	4°	n	n	2°	1°	3°
	Reforço do subleito compactado		4°	5°	n	n	2°	1°	3°
	Subleito compactado		4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
	Aterro (corpo) compactado		4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
	Proteção à erosão		n	3°	n	n	n	2°	1°
	Revestimento primário		5°	3°	n	n	4°	1°	2°
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
		AASHO	A-2	A-2; A-4; A-7	A-4; A-5; A-7-5	A-6; A-7-5	A-2	A-2; A-4	A-6; A-7-5

Fonte: Nogami e Villibor (1995)

Os valores numéricos dessas propriedades são apresentados na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Valores numéricos das propriedades

Propriedade	Valor		Propriedade	Valor	
Suporte Mini-CBR (%) c/ sobrecarga padrão	Muito elevado	> 30	Perda de Suporte Mini-CBR por Imersão (%)	Elevado	> 70
	Elevado	12 a 30		Médio	40 a 70
	Médio	4 a 12		Baixo	< 40
Expansão (%)	Baixo	< 4	Contração (%)	Elevado	> 3
	Elevado	> 3		Médio	0,5 a 3
	Médio	0,5 a 3		Baixo	< 0,5
Coeficiente de sorção - log s	Baixo	< 0,5	Coeficiente de permeabilidade - log k	Elevado	> (-3)
	Elevado	> (-1)		Médio	(-3) a (-6)
	Médio	(-1) a (-2)		Baixo	< (-6)
	Baixo	< (-2)			

Fonte: Autora, adaptado de Nogami e Villibor (2009, pg.56)

Os ensaios da metodologia MCT são descritos a seguir, de maneira resumida, conforme exposto em Villibor et al (2000):

- **Ensaio de Compactação Mini-Proctor:** é fixada uma energia de compactação, compactando os corpos de prova com diferentes teores de umidade. Através desse ensaio determina-se o teor ótimo de umidade e massa específica aparente máxima do material;
- **Ensaio de Compactação Mini-MCV:** são aplicadas energias crescentes, até conseguir um aumento sensível de densidade para vários teores de umidade, obtendo-se uma família de curvas de compactação. Através da curva correspondente ao Mini-MCV igual a 10, obtém-se o valor de  $c'$ , utilizado para a classificação MCT. Este ensaio pode ser utilizado também no controle da compactação e na previsão da erodibilidade;
- **Ensaio de Perda de Massa por Imersão:** distingue os solos tropicais com comportamento laterítico daqueles com comportamento não laterítico. Utilizado para a classificação MCT, sendo empregado para o cálculo do coeficiente  $e'$ .
- **Ensaio Mini-CBR:** aliado aos ensaios de Expansão e Contração, é utilizado para o dimensionamento de pavimentos e a escolha de solos para reforço do subleito, sub-bases, bases e acostamentos. Pode ser realizado com ou sem imersão e com ou sem sobrecarga padrão, dependendo da finalidade do solo ensaiado;
- **Ensaio de Expansão:** determina os valores de expansão dos argilo-minerais constituintes dos solos finos, hierarquizando os solos para diversos usos em pavimentação;

- **Ensaio de Contração:** verifica a contração intencional ou não durante a fase construtiva e vida útil do pavimento, no intuito de evitar trincas no revestimento. As informações geradas são relativas ao estado e ao comportamento de um pavimento após o período de cura ou secagem;
- **Ensaio de Infiltrabilidade:** mede a velocidade e a quantidade de água que penetra em camadas de solo por ascensão capilar;
- **Ensaio de Permeabilidade:** é utilizado para cálculos de escoamento de água em meio saturado;
- **Ensaio de Penetração da Imprimadura Betuminosa:** determina a espessura e a quantidade de material betuminoso penetrado;
- **Ensaio Mini-CBR de Campo:** determina a capacidade real de suporte através do ensaio de penetração in situ.

Com o enfoque de reproduzir as condições reais de camadas de solos tropicais compactados, aferindo propriedades geotécnicas que espelham o comportamento “in situ” desses solos, os parâmetros encontrados possibilitam dimensionar pavimentos e escolher solos em obras de engenharia rodoviária.

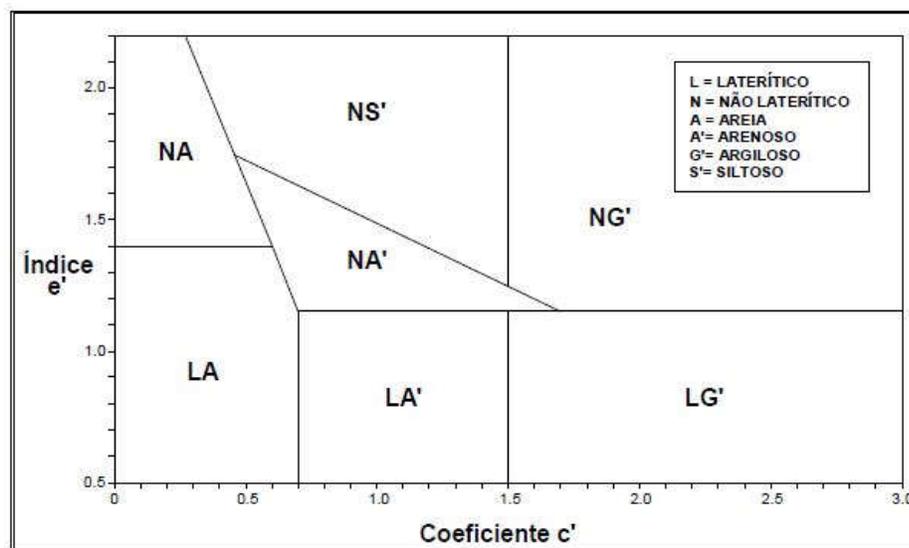
#### **2.4.2 Classificação MCT (Miniatura, Compactada, Tropical)**

Para a classificação MCT dos solos, Nogami e Villibor (1981) agruparam os solos tropicais em duas classes principais: solos de comportamento laterítico (L) e solos de comportamento não laterítico (N). Essas classes são subdivididas em sete grupos, ilustrados no ábaco da Figura 2.13 e descritos por Nogami e Villibor (1995):

- **LA (Areias lateríticas):** areias com poucos finos, de comportamento laterítico, típicas do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente como areias quartzosas e regosolos;
- **LA' (Solos arenosos lateríticos):** solos arenosos, constituintes do horizonte B dos solos conhecidos como latossolos arenosos e solos podzólicos arenosos (textura média). Apresentam matizes vermelho e amarelo, dão cortes firmes (pouco ou não erodíveis), nitidamente trincados, quando expostos as intempéries;

- **LG' (Solos argilosos lateríticos):** argilas e argilas arenosas, que constituem o horizonte B dos solos conhecidos como latossolos, podzóico e terras roxas estruturadas. Quando apresentam percentagem de areia elevada, tem um comportamento semelhante aos solos do grupo LA';
- **NA (Areias não lateríticas):** areias, siltes e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos de quartzo e/ou mica;
- **NA' (Solos arenosos não lateríticos):** misturas de areia quartzosas com finos passando na peneira nº 200. Solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo como granitos, arenitos e quartzitos impuros;
- **NS' (Solos siltosos não lateríticos):** solos saprolíticos silto-arenosos resultantes do intemperismo tropical nas rochas eruptivas e metamórficas, de constituição feldspática-micácea-quartzosa;
- **NG' (Solos argilosos não lateríticos):** solos saprolíticos argilosos originados de rochas sedimentares argilosas ou cristalinas pobres em quartzo. Solos superficiais pedogenéticos não lateríticos, os vertissolos, e solos transportados.

Figura 2.13 - Gráfico da classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (1981)

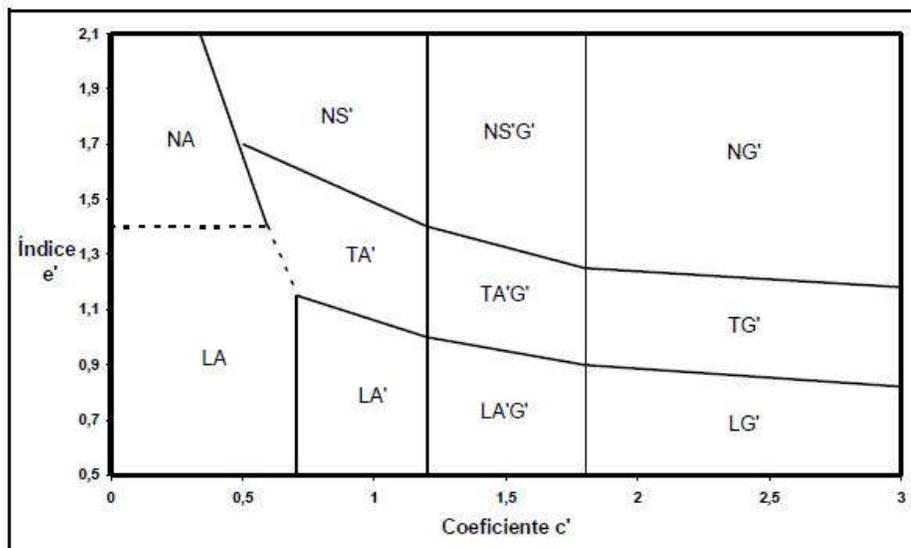
A distribuição dos tipos de solos no ábaco se dá através da relação dos índices  $c'$  e  $e'$ , estando o primeiro associado à argilosidade do solo e o segundo ao caráter laterítico. Estes índices são obtidos a partir do ensaio Mini-MCV (DNER-ME 258/94) e do ensaio de Perda de Massa por Imersão (DNER-ME 256/94), respectivamente.

### 2.4.3 Classificação MCT-M (Modificado)

Com base no estudo dos solos plínticos da Amazônia, Vertamatti (1988) apresentou um novo ábaco denominado MCT-M (M de modificado), o qual inclui o grupo de solos transicionais (T) na classificação MCT, esses solos ocupam a faixa intermediária entre os solos que apresentam comportamento laterítico e não laterítico, conforme ilustrado na Figura 2.14.

Conforme recomendações do autor, para a determinação do parâmetro  $P_i$ , a massa desprendida deve ser multiplicada por uma constante adicional em função da forma de desagregação do solo:  $0,25 \times P_i$  (queda do bloco maciço);  $0,5 \times P_i$  (queda parcial do bloco ou queda quando o bloco apresenta fissuras) e  $0,75 \times P_i$  (queda fragmentada).

Figura 2.14 - Ábaco da classificação MCT-M



Fonte: Vertamatti (1988)

## 2.4.4 Método das Pastilhas

Proposto por Nogami e Villibor (1994b), este método visa simplificar os procedimentos dos ensaios de classificação de solos tropicais, avaliando as propriedades dos solos através de ensaios com menor quantidade de amostra.

Os corpos de prova são moldados na forma de pastilhas em anéis de aço com 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura, o ensaio consiste na determinação da contração ( $C_t$ ) e da penetração (consistência) dos solos, sendo o valor de  $C_t$  correlacionado com o coeficiente  $c'$  da classificação MCT, através das Equações 2.5 e 2.6. O gráfico da Figura 2.15 ilustra o ábaco classificatório.

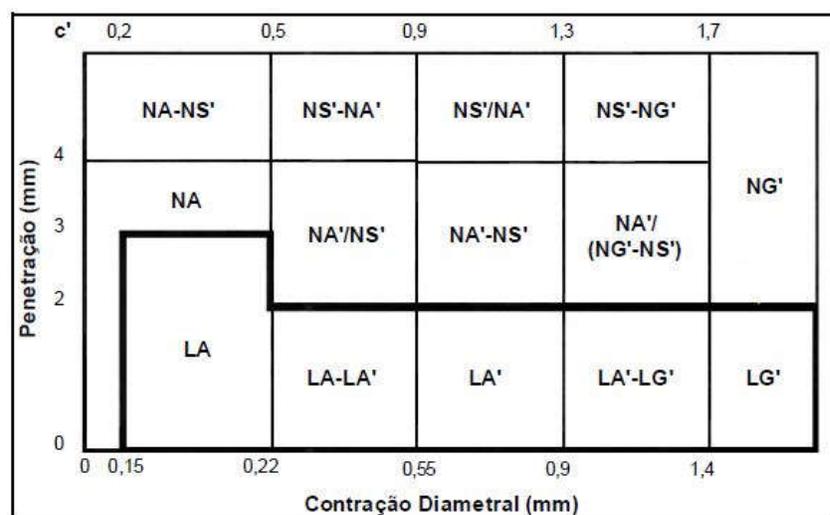
**Para valores de contração entre 0,1 e 0,5 mm:**

$$c' = \frac{\log_{10} C_t + 1}{0,904} \quad (2.5)$$

**Para valores de contração maiores ou iguais a 0,6 mm:**

$$c' = \frac{\log_{10} C_t + 0,7}{0,5} \quad (2.6)$$

Figura 2.15 - Gráfico da classificação MCT pelo Método das Pastilhas



Fonte: Nogami et al. (1996)

O símbolo “-“ separa duas opções de tipo de solos diferentes de maneira equivalente, e o símbolo “/” separa opções de solos de maneira decrescente.

Cabe ressaltar que, Godoy e Bernucci (2002) propuseram modificações neste método, alterando as dimensões das pastilhas para 35 mm de diâmetro e 10 mm de altura, com o objetivo de quantificar o fenômeno de irreversibilidade adquirida, total ou parcial, dos solos lateríticos.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo são descritas as características físicas da região em estudo, o clima e vegetação, a geologia, geotecnia e geomorfologia, a pedologia, e a hidrografia e hidrogeologia da região de Santa Maria/RS.

Afastada aproximadamente 290 km da capital do estado Porto Alegre, a cidade de Santa Maria situa-se no centro geográfico do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 53°19'32" e 54°19'32" longitude oeste, e 29°20'28" e 30°00'16" latitude sul.

O município possui uma altitude média de 113 m em relação ao nível do mar, uma área de aproximadamente 1.780 km<sup>2</sup> e, segundo estimativa do IBGE (2015), 276.108 mil habitantes, sendo que, cerca de 95% da população concentra-se na zona urbana.

A Figura 3.1 ilustra o mapa do estado do Rio Grande do Sul com a localização do município de Santa Maria e a localização do estado no mapa do Brasil.

Figura 3.1 - Mapa do Rio Grande do Sul



Fonte: Wikipédia (Acesso em: 26/10/2016)

### 3.1 CLIMA E VEGETAÇÃO

De acordo com Barros Sartori (1979), o clima do município de Santa Maria é subtropical e possui temperaturas médias anuais de aproximadamente 22°C. Apresenta características climáticas bem definidas com relação às quatro estações do ano, ocorrendo o período mais seco nos meses de novembro e dezembro, e o período chuvoso nos meses de maio, junho e setembro, com uma precipitação média anual de 1769 mm, segundo o Mapa Hidrogeológico da folha de Santa Maria, de 1994.

Segundo Maciel Filho (1977), a região é constituída, principalmente, por uma cobertura vegetal rasteira do tipo savana, sendo a vegetação arbórea encontrada em abundância na região do rebordo do planalto e nos vales profundos.

### 3.2 GEOLOGIA

A região de Santa Maria é formada por rochas sedimentares e rochas de origem vulcânica em menor quantidade, devido aos derrames sucessivos de lavas, tendo sido respectivamente formadas no período Triássico e Mesozóico.

As rochas sedimentares representam os vários ciclos deposicionais em área continental, com variações definidas pelas diferentes fácies nas sequencias de mesma idade e por trocas climáticas nas sequencias de idades diferentes (OLIVEIRA, 2004). A coluna estratigráfica, proposta por Bortoluzzi (1974), separou as rochas da região de Santa Maria nas seguintes Formações:

- **Formação Rosário do Sul:** rochas sedimentares de origem fluvial, constituídas por arenitos finos a médios, com alta porcentagem de silte e argila. São quartzosos, com um pouco de feldspato e mica, e intercalações de siltitos arenosos e argilosos. A estratificação é cruzada, acanalada ou paralela, possui pouca expressão na área de estudo;
- **Formação Santa Maria:** ocupa a maior área no perímetro urbano de Santa Maria (aprox. 6230 ha). É dividida em membro Passo das Tropas e Alemoa.
  - **Passo das Tropas:** segundo Bortoluzzi (1974), é o membro inferior da formação. De origem fluvial e coloração rosada, é composta de arenito basal, grosseiro, feldspático, poroso, podendo apresentar quartzo e argila. Geralmente é bem estratificado e pode apresentar aspecto maciço em alguns pontos;

- **Alemoa:** é o membro superior da Formação Santa Maria. Com exceção de arenito basal, é constituída por siltitos argilosos maciços e arenitos argilosos, apresentam mica e concreções calcíferas irregulares. Montmorilonita é a argila mais comum;
- **Formação Caturrita:** formada por camadas de arenitos finos a médios, apresenta cor rosa a cinza claro, é composta por quartzo e algumas partes por feldspato, intercaladas por camadas de siltitos de espessura menor e cor avermelhada. As argilas mais comuns encontradas são as montmorilonitas e ilitas;
- **Formação Botucatu:** constituída por arenitos finos a médios, com percentagem reduzida de silte e argila, sua estratificação é cruzada de grande porte. A porção superior apresenta sedimentação eólica, sendo composta por arenitos quartzosos contendo feldspato alterados cimentados por sílica ou óxido de ferro;
- **Formação Serra Geral:** formada por duas sequências vulcânicas, uma básica e outra ácida, sendo os derrames básicos formados por basaltos com intercalações de arenitos eólicos e os derrames ácidos por vitrófiros e granófiros, tem como exemplos os basaltos, diabásio e riólito.

Os depósitos coluvionares, formados pela ação da gravidade, estão logo abaixo das escarpas naturais do arenito silicificado intertrapes e das camadas superiores de arenito Botucatu, próximos as rochas vulcânicas. Apresentam variados tamanhos, sendo formados por blocos de basaltos e de arenito, imersos ou emergentes de uma massa de solo com matéria orgânica.

Os depósitos fluviais de várzeas ocorrem por causa das grandes quantidades de areia fornecida pelos rios Arenal e Vacacaí, sendo os mais recentes os depósitos fluviais do Cadena e do Vacacaí-Mirim. Os depósitos do rio Cadena são compostos por sedimentos arenosos e argilosos, de cor cinza e espessura variando de 3 a 5 m, suas aluviões recobrem as Formações Caturrita, Santa Maria e Rosário do Sul. E os depósitos do rio Vacacaí-Mirim são compostos por areia fina com cascalho e às vezes silte, com espessura em torno de 7 m e suas aluviões recobrem as Formações Caturrita e Santa Maria. O Mapa Geológico da folha de Santa Maria/RS encontra-se no Anexo A deste trabalho.

### 3.3 GEOTECNIA

O mapeamento geotécnico baseado na geologia é de grande importância para o planejamento do uso do solo, projetos, construções e manutenções. Em 1990, Maciel Filho apresentou a Carta das Unidades Geotécnicas, ilustrada no Anexo B, tendo como base a coluna estratigráfica proposta por Bortoluzzi (1974). As principais características geotécnicas das unidades de Santa Maria, expostas por Maciel Filho (1990), são:

- **Formação Rosário do Sul:** escavabilidade irregular, profundidade média em torno de 5 a 8 m. Condições de suporte médias a boas. Os cortes abertos em arenito possuem boas condições de estabilidade, diminuindo na presença de siltitos devido a desagregação superficial;
- **Formação Santa Maria/Passo das Tropas:** fácil de escavar, é o melhor material para compactação quando o solo sofreu cimentação por óxidos de ferro;
- **Formação Santa Maria/Alemoa:** muito resistente, é classificada como rocha evolutiva ou solo pré-adensado. Apresenta baixa resistência a erosão e quando sem vegetação formam-se ravinas que se aprofundam com rapidez;
- **Formação Caturrita:** classificada como branda ou solo sobreconsolidado, possui baixa resistência à erosão, progredimento quando o solo superficial é retirado. As camadas arenosas espessas não apresentam problemas quando usadas em fundações, desde que seja na profundidade adequada da capacidade de carga;
- **Formação Botucatu:** apresenta comportamento e resistência a escavação variáveis, a resistência à erosão das partes litificadas é alta, ao contrário das partes alteradas e do solo residual arenoso. Possui boa capacidade de suporte como subleito e para abertura de túneis;
  - **Formação Serra Geral:** quando são, o basalto e o riólito comportam-se como rocha dura. Não apresentam problemas quando empregados em fundações, seus taludes são estáveis, não sendo indicada para absorção de esgotos por sumidouros, por causa da baixa permeabilidade do solo residual e alta permeabilidade das fraturas;

### 3.4 GEOMORFOLOGIA

Situada junto ao rebordo do Planalto Meridional Brasileiro, denominado Serra Geral, Santa Maria apresenta três feições distintas de relevo. A primeira é das planícies aluviais, modeladas em sedimentos quaternários, apresentam altitudes de várzea em torno de 40 a 60 m, a topografia é plana e sujeita a inundações.

As coxilhas, segunda feição, fazem parte da Depressão Central Gaúcha juntamente com as planícies aluviais. É modelada em rochas sedimentares triássicas, com uma topografia suavemente ondulada, constituindo colinas alongadas, com amplitude entre 70 e 160 m, representam área de degradação.

Segundo Pinheiro et al. (2002), através da unidade geomorfológica Serra Geral ocorre a transição da Depressão para o Planalto. Nesta unidade são encontrados declives superiores a 15% e as altitudes das encostas variam entre 120 a 470 m. O substrato rochoso é constituído pelas Formações Caturrita, Botucatu e Serra Geral, sendo esta a terceira feição, modelada em rochas vulcânicas, apresentando elevações de topo aplainado e patamares nas encostas.

### 3.5 PEDOLOGIA

A topografia e a litologia de Santa Maria influenciam na espessura do solo, solos mais espessos são encontrados em locais mais baixos, principalmente nas áreas de baixada onde o nível freático está quase aflorando, assim como, solos profundos são identificados em zonas mais arenosas e solos rasos em zonas argilosas.

Maciel Filho (1977) descreve os solos superficiais da Formação Rosário do Sul como aqueles que apresentam espessura entre 60 cm a 1 m, variando em função da permeabilidade da rocha e do relevo. Sendo os mais profundos do tipo podzólico vermelho amarelo e os mais rasos, podzólico bruno acinzentado.

Segundo o referido autor, o solo da Formação Santa Maria/Passo das Tropas apresenta espessura entre 2 a 3 m, sendo considerada profunda. O tipo do solo é podzólico vermelho amarelo, um solo arenoso que possui boa quantidade de argila em subsuperfície.

O solo da Formação Santa Maria/Alema é geralmente raso, em torno de 50 cm, sendo um pouco mais profundo quando está sobre as camadas de arenito argiloso

ou siltito argiloso. Possui baixa permeabilidade e é do tipo podzólico bruno acinzentado.

Também classificado como podzólico bruno acinzentado, porém com uma predominância de solos arenosos, os solos sobre a Formação Caturrita assemelham-se ao da Formação Santa Maria.

Segundo Maciel Filho (1977), o solo da Formação Botucatu é residual e friável, por ser geralmente coberto por coluvião é um solo raso e arenoso, classificado como podzólico vermelho escuro abrupto com textura areno/argilosa.

O solo da Formação Serra Geral é constituído por uma terra roxa estruturada, com textura argilosa, sendo a alteração do basalto ou diabásio responsável por grandes variações, em um dado momento estando a rocha na superfície e noutra, totalmente alterado. O riólito da Formação Serra Geral pode formar solo contendo grandes blocos e matações. Nas declividades altas onde não aflora a rocha, ocorrem solos litólicos com fragmento do riólito misturado a material terroso, apresenta cerca de 1 m de espessura (MACIEL FILHO, 1977).

Os depósitos coluvionares são, em geral, compostos por solos arenosos da Formação Botucatu ou por uma mistura de basalto, riólito e arenito. Por fim, os depósitos fluviais de várzea apresentam espessura de 1 m, possuem permeabilidade alta, são considerados solos jovens e pouco desenvolvidos, compostos de areia fina a grossa com cascalho.

### 3.6 HIDROGRAFIA E HIDROGEOLOGIA

Segundo Robaina et al. (2002), Santa Maria situa-se entre as nascentes das duas principais bacias hidrográficas do Estado, para leste escoam as águas que formam a Bacia Hidrográfica do Guaíba e para oeste as que constituem a Bacia Hidrográfica do Uruguai.

A partir da Carta Geotécnica de Santa Maria de Maciel Filho (1990) e do Mapa Hidrogeológico da Folha de Santa Maria da CPRM (1994) é possível ter conhecimento da água subterrânea e das suas condições para o aproveitamento. A Formação Rosário do Sul, por exemplo, possui permeabilidade moderada a baixa, com aquíferos de baixa produção, exploráveis apenas por poços escavados.

Segundo Maciel Filho (1990), o aquífero da Formação Santa Maria, membro Passo das Tropas, é o mais importante e explorado. O solo é permeável, secando

rapidamente após as chuvas, a infiltração ocorre através do solo residual e por drenância descendente das aluviões que o recobrem.

A Formação Santa Maria, membro Alemoa, apresenta uma camada superior impermeável e na parte inferior, os siltitos e arenitos argilosos semipermeáveis, ficando a água retida no solo superficial, mantendo-o muito úmido.

Com camadas semipermeáveis e impermeáveis, a Formação Caturrita é complexa na visão de Maciel Filho (1990) e a sua vulnerabilidade é proporcional à facilidade de infiltração. O arenito basal, em geral, é grosseiro e permeável, porém grande parte dos arenitos possuem expressivas quantidades de silte e argila expansiva, fatores que diminuem a permeabilidade.

A Formação Botucatu, assim como os solos residuais, possui permeabilidade alta, sendo muito vulnerável devido a facilidade de infiltração. Já a permeabilidade da Formação Serra Geral é fissural, não tendo capacidade de armazenamento.



## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta pesquisa consistiu em três etapas, a primeira denominada etapa de gabinete, na qual foi realizada a escolha dos locais para coleta dos materiais, a revisão da literatura e o planejamento da pesquisa. A segunda, etapa de campo, a qual consistiu em realizar a coleta dos materiais. E por fim, a etapa de laboratório, onde foram realizados os ensaios propostos no planejamento. Após concluída esta última etapa foi realizado o processamento e análise dos resultados.

### 4.1 ETAPA DE GABINETE

Nesta etapa foram escolhidos os locais de coleta dos materiais com base no mapa geológico da região de Santa Maria (Anexo A), sendo definidos dois perfis típicos de solo de cada uma das seguintes unidades geotécnicas: Botucatu; Caturrita; Rosário do Sul; Santa Maria/Alema e Santa Maria/Passo das Tropas, além dos solos da jazida Canabarro e do Distrito Industrial, estudados por Santos (2016).

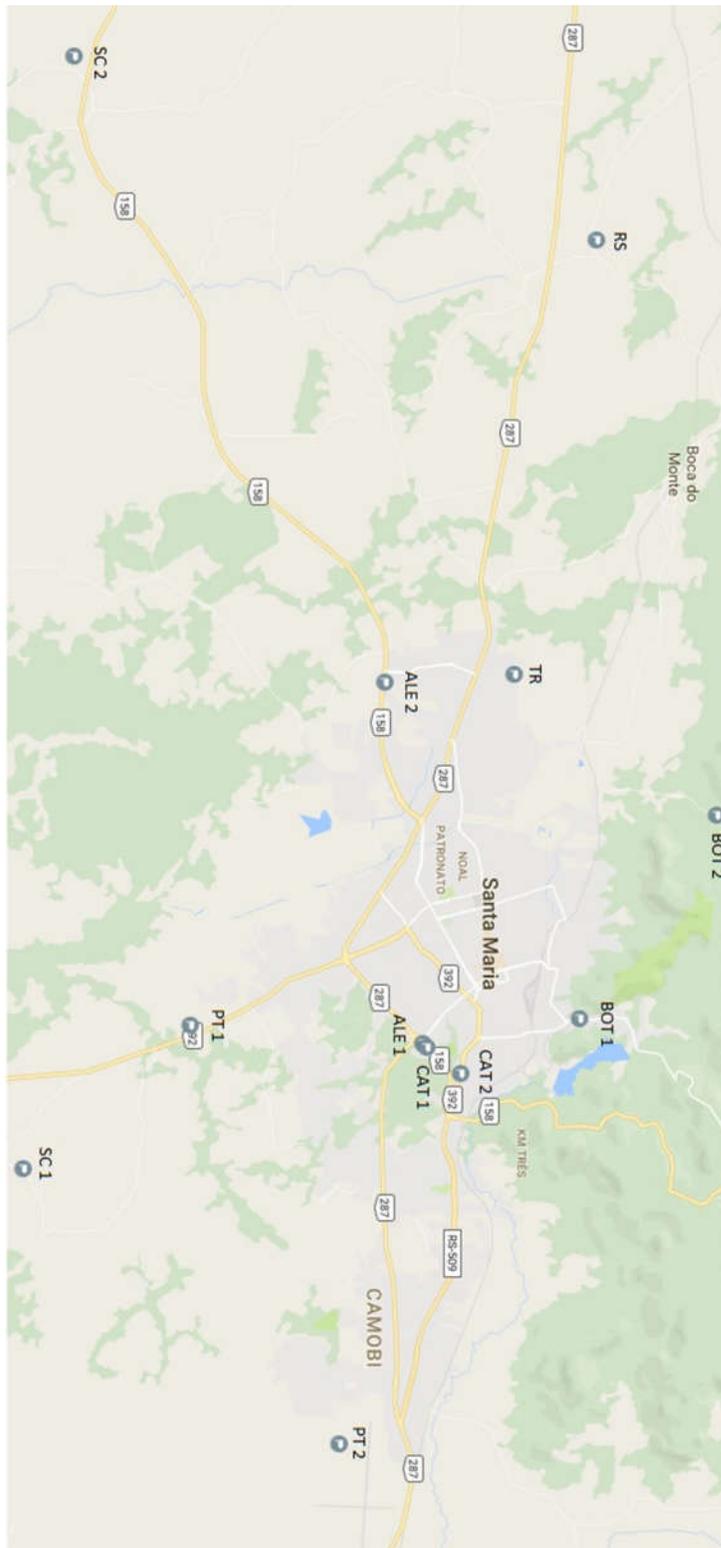
A Tabela 4.1 apresenta as coordenadas geográficas e a nomenclatura adotada para cada material e a Figura 4.1 ilustra a localização dos pontos no mapa de Santa Maria.

Tabela 4.1 - Coordenadas de localização dos perfis típicos e jazidas

Unidade Geotécnica/Jazida	Coordenadas Geográficas		Sigla
	Latitude Sul	Longitude Oeste	
Botucatu	29°40'12.2"	53°47'48.4"	BOT1
	29°38'36,6"	53°50'30,9"	BOT2
Caturrita	29°41'58.0"	53°47'25.2"	CAT1
	29°41'34.7"	53°47'04.9"	CAT2
Rosário do Sul	29°46'38.0"	53°45'48.3"	SC1
	29°46'02.2"	54°00'37.6"	SC2
Santa Maria (Membro Alema)	29°42'0.8"	53°47'28.1"	ALE1
	29°42'26.8"	53°52'17.1"	ALE2
Santa Maria (Membro Passo das Tropas)	29°44'41.5"	53°47'43.1"	PT1
	29°42'58.9"	53°42'07.9"	PT2
Canabarro	29°40'4.34"	53°58'09.41"	RS
Distrito Industrial	29°40'53.75"	53°52'29.58"	TR

Fonte: Autora

Figura 4.1 - Mapa de localização dos perfis típicos e jazidas



Também foram realizados nesta etapa o planejamento e os estudos referentes ao tema da pesquisa, a revisão da literatura foi baseada em livros, teses, artigos, dissertações, entre outros.

## 4.2 ETAPA DE CAMPO

A presente etapa consistiu na saída a campo para a coleta dos materiais. Tendo em vista a quantidade de ensaios a serem realizados, foram coletados aproximadamente 100 kg de cada material. Após a limpeza superficial dos perfis, as amostras deformadas foram retiradas com o auxílio de pás e picareta, sendo acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificados, posteriormente armazenadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM – LMCC, em local seco e protegido das intempéries.

As Figuras 4.2 a 4.11 apresentam os perfis típicos das unidades geotécnicas, onde foram retiradas as amostras.

Figura 4.2 - Formação Botucatu (BOT1)



Figura 4.3 - Formação Botucatu (BOT2)



Fonte: Autora

Figura 4.4 - Formação Caturrita (CAT1)



Fonte: Autora

Figura 4.5 - Formação Caturrita (CAT2)



Fonte: Autora

Figura 4.6 - Formação Rosário do Sul (SC1)



Fonte: Autora

Figura 4.7 - Formação Rosário do Sul (SC2)



Fonte: Autora

Figura 4.8 - Formação Santa Maria / Alemoa (ALE1)



Fonte: Autora

Figura 4.9 - Formação Santa Maria / Alemoa (ALE2)



Fonte: Autora

Figura 4.10 - Formação Santa Maria / Passo das Tropas (PT1)



Fonte: Autora

Figura 4.11 - Formação Santa Maria / Passo das Tropas (PT2)



Fonte: Autora

A jazida Canabarro (Figura 4.12) fica localizada na divisa dos municípios de Santa Maria e São Pedro do Sul. Segundo Santos (2016), o solo, denominado RS, foi utilizado como material de subleito rodoviário na duplicação da RS-509 (Faixa Velha de Camobi), na cidade de Santa Maria/RS.

Figura 4.12 - Jazida Canabarro



Fonte: Santos (2016, p.57)

O solo TR é proveniente da jazida do Distrito Industrial de Santa Maria, localizado na região oeste do município. Conforme exposto por Santos (2016), este solo foi empregado no trecho Ulbra – Trevo da Uglione (BR 287), da chamada Travessia Urbana, importante obra de infraestrutura viária em execução na cidade. A Figura 4.13 apresenta o local de coleta da amostra.

Figura 4.13 - Jazida Distrito Industrial



Fonte: Santos (2016, p.57)

### 4.3 ETAPA DE LABORATÓRIO

Nesta seção são apresentados os ensaios realizados em laboratório e a descrição dos procedimentos adotados (diretrizes seguidas, preparação e moldagem dos corpos de prova, detalhes dos equipamentos utilizados). Para os solos RS e TR foram utilizados os resultados obtidos por Santos (2016), sendo executados somente os ensaios complementares da metodologia MCT e o método das pastilhas.

Cabe salientar que, excetuando a análise química e o ensaio triaxial de cargas repetidas, os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM – LMCC.

#### 4.3.1 Análise Química

A análise química dos materiais foi realizada no Laboratório de Solos do Centro de Ciências Rurais - CCR da Universidade Federal de Santa Maria, o conjunto de métodos para esta análise é conhecido como Método Embrapa (Embrapa, 1997) e

teve como objetivo identificar a textura, o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), a saturação de bases e alumínio e outros cátions presentes nos materiais em estudo.

Conforme recomendações da Embrapa (2006), após secos ao ar, cerca de 50 g de solo, passantes na peneira de nº10 (2,0 mm), foram armazenados em sacos plásticos resistentes (Figura 4.14), devidamente identificados e entregues ao Laboratório para análise completa.

Figura 4.14 - Amostras para Análise Química



Fonte: Autora

#### 4.3.2 Ensaios de Caracterização

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização e compactação foi realizada conforme descrito na norma ABNT NBR 6457/86 (Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização). Os materiais coletados em campo, após secos ao ar, foram peneirados e novamente acondicionados em sacos para posterior realização dos ensaios.

A caracterização dos materiais teve como base os ensaios clássicos da Mecânica dos Solos: análise granulométrica; limites de Atterberg e peso específico real dos grãos.

A análise granulométrica por peneiramento e sedimentação foi baseada nas diretrizes da normativa ABNT NBR 7181/84 (Solo – Análise granulométrica). Os ensaios foram realizados em duas condições: com e sem uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio), sendo a classificação realizada através da escala ABNT NBR 6502/95 (Rochas e Solos).

Os limites de Atterberg foram obtidos conforme orientações das normas ABNT NBR 6459/84 (Solo – Determinação do limite de liquidez) e NBR 7180/84 (Solo – Determinação do limite de plasticidade).

O ensaio de peso específico real dos grãos seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 6508/84 (Grãos de solo que passam pela peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica), utilizando o método do picnômetro.

#### **4.3.3 Ensaio de Compactação, Índice de Suporte Califórnia e Expansão**

Os ensaios de compactação seguiram as diretrizes apresentadas na norma ABNT NBR 7182/86 (Solo – Ensaio de compactação), com a finalidade de obter a umidade ótima e a massa específica máxima real aparente dos materiais em estudo. Por questões de análise e comparação, os ensaios foram realizados nas Energias Normal, Intermediária e Modificada, utilizando o método Proctor.

Com o objetivo de estimar a resistência de um solo compactado para sua utilização em bases, sub-bases e subleitos de pavimentos, foi determinado o ISC dos solos coletados, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 9895/87 (Solo – Índice de Suporte Califórnia). As amostras foram moldadas no teor ótimo obtido nas curvas de compactação, para as três energias de compactação, ficando imersas por um período de 96 horas, para posterior rompimento.

A expansão dos materiais foi determinada após estes estarem saturados, indicando a perda de resistência dos mesmos com a saturação. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), um material para ser utilizado como subleito deve apresentar o valor mínimo de  $ISC \geq 2\%$  e  $Expansão \leq 2\%$ .

#### 4.3.4 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

O módulo de resiliência é considerado um parâmetro de suma importância na avaliação das características mecânicas dos materiais, este ensaio tem a finalidade de reproduzir em laboratório as condições impostas em campo. A determinação do módulo ocorreu a partir das diretrizes do método de ensaio DNIT-ME 134/2010 e da AASHTO, TP46-94.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS, moldados na condição ótima de compactação, com valores de referência retirados da curva de compactação na energia Proctor Normal.

Foi moldado um corpo de prova de cada solo estudado, utilizando um molde de metal tripartido de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, envolto por uma membrana permeável. Após posicionado na câmara triaxial, as laterais do molde foram retiradas, a câmara triaxial foi fechada e posicionada no equipamento (Figura 4.15) para o início do ensaio. As cargas foram aplicadas por um sistema pneumático de ar comprimido, controlado automaticamente por um sistema ligado a um computador, gerenciado pelo programa SEEPAV 8200 (Sistema de Ensaio Especiais de Pavimentação). A leitura do deslocamento foi realizada através de um sensor interno. A tensão desvio aplicada, a deformação elástica e os módulos de resiliência para cada estado de tensões foram obtidos com o auxílio computacional.

Figura 4.15 - Equipamento do ensaio triaxial de cargas repetidas



Santos (2016) relata que, na fase de condicionamento, o solo TR não resistiu ao último par de tensões (0,1029 – 0,309 MPa), optando-se por repetir o penúltimo par descrito em norma, para que assim fosse possível a realização do ensaio. Após os 600 ciclos dessa fase, o ensaio propriamente dito era automaticamente iniciado. Tendo em vista as características dos demais solos a serem ensaiados, optou-se por também repetir o penúltimo par de tensões na fase de condicionamento.

Após a realização dos ensaios e obtenção dos módulos de resiliência em função dos pares de tensões descritos em norma, os mesmos foram analisados e classificados conforme os modelos descritos no item 2.2 do presente trabalho.

#### 4.3.5 Classificação MCT

A metodologia MCT classifica os solos de acordo com seu comportamento, laterítico (L) ou não laterítico (N), através de dois índices ( $c'$  e  $e'$ ), determinados a partir do ensaio de compactação Mini-MCV e do ensaio de perda de massa por imersão. O coeficiente  $c'$  é dado pela inclinação das curvas de deformabilidade e o índice  $e'$  é obtido através da fórmula apresentada na Equação 4.1:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (4.1)$$

Onde:

$e'$  é o índice de laterização;

$P_i$  é a perda de massa por imersão, em %;

$d'$  é o coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes.

A partir desses parâmetros foi possível classificar os solos através dos ábacos de classificação MCT e MCT-M, apresentados nos itens 2.4.2 e 2.4.3 deste trabalho.

O ensaio de Compactação Mini-MCV seguiu as diretrizes presentes na norma DNER-ME 258/94 (Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV (Moisture Condition Value)). As amostras, passantes na peneira de nº 10, foram devidamente umedecidas e ensacadas pelo período mínimo de 24 horas, para

devidamente umedecidas e ensacadas pelo período mínimo de 24 horas, para homogeneização do teor de umidade. A moldagem dos corpos de prova foi realizada em cilindros de 50 mm de diâmetro por 130 mm de altura, controlando o número de golpes e os critérios de parada previstos em norma. A série de golpes adotada foi a de Parsons (1976): 1, 2, 3, 4, 6, 8, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256. A Figura 4.16 apresenta o equipamento miniatura utilizado na compactação.

Figura 4.16 - Equipamento para compactação miniatura



Fonte: Autora

Após a compactação Mini-MCV, as amostras foram deslocadas 10 mm para fora do cilindro e submersas em água pelo período de 24 horas para a realização do ensaio da Perda de Massa por Imersão, conforme apresentado na norma DNER-ME 256/94 (Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão). A Figura 4.17 ilustra uma amostra durante e após este ensaio.

Figura 4.17 - Ensaio de Perda de Massa por Imersão



Fonte: Autora

#### 4.3.6 Método das Pastilhas

Para a realização do método expedito de classificação foi adotado como procedimento a proposta de Nogami e Villibor (1994b). Utilizando cerca de 100 g de solo passante na peneira nº 40, colocados sobre uma placa de vidro esmerilhada, adicionando-se água e efetuando-se a espatulação. Conforme recomendado pelos referidos autores, foram em torno de 100 espatuladas para solos não lateríticos arenosos, siltosos ou argilosos, e 400 para solos lateríticos argilosos ou arenosos. A consistência da pasta foi medida com o auxílio de um penetrômetro, ajustando-se o teor de umidade até conseguir que a penetração da agulha fosse de 1,0 mm. Ao atingir o ponto, a amostra foi moldada em cinco anéis de 20 mm de diâmetro.

Após 24 horas secando ao ar, efetuou-se a medida da contração diametral sofrida, utilizando-se um paquímetro. As pastilhas foram então transferidas para uma placa porosa saturada com água e recoberta com papel filtro, repousando cerca de 2 horas, para então serem medidas as penetrações com o penetrômetro (Figura 4.18).

Figura 4.18 - Penetrômetro



Fonte: Autora

A partir dos valores da contração e penetração, obteve-se a classificação expedita da MCT pelo Método das Pastilhas, conforme descrito no item 2.4.4 deste trabalho.

### **4.3.7 Ensaios Complementares da MCT**

Conforme apresentado na Revisão da Literatura, no item 2.4.1, os ensaios complementares permitem avaliar as propriedades fundamentais dos solos como contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração d'água, coesão, capacidade de suporte e famílias de curvas de compactação. Reproduzindo as condições reais de camadas de solos tropicais compactados, possibilitando dimensionar pavimentos e escolher solos em obras de engenharia rodoviária.

Todos os ensaios complementares da metodologia MCT estão preconizados e detalhadamente descritos no anexo 2 do livro Pavimentos Econômicos, escrito por Villibor e Nogami, publicado em 2009. A seguir, são apresentados os ensaios realizados nesta pesquisa.

#### **a) Ensaio de Compactação Mini-Proctor**

Seguindo o mesmo procedimento do ensaio de compactação proposto por Proctor, este ensaio gera curvas que permitem determinar a massa específica aparente seca máxima ( $MEAS_{máx}$ ) e a umidade ótima ( $w_{ot}$ ) para a energia utilizada.

O equipamento utilizado foi o mesmo apresentado no ensaio de compactação Mini-MCV (Figura 4.16). Foram realizados ensaios nas três energias de compactação, permitindo assim, a comparação com os resultados obtidos no ensaio tradicional de compactação.

#### **b) Mini-CBR, Expansão e Contração**

O procedimento de ensaio é similar ao adotado para o ISC tradicional, tendo sido proposto para as energias normal e intermediária. De acordo com Souza (2007), o ensaio de Mini-CBR com imersão e com sobrecarga é realizado para estudar o comportamento dos solos do subleito ou solos para a execução de aterros. Já o ensaio sem imersão e sem sobrecarga é realizado para o estudo da capacidade de suporte de solos para bases, pois bases de pavimentos econômicos não recebem camadas espessas de revestimentos, ou seja, sem sobrecarga.

No presente trabalho foram ensaiados corpos de prova compactados na umidade ótima na energia normal, intermediária e modificada, sendo que para cada

energia foram moldados 4 corpos de prova, ensaiados com e sem sobrecarga padrão de 490 g na imersão durante 24 horas e sem imersão. A Figura 4.19 ilustra a prensa utilizada para o rompimento dos corpos de prova.

Após o rompimento dos corpos de prova, gerou-se as curvas Carga-Penetração, a partir das quais foram determinados os índices de suporte Mini-CBR pelo método de correlações e pelo método de cargas padrão, com a finalidade de comparar os resultados obtidos por ambos os métodos.

Figura 4.19 - Prensa Mini-CBR



Fonte: Autora

O método de correlações utiliza as Equações 4.2 e 4.3, onde C1 e C2 são, respectivamente, as cargas em kgf correspondentes às penetrações 2,00 e 2,50 mm, obtidas das curvas Carga-Penetração. Adotando-se o maior valor do Mini-CBR obtido.

$$\log (\text{Mini-CBR}) = -0,254 + 0,896 \times \log C1 \quad (4.2)$$

$$\log (\text{Mini-CBR}) = -0,356 + 0,937 \times \log C2 \quad (4.3)$$

O método de cargas padrão compara os valores de carga C1 e C2, correspondentes as penetrações de 0,84 e 1,7 mm, utilizando as Equações 4.4 e 4.5.

Este procedimento, segundo Villibor e Nogami (2009), é o mais correto, porém exige maior precisão das leituras de carga iniciais na penetração do pistão.

$$\text{Mini-CBR} = 100 \times C1 / 72,60 \times 2 \quad (4.4)$$

$$\text{Mini-CBR} = 100 \times C2 / 108,90 \times 2 \quad (4.5)$$

Os referidos autores utilizam o índice RIS como parâmetro na avaliação tecnológica dos solos tropicais pela Metodologia MCT. Este índice serve para quantificação indireta da diferença de comportamento do Mini-CBR e é calculado segundo a Equação 4.6. Entretanto, alguns autores utilizam a percentagem de perda de suporte por imersão (PSI), que é determinada através da Equação 4.7.

$$\text{RIS} = \frac{\text{mini-CBR imerso}}{\text{mini-CBR s/imersão}} \times 100 (\%) \quad (4.6)$$

$$\text{PSI} = \frac{\text{mini-CBR s/imersão} - \text{mini-CBR imerso}}{\text{mini-CBR s/imersão}} \times 100 (\%) \quad (4.7)$$

Onde:

mini-CBR imerso: imerso sem sobrecarga padrão na imersão e penetração;  
mini-CBR s/imersão: sem imersão com sobrecarga padrão na umidade ótima.

Segundo Nogami e Villibor (2001), os valores recomendáveis para esses parâmetros, na energia intermediária, são: RIS  $\geq$  40% e PSI < 50%, significando que a perda de suporte após a imersão não deve ser superior a metade de seu suporte sem imersão. Portanto, quanto menor o valor de PSI, melhor é a amostra.

A expansão dos solos foi verificada durante o período de imersão dos corpos de prova moldados para o ensaio de Mini-CBR, nas três energias de compactação, com e sem sobrecarga. O valor desse parâmetro foi obtido através da Equação 4.8, onde o  $\Delta h$  é a diferença da altura final com a inicial, h. A Figura 4.20 ilustra os corpos de prova durante o ensaio de expansão.

$$E = \frac{\Delta h}{h} \times 100 (\%) \quad (4.8)$$

Figura 4.20 - Ensaio de Expansão



Fonte: Autora

O ensaio de contração foi realizado nos corpos de prova moldados para o ensaio de Mini-CBR sem imersão, nas três energias de compactação. Após o rompimento dos corpos de prova na prensa do Mini-CBR, o solo é retirado do molde com o auxílio do extrator e posicionado para a leitura da contração, por um período de 24 horas. A Figura 4.21 ilustra um corpo de prova durante a realização do ensaio.

Figura 4.21 - Ensaio de Contração



Fonte: Autora

O valor dessa propriedade foi obtido através da Equação 4.9, onde o  $L_i$  e  $L_f$  são as leituras inicial e final do CP e  $L_o$  é o comprimento inicial do mesmo.

$$Ct = \frac{L_f - L_i}{L_o} \times 100 (\%) \quad (4.9)$$

Segundo Nogami e Villibor (2001), os valores recomendáveis para esses parâmetros, quando compactados na energia intermediária, são:  $E < 0,3\%$  e  $Ct$  entre  $0,1\%$  e  $0,5\%$ .

### c) Infiltrabilidade e Permeabilidade

De acordo com Bastos et al. (2000), a infiltrabilidade é uma propriedade hidráulica dos solos não saturados a qual representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície.

O ensaio consistiu na determinação da penetração de água nos solos em estudo, com a finalidade de prever esse fenômeno, de maneira quantitativa, nas camadas dos pavimentos e suas adjacências, principalmente depois da compactação.

Os corpos de prova foram obtidos conforme o procedimento Mini-Proctor, moldados na energia de compactação normal, intermediária e modificada, em suas respectivas umidades ótimas. O procedimento de montagem do equipamento (Figura 4.22) e as leituras foram realizados de acordo com as diretrizes do ensaio.

Após o término do ensaio, os valores foram representados graficamente, plotando as leituras do menisco no tubo horizontal no eixo das ordenadas e o tempo de leitura, em escala proporcional à raiz quadrada do tempo, no eixo das abcissas. Devendo os primeiros pontos ficar alinhados em uma reta inclinada e os últimos tender uma horizontal. A interseção das retas obtidas com a horizontal forneceu, para cada corpo de prova, o tempo de ascensão ( $t_a$ ) em minutos.

Segundo Bastos (1999), o coeficiente de sorção ou índice de absorção representa a velocidade de ascensão capilar dos solos, relacionada a capacidade do solo em infiltrar a água da chuva e dificultar a formação do fluxo superficial. Os valores de sorção ( $S$ ) e a velocidade de caminamento da frente de umidade ( $V$ ) foram calculados conforme as Equações 4.9 e 4.10.

Figura 4.22 - Ensaio de Infiltrabilidade



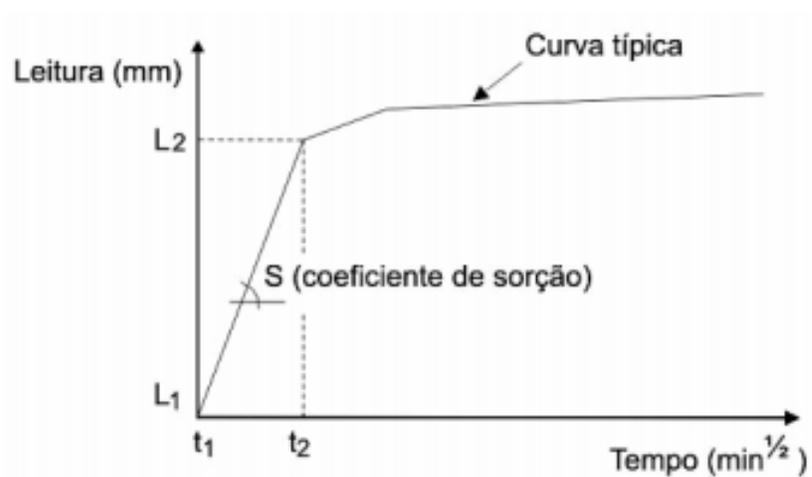
Fonte: Autora

Coeficiente de Sorção (S):

$$S = \frac{(L_2 - L_1) \times St}{(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}) \times Sp} \quad (4.9)$$

Onde,  $L_2$  e  $L_1$  são pontos da reta que passa pela origem, correspondentes aos tempos  $t_2$  e  $t_1$ .  $St$  é a seção interna média do tubo horizontal e  $Sp$  é a seção do corpo de prova. A Figura 4.23 apresenta a curva típica deste ensaio, da qual são retirados os parâmetros mencionados.

Figura 4.23 - Curva típica do deslocamento do menisco x tempo para o ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT



Fonte: Adaptado de Bastos (1999)

Velocidade de Caminhamento da Frente de Umidade (V):

$$V = \frac{a}{\sqrt{ta}} \quad (4.10)$$

Onde,  $a$  é a altura inicial do corpo de prova e  $ta$  é o tempo de ascensão.

Cabe salientar que, em solos tropicais, principalmente nos lateríticos, a penetração real pode ser bastante diferente do resultado obtido em corpos de prova compactados em laboratório, devido a interferência de fissuras e trincas que se desenvolvem, geralmente pelo uso de técnica construtiva não convencional, como a secagem ou após vários anos de serviço. Com isso, Villibor e Nogami (2009) limitam o uso dos resultados deste ensaio à escolha de solos para acostamentos e para bases revestidas de camadas betuminosas delgadas, sujeitas eventualmente a considerável infiltração de água, com provável desenvolvimento de panelas. Segundo Nogami e Villibor (2001), o valor recomendável para este parâmetro, quando compactado na energia intermediária, é entre  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$  cm/min<sup>1/2</sup>.

Terminado o ensaio de Infiltrabilidade, os corpos de prova foram utilizados para a determinação da permeabilidade (Figura 4.24)

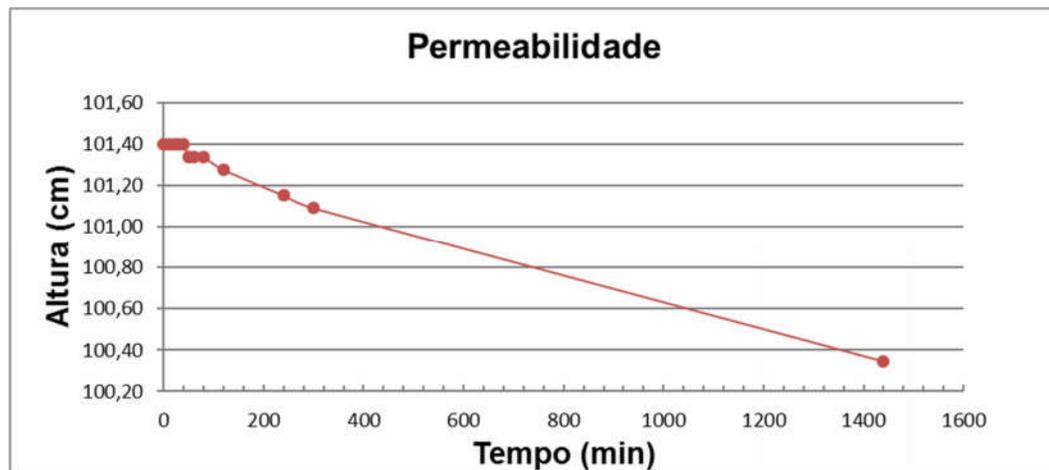
Figura 4.24 - Ensaio de Permeabilidade



Após vedados, os corpos de prova foram conectados na mangueira e a bureta preenchida com água. As leituras foram realizadas na escala graduada (mm) e nos tempos 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 240, 300 e 1440 minutos.

Ao término do ensaio foi elaborado um gráfico, conforme exemplificado na Figura 4.25, contendo os valores das leituras nas ordenadas e o tempo nas abcissas, em escala linear, sendo o coeficiente de permeabilidade (k) calculado através da reta obtida, segundo a Equação 4.11.

Figura 4.25 - Gráfico do ensaio de Permeabilidade



Fonte: Autora

Coefficiente de permeabilidade (k):

$$k = \frac{2,3 \cdot a \cdot S_b}{60 \cdot S_p \cdot t} \cdot \log \frac{H_1}{H_2} \quad (4.11)$$

Onde:

k é o coeficiente de permeabilidade em cm/s;

$a$  é a altura do corpo de prova, geralmente 5 cm;

$S_b$  é a seção interna média da bureta em  $\text{cm}^2$ ;

$S_p$  é a seção do corpo de prova em  $\text{cm}^2$ ;

$H_1$  e  $H_2$  são os níveis do menisco, correspondentes aos tempos  $t_1$  e  $t_2$  em mm;

$t = t_2 - t_1$ , em min.

De acordo com Villibor e Nogami (2009), o ensaio de permeabilidade é feito de maneira expedita e simplificada, o que justifica a limitação do uso desta propriedade em pavimentação.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais descritos na metodologia apresentada no Capítulo 4. Em um primeiro momento são apresentados os resultados da análise química, dos ensaios de caracterização física e mecânica dos solos, incluindo os parâmetros ótimos de compactação para as três energias Proctor, bem como os valores de Índice de Suporte Califórnia – ISC e expansão. Em seguida são exibidos os resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas e a classificação resiliente dos materiais estudados. Por fim, são apresentados os resultados dos ensaios da metodologia MCT.

### 5.1 ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas são de suma importância para o emprego dos solos, principalmente em subleitos rodoviários, pois esses apresentam além dos aspectos químicos, resultados e informações acerca da fração argila dos solos, que influenciam nas características mecânicas dos mesmos.

A caracterização química dos solos foi realizada pelo Laboratório de Análise de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM, avaliando a presença de elementos químicos, a capacidade de troca catiônica (CTC), a saturação de bases e alumínio, entre outros. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 5.1, o laudo completo da análise química encontra-se nos Anexos C e D deste trabalho.

Tabela 5.1 - Resumo dos resultados da Análise Química

Solos	Cátions Básicos			Acidez Potencial		CTC	Saturação		MO	Arg	pH
	Ca	K	Mg	Al	H+Al		Al	Bases			
	(cmolc/dm <sup>3</sup> )						Al Bases		(%)		
BOT1	4,9	0,082	3,7	1,9	3,1	10,5	18,1	73,5	0,1	8,0	4,8
BOT2	13,8	0,235	2,8	2,4	3,9	19,3	12,4	81,0	0,1	14,0	5,0
CAT1	5,5	0,082	3,6	0,0	0,9	9,1	0,0	91,0	0,1	3,0	5,9
CAT2	3,6	0,113	2,1	0,0	1,0	5,8	0,0	85,0	0,1	8,0	6,9
SC1	0,7	0,061	0,8	3,2	12,3	4,8	66,7	11,4	0,1	48,0	5,0
SC2	9,0	0,205	13,0	1,4	2,8	23,6	5,9	88,9	0,1	27,0	7,5
ALE1	31,7	0,123	4,9	0,0	0,9	36,7	0,0	97,7	0,2	13,0	7,8
ALE2	1,9	0,133	1,6	5,1	30,7	8,7	58,6	10,6	0,1	32,0	4,6
PT1	1,9	0,164	1,8	2,7	6,9	6,6	40,9	36,4	0,1	24,0	4,8
PT2	1,3	0,072	1,0	4,1	6,2	6,4	64,1	27,4	0,1	28,0	4,8
RS	1,4	0,072	1,3	1,5	4,9	4,3	34,9	37,0	0,2	-	5,0
TR	1,5	0,072	0,6	2,5	7,7	4,6	54,3	21,7	0,2	-	4,9

Fonte: Autora

As argilas de baixa atividade, com pouca ou nenhuma presença de matéria orgânica, apresentam valores de CTC entre 3  $\text{cmolc/dm}^3$  e 15  $\text{cmolc/dm}^3$ , indicando a presença do argilomineral caulinita, característico de solos não expansíveis, presente na maioria dos solos em estudo, exceto nas amostras BOT2, SC2 e ALE1, que apresentaram capacidade de troca catiônica entre 20 e 40  $\text{cmolc/dm}^3$ , indicando a presença do argilomineral illita.

Os solos das Formações Botucatu e Caturrita e as amostras SC2 e ALE1 apresentaram mais de 50% de saturação por bases, característico de solos eutróficos ou férteis, diferente do restante dos materiais, que apresentaram valores inferiores à 50%, caracterizando solos distróficos, ou seja, pouco ou muito pouco férteis e sem reserva de nutrientes para os vegetais.

Em relação ao pH, os solos SC2 e ALE1 obtiveram valores acima de 7,1, indicando solos alcalinos, divergindo dos demais, que apresentaram variação de 4,6% a 6,9%, indicando solos ácidos.

## 5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

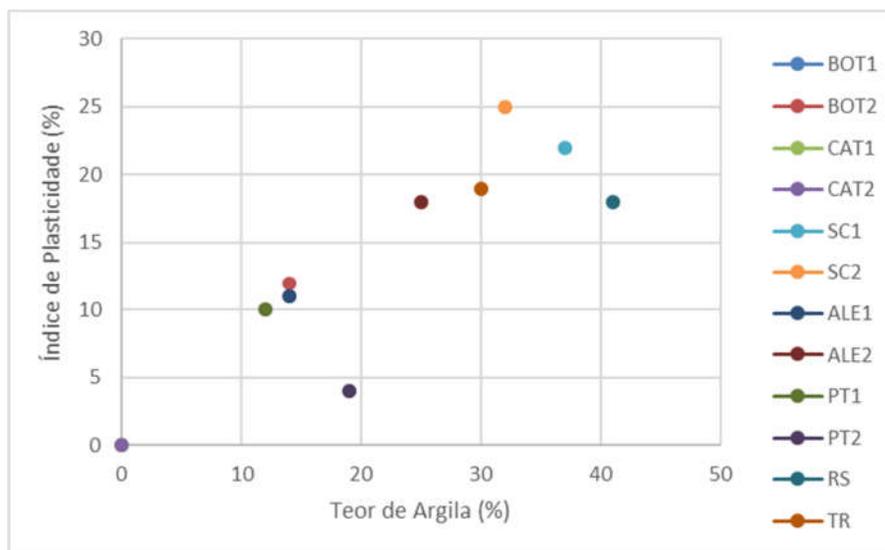
Os ensaios de caracterização foram realizados de acordo com a metodologia apresentada, compreendendo os ensaios de peso específico real dos grãos, limites de Atterberg e análise granulométrica com e sem o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio). A Tabela 5.2 apresenta os resultados desses ensaios e as classificações USCS e TRB obtidas para cada solo em estudo.

Tabela 5.2 - Resumo dos ensaios de caracterização e classificação dos solos

SOLO	Massa Específica ( $\text{g/cm}^3$ )	Limites de Atterberg (%)				Granulometria (%)					Classificação	
		LL	LP	IP	Argila	Com Defloculante/Sem Defloculante					USCS	TRB
						Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg		
BOT1	2,698	NL	NP	0	8/0	2/8	64/66	19/19	7/7	0/0	SM	A2-4
BOT2	2,695	31	19	12	14/0	4/11	67/72	15/17	0/0	0/0	SC	A2-6
CAT1	2,670	NL	NP	0	0/0	10/21	56/42	34/36	0/1	0/0	SM	A2-4
CAT2	2,690	NL	NP	0	0/0	9/9	13/16	49/48	29/27	0/0	SM	A2-4
SC1	2,810	49	27	22	37/0	18/55	17/17	22/22	7/6	0/0	CL	A7-6
SC2	2,743	38	13	25	32/10	42/54	19/28	7/8	0/0	0/0	CL	A6
ALE1	2,725	29	18	11	14/0	52/21	21/31	9/27	3/19	1/2	CL	A6
ALE2	2,742	41	23	18	25/4	24/38	39/45	11/13	0/0	0/0	CL	A7-6
PT1	2,755	30	20	10	12/0	24/26	50/49	14/24	0/1	0/0	SC	A4
PT2	2,703	24	20	4	19/7	17/17	15/25	41/40	7/11	0/0	SM-SC	A4
RS	2,737	47	29	18	41/10	14/32	15/21	16/20	11/15	2/2	CL	A7-6
TR	2,720	39	20	19	30/12	13/27	18/16	26/29	12/15	1/1	SC	A6

Os pesos específicos reais dos grãos dos solos provenientes de uma mesma unidade geotécnica apresentaram pouca variabilidade, sendo os valores encontrados consistentes com a mineralogia de cada material. Analisando as características de plasticidade, os solos da Formação Caturrita e a amostra BOT1 são materiais não plásticos, condizendo com as percentagens de argila encontradas na granulometria. O solo PT2 apresentou baixa plasticidade e os solos BOT2, ALE1 e PT2, plasticidade média. Os demais solos, com índice de plasticidade variando entre 18% e 25%, foram caracterizados como materiais altamente plásticos. A Figura 5.1 apresenta o gráfico do Índice de Plasticidade (%) x Teor de Argila (%) dos materiais em estudo.

Figura 5.1 - Índice de Plasticidade (%) x Teor de Argila (%)



Fonte: Autora

De acordo com a classificação USCS as amostras SC, ALE e RS são designadas como argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade (CL). O sistema classificatório TRB enquadra as amostras SC1, ALE2 e RS no subgrupo A-7-6, que inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos à elevadas mudanças de volume. E as amostras SC2 e ALE1 estão inseridas no subgrupo A-6, onde o solo típico é argiloso e plástico, sujeito à elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido, não apresentando bom comportamento como subleito rodoviário.

As amostras BOT2, PT1 e TR, segundo o sistema de classificação USCS, são areias argilosas (SC). De acordo com a classificação TRB, a amostra BOT2 se enquadra no subgrupo A-2-6, composta por areias com finos argilosos e o solo TR no subgrupo A-6, o qual indica materiais com péssimo comportamento como camada de subleito. A amostra PT1 se enquadra no subgrupo A-4, que agrupa solos siltosos não plásticos ou moderadamente plásticos, sendo esta a mesma classificação da amostra PT2, que divergiu apenas na classificação USCS, estando compreendida no grupo SM-SC.

Por fim, a amostra BOT1 e os solos provenientes da Formação Caturrita foram designados como areias siltosas (SM) pela USCS, havendo concordância com a classificação TRB, que enquadra estes materiais no subgrupo A-2-4, que representa os solos granulares finos siltosos, sendo considerados materiais de bom comportamento para emprego como subleito rodoviário.

Para fins de comparação, as curvas granulométricas (Figuras 5.2 a 5.6) dos solos provenientes da mesma formação foram plotadas em um único gráfico.

Figura 5.2 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – BOT

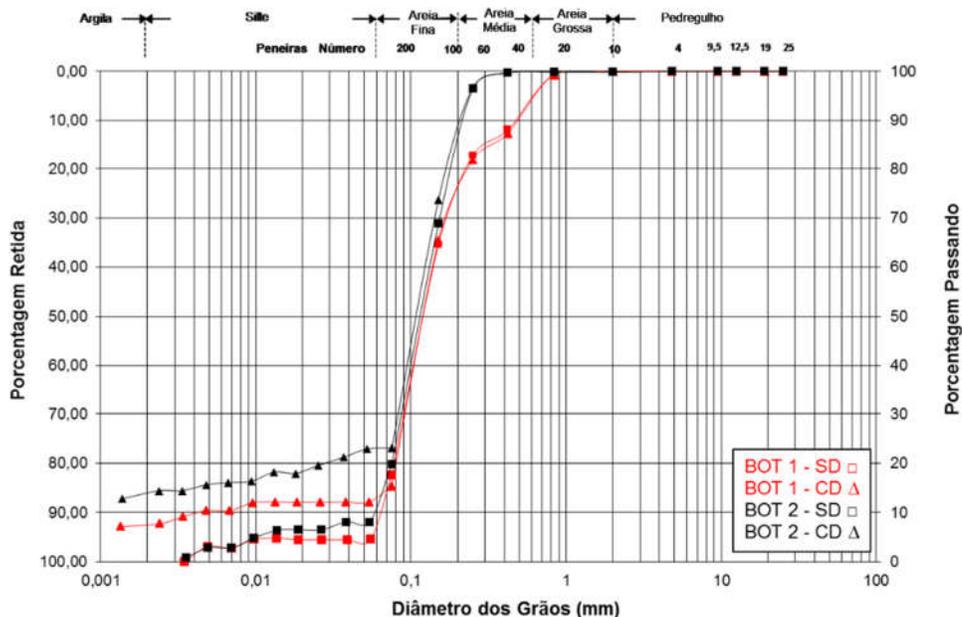
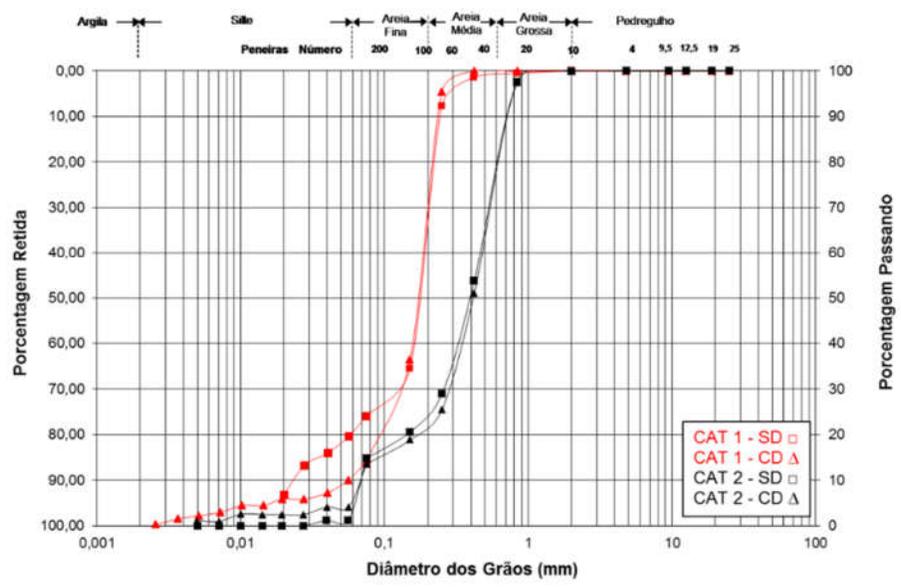
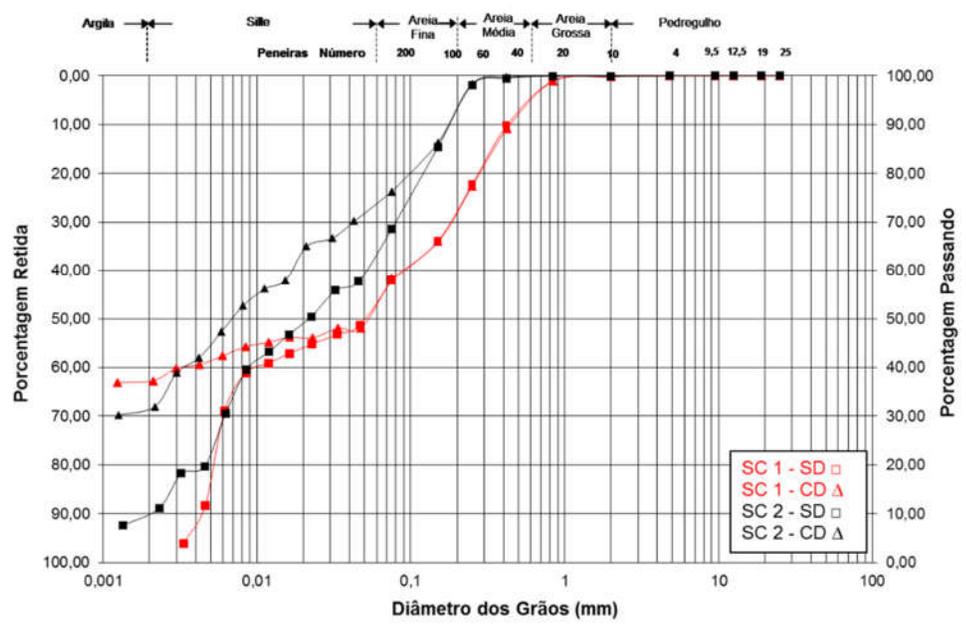


Figura 5.3 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – CAT



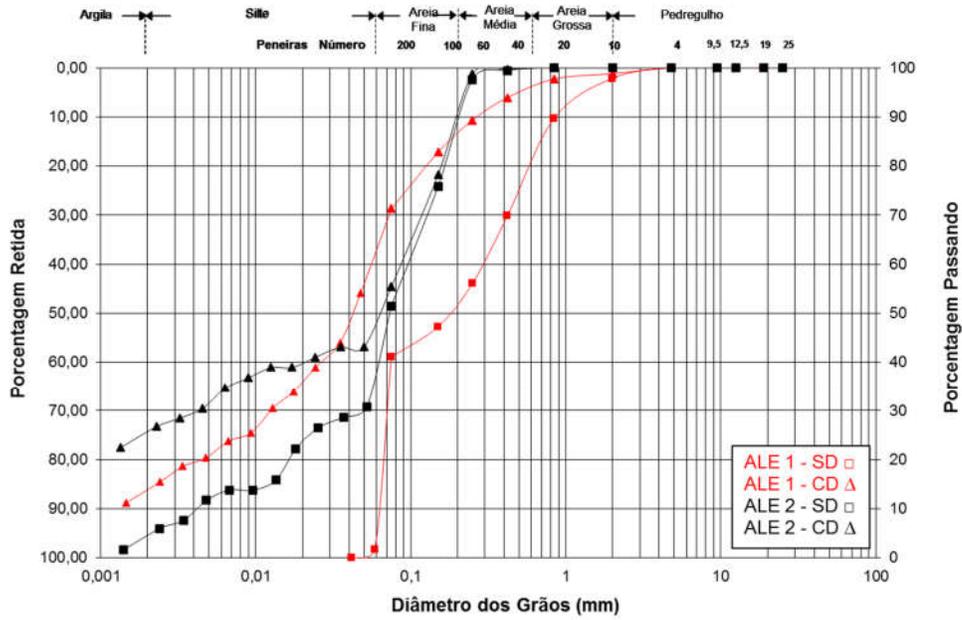
Fonte: Autora

Figura 5.4 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – SC



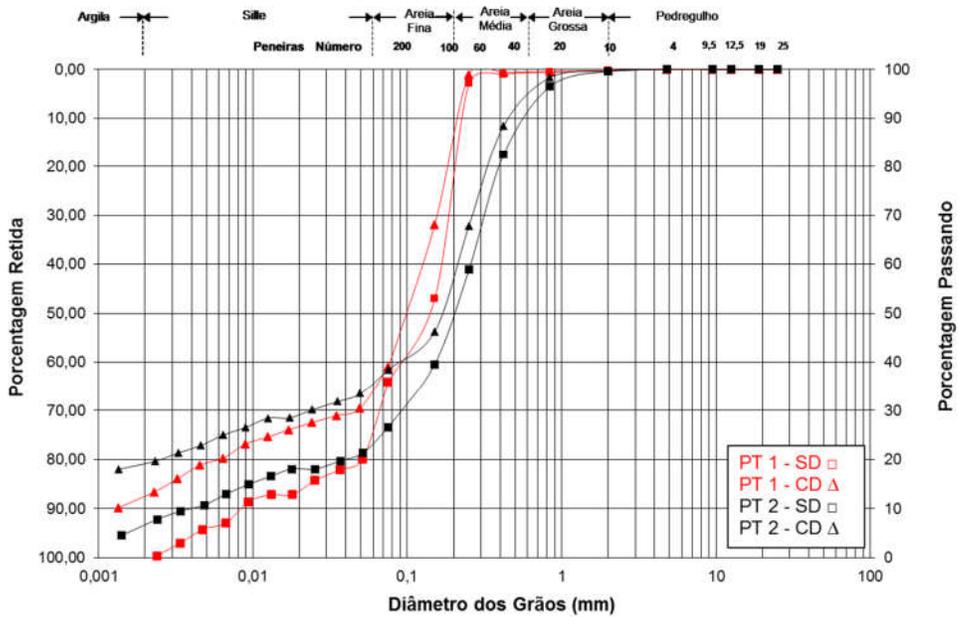
Fonte: Autora

Figura 5.5 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – ALE



Fonte: Autora

Figura 5.6 - Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – PT



Fonte: Autora

É possível observar nas curvas granulométricas da Figura 5.2 o predomínio de areia fina na composição das amostras da Formação Botucatu, condizendo com os grupos em que foram enquadrados nas classificações tradicionais, divergindo na quantidade de argila, o que conferiu maior plasticidade ao solo BOT2. Os solos da Formação Caturrita apresentaram diferenças nas percentagens de areias, porém as classificações finais pelos dois métodos tradicionais foram as mesmas.

As amostras das Formações Rosário do Sul e Santa Maria/Alemao apresentaram a maior diferença entre as percentagens de finos nos ensaios com e sem o uso de defloculante. A classificação USCS colocou esses materiais no mesmo grupo (CL) e a classificação TRB os dividiu em A-6 e A-7-6 conforme exposto na Tabela 5.2.

Os solos da Formação Santa Maria/Passo das Tropas apresentaram divergências nas percentagens de areia fina e média, apresentando diferença na classificação USCS, porém a mesma classificação segundo a metodologia TRB.

O solo TR apresentou um predomínio da fração areia (em torno de 26%), como é possível observar na Tabela 5.2 e o solo RS apresentou um predomínio de partículas finas (silte + argila), na razão de 55%.

Durante a análise da granulometria dos solos em estudo, observou-se uma diferença entre as curvas granulométricas realizadas com e sem o uso de defloculante, em especial nos solos SC e ALE. Isto ocorre devido à formação de grumos (partículas menores aderidas) nos ensaios realizados sem o uso de agente defloculante. Essa diferença é bastante característica de solos tropicais, porém foi indiferente o uso do agente defloculante na classificação convencional final dos materiais em estudo.

### 5.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, CBR E EXPANSÃO

Na Tabela 5.3 são apresentados os principais parâmetros obtidos nos ensaios de compactação e CBR (com imersão) para todos os solos desta pesquisa.

Devido ao predomínio de partículas argilosas, os solos RS e SC1 apresentaram as menores massas específicas máximas ( $1647 \text{ kg/m}^3$  e  $1648 \text{ kg/m}^3$ ) e, conseqüentemente, as maiores umidades ótimas de compactação Proctor Normal, 19,9% e 21,5%, respectivamente.

Tabela 5.3 - Resumo dos parâmetros obtidos

Solo	Energia de Compactação	Proctor		Massa específica aparente seca (kg/m <sup>3</sup> )	CBR (%)	Expansão (%)
		Massa específica aparente seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)			
BOT1	Normal	1835	14,5	1816	26	0,78
	Intermediária	1930	12,8	1907	36	0,50
	Modificada	1985	10,7	1955	107	0,60
BOT2	Normal	1794	15,0	1771	8	0,41
	Intermediária	1885	13,0	1867	29	0,48
	Modificada	1965	12,4	1932	48	0,63
CAT1	Normal	1690	16,0	1658	6	0,00
	Intermediária	1792	14,6	1772	14	0,00
	Modificada	1878	12,6	1844	32	0,00
CAT2	Normal	1866	13,4	1831	11	0,01
	Intermediária	1966	12,0	933	18	0,00
	Modificada	1984	9,2	1955	53	0,00
SC1	Normal	1648	21,5	1618	10	0,20
	Intermediária	1783	19,3	1752	22	0,24
	Modificada	1887	16,5	1860	35	0,28
SC2	Normal	1655	18,6	1634	8	4,91
	Intermediária	1921	13,6	1885	14	8,05
	Modificada	1973	13,0	1941	29	9,36
ALE1	Normal	1748	19,0	1717	2	0,24
	Intermediária	1872	16,0	1836	13	0,39
	Modificada	1938	15,0	1914	15	0,41
ALE2	Normal	1738	16,7	1705	3	2,62
	Intermediária	1888	14,0	1851	4	4,48
	Modificada	1966	13,0	1928	4	4,81
PT1	Normal	1810	15,3	1776	9	0,51
	Intermediária	1955	12,8	1918	10	1,25
	Modificada	2045	10,2	2058	20	2,58
PT2	Normal	1775	16,0	1771	5	0,06
	Intermediária	1965	13,5	1927	21	0,10
	Modificada	2045	11,8	2005	46	0,13
RS	Normal	1647	19,9	1625	16	0,18
	Intermediária	1792	19,2	1756	21	0,14
	Modificada	1861	16,3	1825	29	0,06
TR	Normal	1787	15,1	1771	14	0,27
	Intermediária	1974	12,6	1843	24	0,21
	Modificada	2026	11,8	1985	26	0,91

Fonte: Autora

Para a mesma energia, a amostra CAT2 apresentou a maior massa específica máxima (1866 kg/m<sup>3</sup>) e, conforme esperado, a menor umidade ótima (13,4%). Este material foi classificado como areia siltosa, pelo sistema de classificação USCS, apresentando mais de 50% de sua composição de partículas granulares, o que justifica o fato do solo atingir altas densidades.

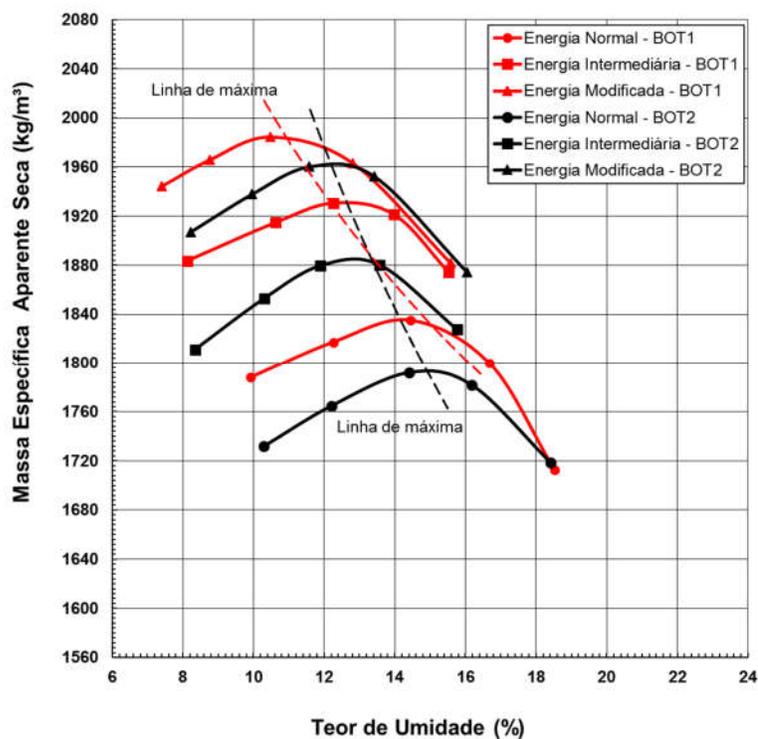
As Figuras 5.7 a 5.11 apresentam as curvas de compactação nas três energias Proctor. Para fins de comparação, os resultados das amostras provenientes da mesma formação foram plotados em um único gráfico.

Quanto aos valores de CBR para a energia Proctor normal, apresentados na Tabela 5.3, apenas o solo BOT1 apresentou resultado satisfatório para emprego como

base ou sub-base de pavimentos. As amostras BOT2, CAT2, SC1, PT1, RS e TR apresentaram valores variando de 8% a 16%, sendo considerados solos regulares para uso como sub-base. Os solos CAT1 e PT2 apresentaram valores bem semelhantes de CBR, sendo classificados como pobre a regular. Já os solos da Formação Santa Maria/Alemoa e a amostra SC2 apresentaram os menores valores, ficando enquadrados na faixa dos solos muito pobres para o emprego na pavimentação.

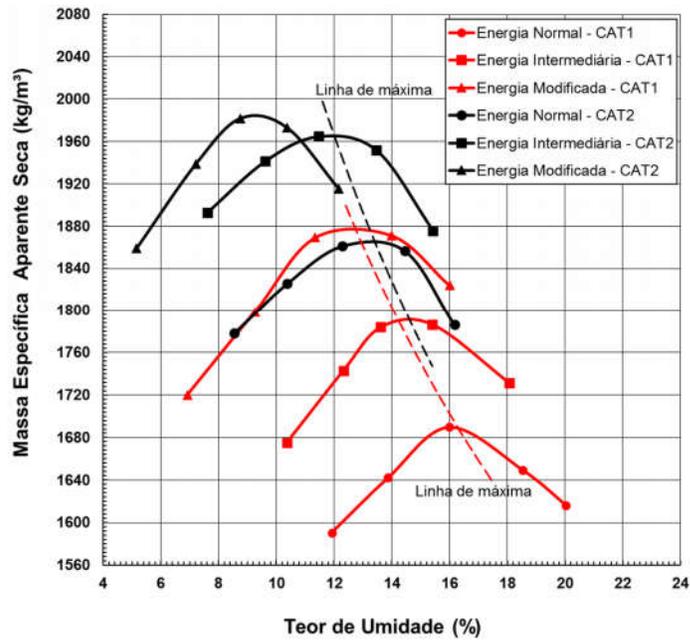
Em relação à expansão, excetuando os solos ALE2, SC2 e PT1, as demais amostras obtiveram resultados pouco expressivos, inferiores à 1%, conforme esperado, devido à presença dos argilominerais caulinita (argilomineral não expansivo) e ilita em suas composições. Estando dentro dos limites apresentados no Manual de Pavimentação do DNIT (2006) para solos utilizados como camada de subleito (Expansão  $\leq 2\%$ ).

Figura 5.7 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – BOT



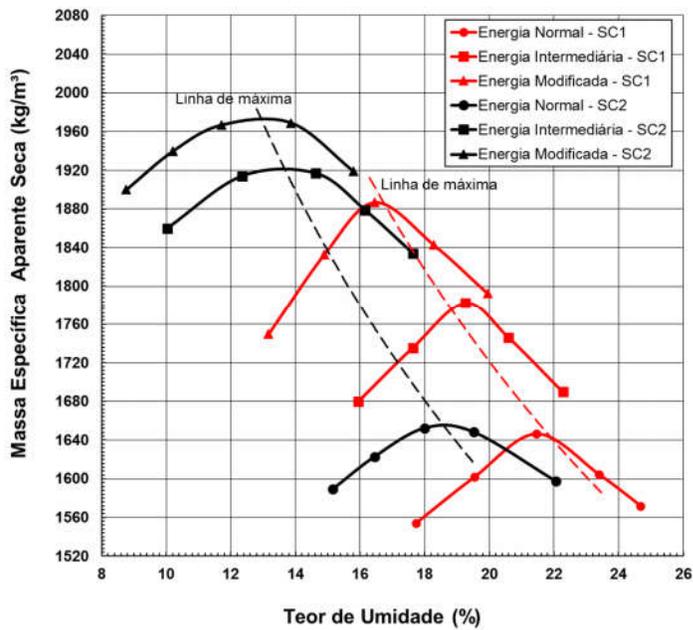
Fonte: Autora

Figura 5.8 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – CAT



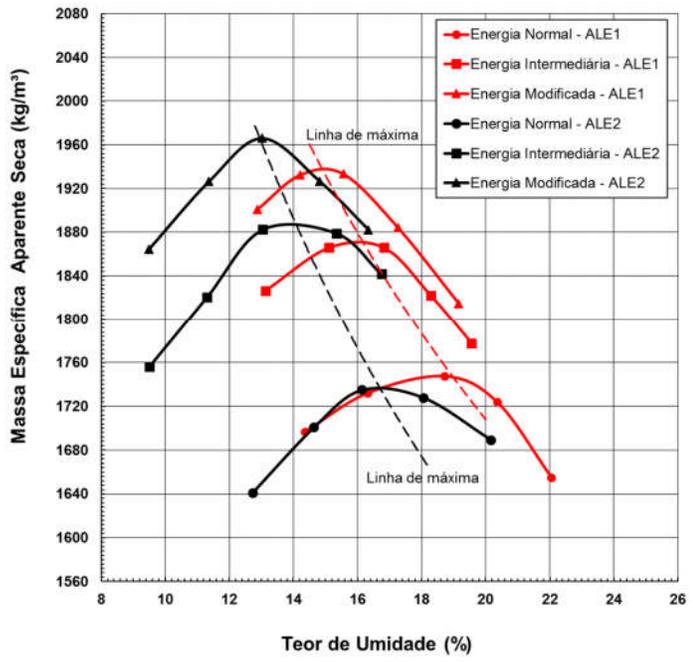
Fonte: Autora

Figura 5.9 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – SC



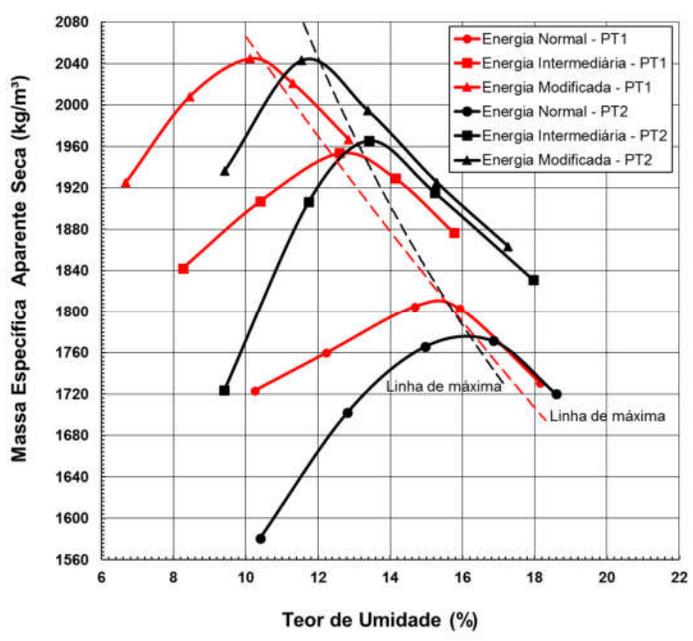
Fonte: Autora

Figura 5.10 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – ALE



Fonte: Autora

Figura 5.11 - Curvas de compactação nas três energias Proctor – PT



Fonte: Autora

É possível observar pelas figuras que, com o aumento da energia de compactação, há um aumento na massa específica máxima do material e um decréscimo na umidade ótima de compactação.

#### 5.4 CLASSIFICAÇÃO RESILIENTE

A classificação resiliente dos solos foi realizada de acordo com as propostas apresentadas no Capítulo 4. Foram realizadas análises dos diversos modelos de obtenção do módulo de resiliência, em função da tensão confinante (Equação 2.1), do invariante de tensões (Equação 2.2), da tensão desvio (Equação 2.3) e do modelo composto (Equação 2.4), conforme apresentado na revisão da literatura. O parâmetro utilizado para análise dos quatro modelos adotados foi o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os módulos de resiliência dos solos foram obtidos por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas, nas condições de umidade ótima. A Tabela 5.4 apresenta as características de compactação das amostras utilizadas neste ensaio.

Tabela 5.4 - Características de compactação para o ensaio triaxial de cargas repetidas

<b>Solo</b>	<b>w (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math> (kgf/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>GC (%)</b>
BOT1	13,8	1820	99,2
BOT2	14,9	1777	99,1
CAT1	15,7	1676	99,2
CAT2	13,1	1847	99,0
SC1	21,1	1636	99,3
SC2	17,8	1643	99,3
ALE1	18,6	1743	99,7
ALE2	16,2	1731	99,6
PT1	15,8	1792	99,0
PT2	15,5	1760	99,2
RS	19,6	1641	99,6
TR	14,8	1763	98,7

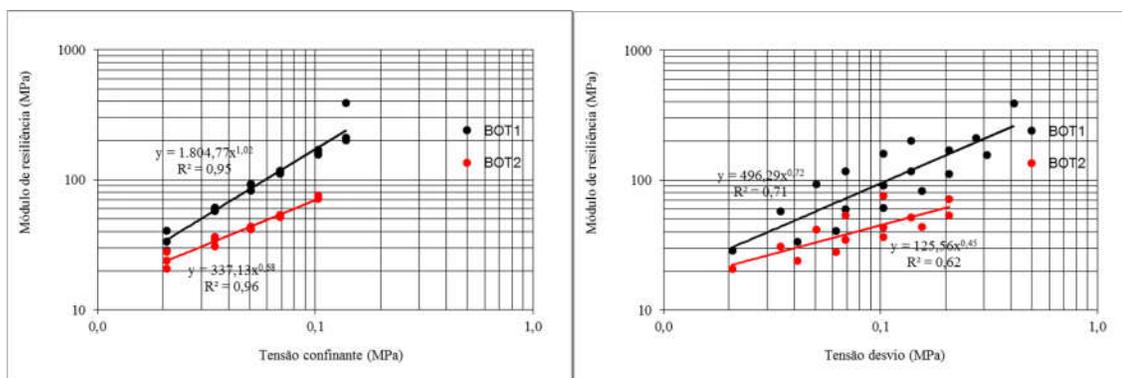
Fonte: Autora

As regressões foram calculadas a partir do número de pares de tensões que cada amostra suportou sem sofrer grandes deformações. Os solos BOT2, ALE1 e TR suportaram quatorze pontos, correspondente aos primeiros quatorze pares de tensões presentes na norma DNIT-ME 134/2010. Os solos SC2 e PT2 suportaram quinze pares de tensões, o solo RS atingiu dezessete e os demais atingiram um estágio de tensões mais avançado, utilizando dezoito pares de tensões para sua regressão.

As Figuras 5.12 a 5.16 ilustram a variação do módulo de resiliência com as tensões desvio e confinante. Para fins comparativos, as amostras de solos pertencentes a uma mesma formação foram plotadas em um único gráfico.

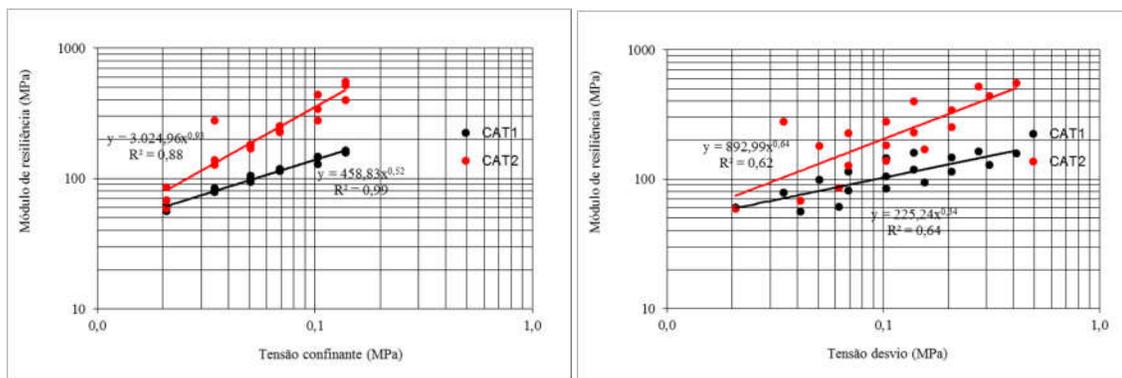
Analisando-se os resultados, observa-se que para os solos ALE2 e SC2, à medida em que se aumentou  $\sigma_d$ , e também  $\sigma_3$ , ocorreu a diminuição do  $M_R$ , sendo esta sensibilidade uma característica dos materiais finos, conforme relatado por vários pesquisadores, a partir de estudos de Svenson (1980). De acordo com Preussler (1978), os valores positivos do parâmetro  $k_2$  indicam que com o incremento da tensão confinante há um aumento no módulo de resiliência, sendo este o comportamento típico de solos granulares, observado nos demais solos em estudo.

Figura 5.12 -  $M_R \times \sigma_3$  e  $M_R \times \sigma_d$  – Formação Botucatu



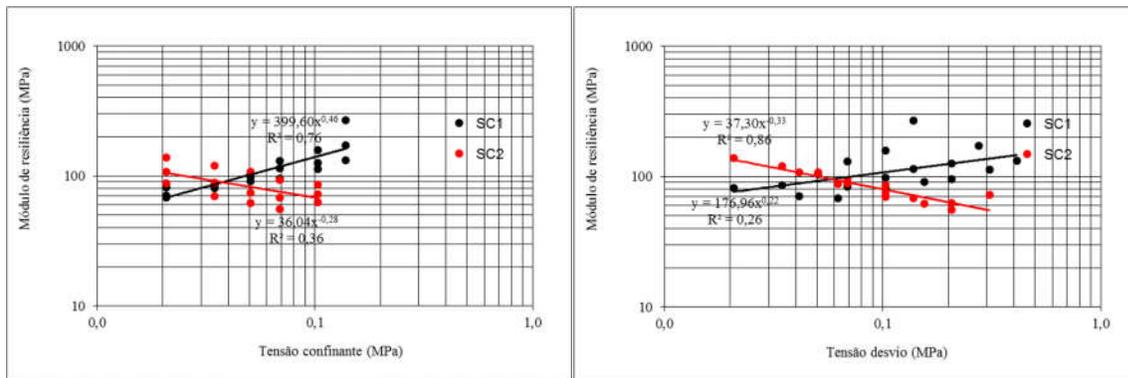
Fonte: Autora

Figura 5.13 -  $M_R \times \sigma_3$  e  $M_R \times \sigma_d$  – Formação Caturrita



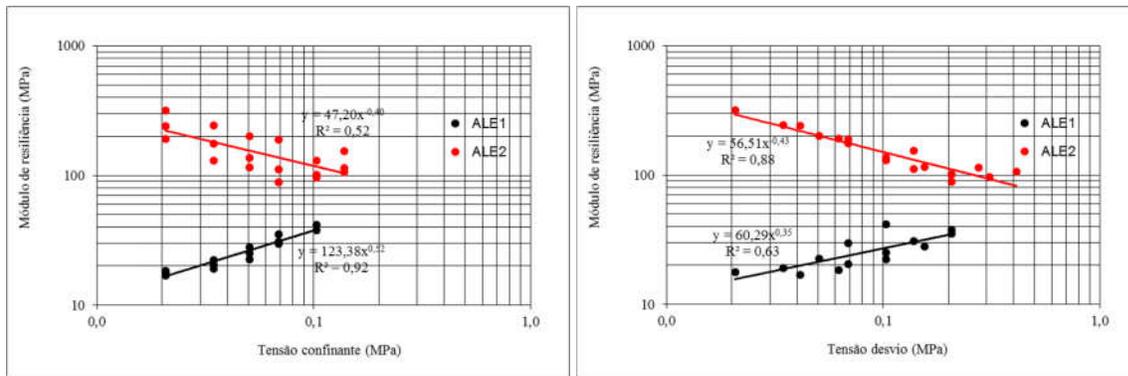
Fonte: Autora

Figura 5.14 -  $M_R \times \sigma_3$  e  $M_R \times \sigma_d$  – Formação Rosário do Sul



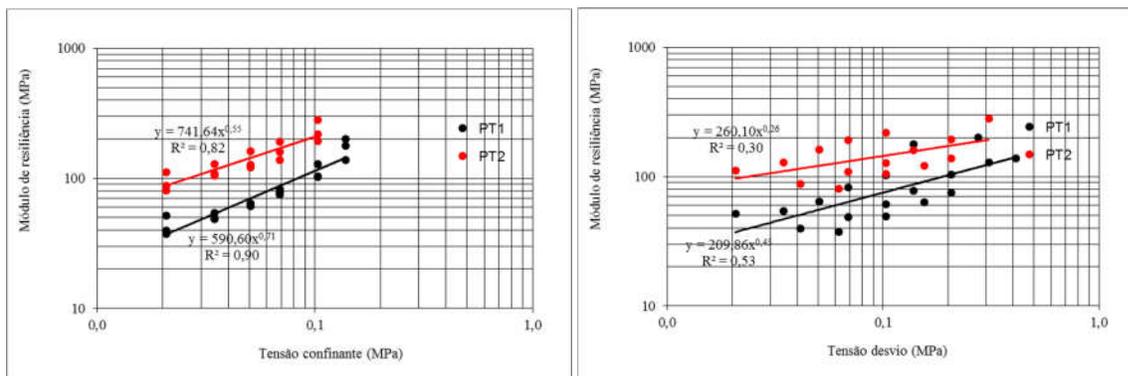
Fonte: Autora

Figura 5.15 -  $M_R \times \sigma_3$  e  $M_R \times \sigma_d$  – Formação Santa Maria (Alemoa)



Fonte: Autora

Figura 5.16 -  $M_R \times \sigma_3$  e  $M_R \times \sigma_d$  – Formação Santa Maria (Passo das Tropas)



Fonte: Autora

A Tabela 5.5 apresenta os parâmetros obtidos para cada modelo analisado, bem como o coeficiente de determinação  $R^2$  de cada amostra ensaiada. Observa-se que, para a amostra de solo SC2 na tensão confinante e os solos SC1 e PT2 na tensão desvio, os valores de  $R^2$  foram baixos, sendo recomendado realizar o tratamento estatístico ou repetir estes ensaios, pois pode ter ocorrido erros na moldagem.

Comparando os resultados apresentados, nota-se que, de maneira geral, o modelo composto proposto por Macêdo (1996) apresentou o melhor desempenho, pois leva em consideração tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio atuante (como variáveis independentes). Para este modelo, os ensaios obtiveram excelentes coeficientes de correlação, sendo a melhor correlação do solo CAT1 ( $R^2 = 0,99$ ) e a menor correlação do solo RS ( $R^2 = 0,8$ ). Portanto, as análises seguintes são baseadas nos resultados do modelo composto, considerando os parâmetros  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  obtidos na regressão.

O parâmetro  $k_3$  é positivo para os solos BOT1, BOT2, CAT2, ALE1 e RS, dessa maneira, com o acréscimo da tensão desvio, o módulo resiliente aumenta. Não ocorrendo o incremento da tensão desvio quando os valores de  $k_3$  forem negativos.

Para os solos CAT1, SC1, SC2, ALE2, PT1, PT2 e TR, observa-se o comportamento elástico desses materiais, em que o sinal negativo do parâmetro  $k_3$ , indica que o módulo de resiliência diminui à medida que a tensão desvio aumenta. E de maneira inversa, o parâmetro  $k_2$ , positivo, significa que, à medida que a tensão confinante aumenta, o módulo também se eleva.

Com o objetivo de se avaliar a ordem de grandeza dos valores dos módulos de resiliência encontrados para cada solo, elaborou-se o gráfico da Figura 5.17, ilustrando a média geral dos mesmos, tendo sido considerados todos os pares de tensão suportados por cada material, exceto dos solos RS e TR.

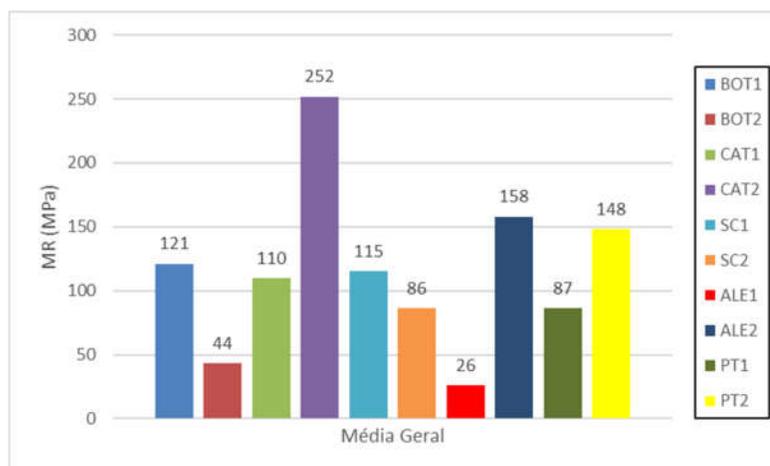
Analisando-se o gráfico, fica evidente a diferença dos valores de módulo de resiliência encontrados para os solos de uma mesma formação. Em concordância com diversos autores, os solos de comportamento laterítico, SC1 e PT2, apresentaram valores superiores quando comparados aos solos da mesma formação, SC2 e PT1, os quais apresentam comportamento não laterítico. Contudo, o solo CAT2 apresentou o melhor desempenho, com média geral de 252 MPa. A menor média foi de 26 MPa, obtida pela amostra ALE1.

Tabela 5.5 - Parâmetros de Mr dos diversos modelos matemáticos

Solo	MR = $K_1 \cdot \sigma_3^{K_2}$ Tensão confinante (PREUSSLER, 1978)			MR = $K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$ Tensão desvio (SVENSON, 1980)			MR = $K_1 \cdot \theta^{K_2}$ Soma das tensões principais			MR = $K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3}$ Modelo composto (MACEDO, 1996)			
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
BOT1	1804,77	1,02	0,95	496,29	0,72	0,71	335,36	0,98	0,93	2134,63	0,83	0,34	0,93
BOT2	337,13	0,68	0,96	125,56	0,45	0,62	111,59	0,67	0,94	362,46	0,70	0,01	0,94
CAT1	458,83	0,52	0,99	225,24	0,34	0,64	191,77	0,48	0,92	445,66	0,52	-0,02	0,99
CAT2	3024,96	0,93	0,88	892,99	0,64	0,62	642,39	0,89	0,84	2663,85	0,71	0,23	0,95
SC1	399,60	0,46	0,76	176,96	0,22	0,26	175,84	0,38	0,57	700,00	0,96	-0,38	0,93
SC2	36,04	-0,28	0,36	37,30	-0,33	0,86	50,76	-0,35	0,61	42,99	0,12	-0,42	0,97
ALE1	123,38	0,52	0,92	60,29	0,35	0,63	54,14	0,51	0,92	137,45	0,49	0,08	0,97
ALE2	47,20	-0,40	0,52	56,51	-0,43	0,88	83,10	-0,46	0,72	53,30	0,03	-0,49	0,97
PT1	590,60	0,71	0,90	209,86	0,45	0,53	175,10	0,65	0,81	1005,23	0,96	-0,06	0,94
PT2	741,64	0,55	0,82	260,10	0,26	0,30	272,52	0,47	0,64	929,27	0,69	-0,08	0,90
RS	413,38	0,49	0,83	218,77	0,33	0,54	187,12	0,47	0,78	484,39	0,49	0,07	0,80
TR	529,45	0,43	0,76	215,98	0,17	0,17	242,81	0,35	0,54	624,31	0,64	-0,20	0,89

Fonte: Autora

Figura 5.17 - Valor médio de módulo de resiliência para cada solo



Fonte: Autora

Cabe salientar que, apesar dos solos da Formação Botucatu e Caturrita serem granulares, por apresentarem mais de 35% de material fino retido na peneira nº 200, os modelos citados foram aplicados para todos os solos, assim como as classificações resilientes através do método indireto e da classificação MCT, apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Classificação Resiliente (Método Direto, Método Indireto e MCT)

SOLO	Método Direto (Preussler e Pinto)	Método Indireto			MCT	
	Grupo/Tipo	% de silte	CBR	Tipo	Classificação*	Tipo
BOT1	A	2	26	I	NA	III
BOT2	A	4	8	II	NA'	II-III
CAT1	A	10	6	II	NA	III
CAT2	A	9	11	I	NA	III
SC1	II-I	18	10	I	LG'	I-II
SC2	II	42	8	II	NG'	II-I
ALE1	III	52	2	III	NS'	II-III
ALE2	I	24	3	III	NG'	II-I
PT1	II-I	21	10	II	NS'	II-III
PT2	II-I	17	6	II	LA'	II-I
RS	I	14	16	I	LG'	I-II
TR	I	13	14	I	LG'	I-II

\* Resultados apresentados no item 5.5

Fonte: Autora

Segundo a classificação resiliente desenvolvida por Preussler e Pinto (1982), os solos granulares das Formações Botucatu e Caturrita pertencem ao grupo A, apresentando grau de resiliência elevado, constituindo subleitos de má qualidade, não sendo recomendados para o uso em estruturas de pavimentos. Estando em concordância com a classificação pela MCT e contrariando os resultados pelo método indireto, conforme esperado, já que este foi proposto para materiais finos.

Para os materiais finos em estudo, o solo SC2 foi classificado do Tipo II, que engloba solos com comportamento regular quando empregados como subleito e reforço do subleito. O solo ALE1, classificado como Tipo III, não devendo ser utilizado em camadas do pavimento, necessitando de estudos especiais para o emprego em subleitos. As amostras de solo SC1, PT1 e PT2 inicialmente se enquadraram no Tipo II, porém devido ao comportamento granular apresentado, com o incremento da tensão desvio houve o aumento no módulo, enquadrando os pontos finais no Tipo I. Segundo Santos (2016), os solos RS e TR, assim como o solo ALE2, são classificados como Tipo I, o qual agrupa os solos com bom comportamento quanto à resiliência como subleito e reforço de subleito, podendo também ser utilizado como camada de sub-base.

No geral, houve maior diferença entre classificações somente para o solo ALE2, que pelo método indireto é visto como um solo com grau de resiliência ruim e pelos demais métodos é considerado de regular a bom.

## 5.5 CLASSIFICAÇÃO MCT

Os índices de classificação obtidos nos ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão, segundo a proposta de Nogami e Villibor (1981), são apresentados na Tabela 5.7. A Figura 5.18 mostra o ábaco da classificação MCT com a indicação da posição dos solos em estudo. Cabe ressaltar que, os solos da Formação Caturrita não atingiram o patamar de compactação inicial no Mini-MCV, sendo classificados como NA (Areia não laterítica), não aparecendo no gráfico da MCT.

Analisando-se os resultados, verifica-se que, das doze amostras, quatro são identificadas como solos de comportamento laterítico, sendo que, o solo PT2 apresenta comportamento laterítico arenoso (LA') e os solos SC1, RS e TR, comportamento laterítico argiloso (LG'), estes possuindo granulometria típica de argilas e argilas arenosas, alta capacidade de suporte, baixa perda de massa por

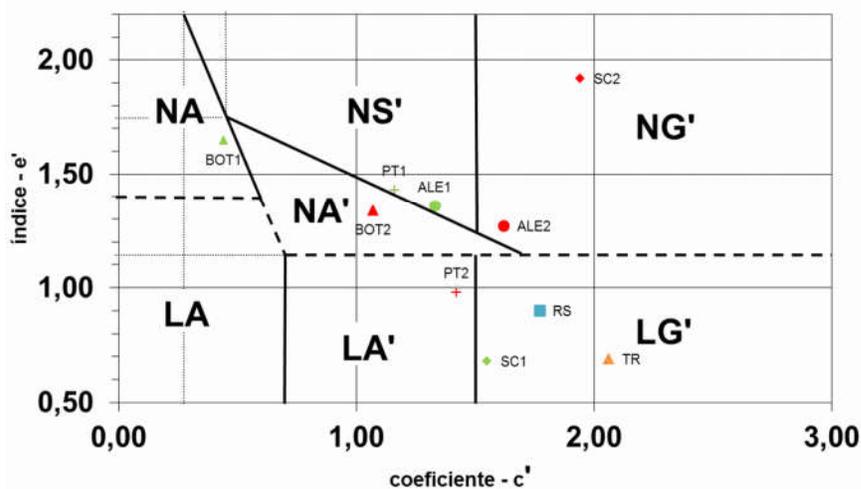
imersão, baixa expansão, média à alta contração, baixa permeabilidade e média à alta plasticidade. Esses solos são considerados adequados para o uso em pavimentação, seja como base, reforço de subleito, subleito, aterro compactado, proteção à erosão, como também para revestimento primário, contrariando as classificações tradicionais, evidenciando a importância dos estudos para solos tropicais e da classificação MCT.

Tabela 5.7 - Índices e Classificação MCT dos solos em estudo

SOLO	Índices Classificatórios				Classificação MCT
	c'	d'	Pi (%)	e'	
BOT1	0,44	10,43	257,00	1,65	NA
BOT2	1,07	34,00	182,00	1,34	NA'
CAT1	-	-	-	-	NA
CAT2	-	-	-	-	NA
SC1	1,55	63,16	0,00	0,68	LG'
SC2	1,94	5,71	360,00	1,92	NG'
ALE1	1,33	32,00	190,00	1,36	NS'
ALE2	1,62	44,17	161,00	1,27	NG'
PT1	1,16	33,18	234,00	1,43	NS'
PT2	1,42	42,86	48,00	0,98	LA'
RS	1,77	80,00	47,00	0,90	LG'
TR	2,06	115,40	15,00	0,69	LG'

Fonte: Autora

Figura 5.18 - Classificação MCT



Fonte: Autora

O elevado índice classificatório  $e'$ , associado ao índice  $c'$ , qualificam os demais solos como materiais não lateríticos. Dentre eles, os solos da Formação Caturrita e o solo BOT1 são classificados como areias não lateríticas (NA), a amostra de solo BOT2 é enquadrado como solo não laterítico arenoso (NA'), as amostras PT1 e ALE1 são classificadas como solos não laterítico siltsos (NS') e os solos SC2 e ALE2 são considerados não lateríticos argilosos (NG').

## 5.6 CLASSIFICAÇÃO MCT-M

Esta classificação, proposta por Vertamatti (1988), inclui no ábaco uma faixa intermediária entre os solos que apresentam comportamento laterítico e não laterítico, representando os solos transicionais. A Tabela 5.8 apresenta os índices classificatórios e a Figura 5.19 ilustra o ábaco MCT-M com a indicação da posição dos solos em estudo.

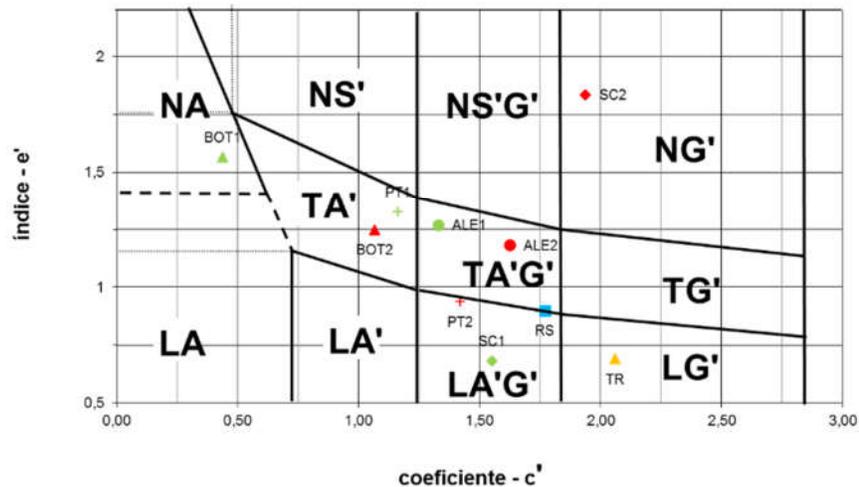
Tabela 5.8 - Índices e Classificação MCT-M dos solos em estudo

SOLO	Índices Classificatórios				Classificação MCT-M
	$c'$	$d'$	Pi (%)	$e'$	
BOT1	0,44	10,43	193,00	1,57	NA
BOT2	1,07	34,00	136,00	1,25	TA'
CAT1	-	-	-	-	NA
CAT2	-	-	-	-	NA
SC1	1,55	63,16	0,00	0,68	LA'G'
SC2	1,94	5,71	270,00	1,84	NG'
ALE1	1,33	32,00	142,50	1,27	TA'G'
ALE2	1,62	44,17	120,00	1,18	TA'G'
PT1	1,16	33,18	174,00	1,33	TA'
PT2	1,42	42,86	36,00	0,94	LA'G'
RS	1,77	80,00	47,00	0,90	LA'G'
TR	2,06	115,40	15,00	0,69	LG'

Fonte: Autora

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5.8 e na Figura 5.19, observa-se que os solos BOT1, CAT1, CAT2, SC2 e TR permaneceram no mesmo grupo da classificação MCT. Os solos BOT2, ALE1, ALE2 e PT1, que antes apresentavam caráter não laterítico, são classificados como transicionais pela classificação MCT-M. As amostras de solo SC1, PT2 e RS passam a pertencer ao mesmo grupo, sendo consideradas solos areno-argilosos lateríticos (LA'G').

Figura 5.19 - Classificação MCT-M



Fonte: Autora

## 5.7 CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA DA MCT

A classificação expedita foi realizada de acordo com o exposto por Nogami e Villibor (1994b), sendo necessário a determinação dos parâmetros de contração e penetração. A Tabela 5.9 apresenta os valores obtidos nos ensaios e a Figura 5.20 ilustra o ábaco da classificação deste método com a distribuição das doze amostras.

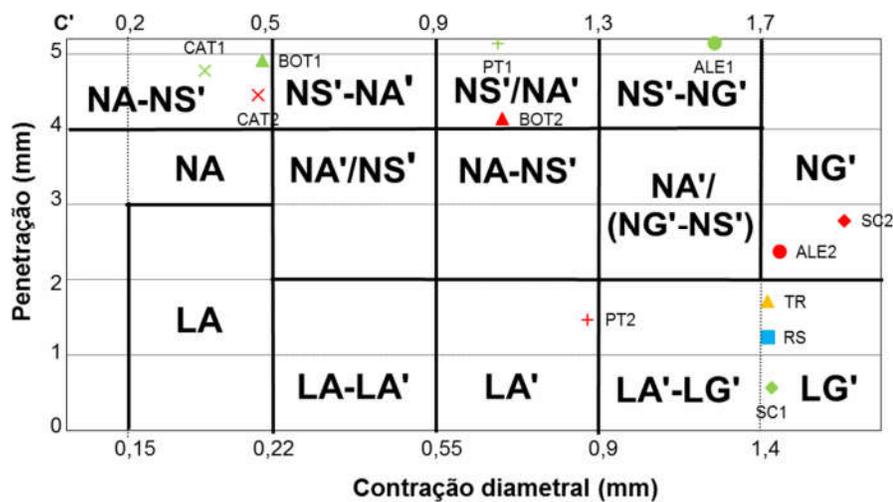
Tabela 5.9 - Índices e Classificação dos solos pelo Método das Pastilhas

SOLO	Índices classificatórios			Classificação
	ct	c'	Penetração	
BOT1	0,21	0,48	4,91	NA-NS'
BOT2	0,67	1,07	4,14	NS'/NA'
CAT1	0,19	0,34	4,78	NA-NS'
CAT2	0,20	0,47	4,45	NA-NS'
SC1	1,46	1,73	0,57	LG'
SC2	1,79	1,91	2,79	NG'
ALE1	1,25	1,59	5,15	NS'-NG'
ALE2	1,49	1,75	2,37	NG'
PT1	0,68	1,06	5,14	NS'/NA'
PT2	0,87	1,28	1,47	LA'
RS	1,45	1,72	1,24	LG'
TR	1,44	1,72	1,71	LG'

Fonte: Autora

Comparando os resultados apresentados na Tabela 5.7 e 5.9, observa-se que os solos classificados como NA pela classificação MCT são classificados como NA-NS' pelo método das pastilhas. Os solos BOT2 e PT1 são enquadrados no mesmo grupo de solos (NS'/NA') e a amostra ALE1 é classificada como NS'-NG'. Os solos PT2, SC2, ALE2, TR e RS apresentaram a mesma classificação em ambos os métodos.

Figura 5.20 - Classificação Método das Pastilhas



Fonte: Autora

Os doze solos estudados apresentaram concordância entre os resultados da classificação MCT e do método das pastilhas, principalmente no que diz respeito ao caráter laterítico e não laterítico desses materiais, sendo o ensaio das pastilhas um método mais rápido e fácil de determinar o comportamento dos materiais.

## 5.8 ENSAIOS COMPLEMENTARES DA MCT

Conforme apresentado na Metodologia, os ensaios complementares realizados nesta pesquisa foram: compactação Mini-Proctor; Mini-CBR; Expansão; Contração; Infiltrabilidade e Permeabilidade. A partir dos resultados desses ensaios avaliou-se as propriedades fundamentais dos solos em estudos, visando o emprego desses materiais em obras de engenharia rodoviária.

A Tabela 5.10 apresenta os valores obtidos no ensaio Mini-Proctor, realizado nas três energias de compactação.

Tabela 5.10 - Ensaio Mini-Proctor e coeficientes RIS e PSI

Solo	Energia de Compactação	Mini - Proctor	
		Massa específica seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)
BOT1	Normal	1820,0	14,5
	Intermediária	1876,0	12,8
	Modificada	1901,0	11,0
BOT2	Normal	1786,0	15,0
	Intermediária	1876,0	12,8
	Modificada	1940,0	12,0
CAT1	Normal	1635,0	15,8
	Intermediária	1715,0	14,4
	Modificada	1763,0	12,4
CAT2	Normal	1861,0	13,4
	Intermediária	1950,0	11,9
	Modificada	2045,0	9,3
SC1	Normal	1645,0	21,5
	Intermediária	1780,0	19,0
	Modificada	1850,0	16,3
SC2	Normal	1765,0	18,2
	Intermediária	1915,0	13,7
	Modificada	1972,0	13,0
ALE1	Normal	1720,0	19,0
	Intermediária	1840,0	16,0
	Modificada	1910,0	15,0
ALE2	Normal	1700,0	16,6
	Intermediária	1880,0	13,9
	Modificada	1934,0	13,0
PT1	Normal	1806,0	15,3
	Intermediária	1950,0	12,5
	Modificada	2040,0	10,0
PT2	Normal	1865,0	15,2
	Intermediária	1990,0	11,6
	Modificada	2040,0	10,8
RS	Normal	1710,0	19,0
	Intermediária	1870,0	16,5
	Modificada	1910,0	15,0
TR	Normal	1785,0	15,0
	Intermediária	1930,0	13,0
	Modificada	2020,0	11,0

Comparando os valores do ensaio Mini-Proctor com os valores encontrados no ensaio Proctor (Tabela 5.3), observa-se que, para a maioria dos solos em estudo, no ensaio Mini-Proctor obteve-se valores menores de massa específica aparente máxima, porém valores semelhantes de umidade ótima, nas três energias de compactação, estando em concordância com diversos estudos e com os autores da metodologia MCT.

Os ensaios Mini-CBR foram realizados com e sem imersão de 24 horas e com e sem sobrecarga padrão de 490 g, conforme exposto no Capítulo 4, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.11. Considerando que este ensaio foi proposto para as energias normal e intermediária de compactação, a análise de resultados e discussão será baseada nestas energias.

Analisando-se a Tabela 5.11, observa-se que, de maneira geral, ocorre maior expansão do solo quando o mesmo se encontra sem sobrecarga durante a imersão. Para a energia normal de compactação, o solo SC2 apresentou as maiores expansões (4,41% e 6,79%), sendo consideradas elevadas, com base nos valores apresentados na Figura 2.12, enquanto as amostras ALE2 e PT1 apresentam expansão média.

Os solos ALE1, PT2 e RS apresentam divergência nos valores de expansão nos ensaios com e sem carga padrão, sendo considerados com baixa e média capacidade de expansão.

Os valores de expansão quase nulos das amostras de solo da Formação Caturrita ocorrem devido à grande presença de areia e a ausência da fração argila na composição desses materiais. Sendo assim, os solos dessa formação e os demais solos com expansão menor que 0,5% são considerados solos com baixa expansão.

Levando em consideração a classificação MCT, apenas os solos ALE1 e PT1, ambos NS', não apresentaram expansão de acordo com os valores apresentados na Tabela 2.11, a qual estipula um valor elevado de expansão para esses solos e neste trabalho apresentaram expansão média.

Conforme esperado, os valores de contração foram semelhantes nos ensaios com e sem sobrecarga padrão, visto que, a sobrecarga é somente utilizada durante o rompimento no ensaio Mini-CBR. Os solos das Formações Rosário do Sul e Santa Maria/Alema e os solos PT2, RS e TR apresentaram índices de contração medianos, sendo este o esperado para materiais com alta fração de argila. Os demais solos apresentaram baixa contração. Todos os resultados foram condizentes com os parâmetros estabelecidos na Tabela 2.11.

Tabela 5.11 - Resultados dos Ensaios de Mini-CBR e coeficientes RIS e PSI

Solo	Energia de Compactação	Imersão com Sobrecarga (E+P)				Imersão sem Sobrecarga (E)				Imersão com Sobrecarga (S+P)				Sem Imersão sem Sobrecarga (S)				RIS (%)	PSI (%)
		Massa específica aparente seca (kg/m³)	Correlações (%)	Cargas Padrão (%)	Expansão (%)	Massa específica aparente seca (kg/m³)	Correlações (%)	Cargas Padrão (%)	Expansão (%)	Massa específica aparente seca (kg/m³)	Correlações (%)	Cargas Padrão (%)	Contração (%)	Massa específica aparente seca (kg/m³)	Correlações (%)	Cargas Padrão (%)	Contração (%)		
BOT1	Normal	1814,80	9	8	0,04	1810	10	9	0,08	1819	24	25	0,14	1816	21	27	0,08	39	61
	Intermediária Modificada	1859,80	18	21	0,05	1848	10	11	0,10	1854	39	60	0,18	1845	35	50	0,18	18	82
BOT2	Normal	1894,80	35	38	0,02	1894	14	14	0,02	1910	57	72	0,14	1898	41	47	0,14	20	80
	Intermediária Modificada	1797,90	15	15	0,20	1779	14	13	0,18	1778	20	22	0,00	1817	16	16	0,12	63	37
CAT1	Normal	1851,00	26	30	0,15	1866	23	25	0,26	1852	45	55	0,16	1890	43	49	0,12	45	55
	Intermediária Modificada	1913,20	34	46	0,28	1904	43	52	0,28	1910	61	83	0,22	1927	58	72	0,18	63	37
CAT2	Normal	1687,30	9	9	0,00	1651	4	4	0,14	163	9	9	0,00	1609	6	7	0,16	49	51
	Intermediária Modificada	1714,50	7	7	0,06	1712	4	4	0,08	1715	13	12	0,10	1712	6	5	0,22	34	66
SC1	Normal	1761,50	22	29	0,04	1753	8	7	0,04	1763	43	49	0,28	1761	16	14	0,26	15	85
	Intermediária Modificada	1857,90	16	19	0,00	1855	10	11	0,00	1859	13	12	0,08	1861	7	6	0,16	86	14
SC2	Normal	1929,70	32	47	0,00	1917	19	23	0,06	1914	22	26	0,18	1916	26	29	0,04	86	14
	Intermediária Modificada	2005,50	18	15	0,02	2019	12	13	0,00	2017	50	58	0,00	2032	36	46	0,04	23	77
ALE1	Normal	1613,10	6	6	0,47	1641	6	6	0,45	1644	7	6	2,72	1645	12	13	1,45	91	9
	Intermediária Modificada	1754,70	17	18	0,24	1746	15	16	0,38	1751	24	26	1,36	1771	29	41	2,20	62	38
ALE2	Normal	1847,80	33	51	0,49	1850	25	42	0,56	1844	94	137	1,04	1847	62	79	1,07	31	69
	Intermediária Modificada	1763,50	3	3	4,41	1763	2	3	6,79	1760	7	8	2,07	1764	8	10	2,22	36	64
ALE1	Normal	1909,20	4	4	4,14	1892	3	4	4,49	1911	19	26	1,11	1893	18	23	1,11	15	85
	Intermediária Modificada	1950,90	3	4	5,20	1952	2	3	6,00	1952	25	34	1,51	1953	14	20	1,16	8	92
PT1	Normal	1704,40	5	5	0,20	1709	3	3	0,58	1743	5	5	3,39	1731	7	7	2,59	61	39
	Intermediária Modificada	1860,30	11	11	0,77	1857	8	9	1,57	1851	17	17	1,68	1860	21	22	1,92	49	51
PT2	Normal	1904,00	13	14	1,29	1889	7	6	2,98	1884	23	24	1,97	1896	30	39	1,84	27	73
	Intermediária Modificada	1722,60	7	7	1,89	1693	7	7	1,60	1705	17	22	1,04	1726	18	22	1,07	34	66
RS	Normal	1848,20	13	12	2,88	1881	4	4	2,42	1873	33	44	1,05	1850	45	61	0,60	10	90
	Intermediária Modificada	1921,30	10	7	3,83	1902	4	4	6,20	1933	43	50	0,77	1934	54	64	0,51	8	92
TR	Normal	1782,50	10	10	0,91	1801	6	5	1,46	1788	18	20	0,56	1802	13	14	0,94	28	72
	Intermediária Modificada	1916,20	19	21	1,59	1933	11	11	3,36	1933	33	34	0,49	1920	23	24	0,36	33	67
RS	Normal	1864,50	10	10	0,10	1862	7	7	0,63	1857	14	14	0,65	1863	13	13	0,67	48	52
	Intermediária Modificada	1970,60	47	65	0,20	1967	23	33	0,38	1988	58	72	0,46	1988	50	59	0,57	46	54
TR	Normal	2038,80	59	90	0,19	2035	36	61	0,60	2040	73	90	0,40	2038	94	120	0,34	67	33
	Intermediária Modificada	1708,70	16	17	0,12	1707	17	17	0,02	1860	16	24	1,10	1863	15	22	0,59	70	30
TR	Normal	1818,50	19	29	0,12	1831	19	29	0,20	1829	23	34	0,60	1820	31	41	0,00	57	43
	Intermediária Modificada	1890,50	28	48	0,84	1886	24	43	0,89	1873	78	85	0,00	1885	79	87	0,00	51	49
TR	Normal	1750,20	6	7	0,47	1767	7	8	0,88	1754	8	10	1,92	1750	9	10	3,56	77	23
	Intermediária Modificada	1929,70	23	30	0,51	1930	12	12	0,74	1930	32	46	1,08	1928	42	59	0,77	26	74
		2017,80	23	34	1,70	2017	14	16	2,21	2003	117	176	0,53	2003	117	176	0,53	9	91

Fonte: Autora

Em geral, os valores de Mini-CBR para os corpos de prova rompidos sem imersão foram maiores do que aqueles que foram submetidos a imersão, conforme era esperado. Dentre os resultados apresentados pelos métodos de correlação e carga-padrão, este último apresentou valores de Mini-CBR mais altos, em concordância com diversos autores.

Comparando os valores do ensaio Mini-CBR com imersão e com sobrecarga padrão e os valores obtidos no ensaio CBR (Tabela 5.3), observa-se que, para os solos SC1, ALE1, RS e TR, nas três energias de compactação, os valores de suporte de carga são bem semelhantes.

Os coeficientes RIS e PSI são utilizados como parâmetros na avaliação tecnológica dos solos tropicais pela metodologia MCT. Determinados a partir dos resultados do ensaio de Mini-CBR, o RIS foi calculado através da Equação 4.6 e a perda de suporte por imersão, considerada o inverso do coeficiente anterior, foi definida pela subtração de 100% - RIS.

Analisando-se os resultados desses parâmetros, observa-se que, para os solos SC2, ALE2 e TR à medida em que aumenta a energia de compactação, há um decréscimo no coeficiente de suporte de carga e de maneira inversa, um acréscimo na perda de suporte por imersão.

De acordo com os valores estabelecidos na Figura 2.11, para a compactação na energia normal, os solos que apresentam valor de RIS maior que 30% são considerados solos com suporte de carga muito elevado, sendo assim, amostras de solos BOT2, SC1, PT2 e RS enquadram-se nesse grupo, apresentando valores de PSI medianos e baixos. Para esta energia, o maior valor de RIS foi o da amostra SC1 (91%), que, conseqüentemente, apresentou PSI=9%. E o menor suporte de carga foi o do solo PT1 (28%), apresentando perda de suporte de carga de 72%. Estando estes resultados em conformidade com as características apresentadas no quadro da Figura 2.12, para as classificações MCT desses materiais.

Para o emprego em camadas de base de pavimentos, segundo Nogami e Villibor (2001), os valores dos coeficientes devem ser de  $RIS \geq 40\%$  e  $PSI < 50\%$ , para a energia intermediária de compactação, sendo assim, dos solos em estudo, somente as amostras CAT2, SC1 e RS obtiveram resultados satisfatórios.

Os ensaios de Infiltrabilidade e Permeabilidade foram realizados com o intuito de complementar os estudos das características de solos tropicais através da

verificação de relações entre a gênese e as características das amostras em estudo e seus coeficientes de infiltrabilidade e permeabilidade.

A Tabela 5.12 apresenta os valores de log S (coeficiente de sorção), de v (velocidade de caminhamento da frente de umidade) e de log K (coeficiente de permeabilidade). O ensaio foi realizado conforme descrito no Capítulo 4, sendo os corpos de prova moldados nas três energias de compactação, em suas respectivas umidades ótimas.

Tabela 5.12 - Ensaio Infiltrabilidade e Permeabilidade

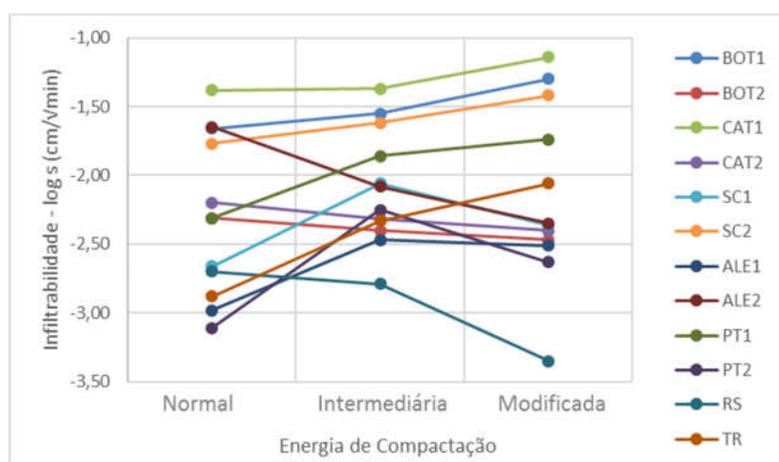
Solo	Energia de Compactação	Infiltrabilidade		Permeabilidade
		log s (cm/ $\sqrt{\text{min}}$ )	v (cm/ $\sqrt{\text{min}}$ )	log k (cm/s)
BOT1	Normal	-1,66	10,06	-6,39
	Intermediária	-1,55	10,14	-6,06
	Modificada	-1,30	9,79	-6,19
BOT2	Normal	-2,31	0,48	-6,52
	Intermediária	-2,40	0,48	-6,64
	Modificada	-2,47	0,48	-6,83
CAT1	Normal	-1,38	3,32	-5,13
	Intermediária	-1,37	3,31	-5,18
	Modificada	-1,14	5,48	-5,22
CAT2	Normal	-2,20	0,44	-5,23
	Intermediária	-2,32	0,44	-5,89
	Modificada	-2,40	0,43	-5,92
SC1	Normal	-2,66	5,56	-6,32
	Intermediária	-2,06	5,54	-6,63
	Modificada	-2,36	5,44	-6,76
SC2	Normal	-1,77	7,10	-7,17
	Intermediária	-1,62	7,16	-7,17
	Modificada	-1,42	7,21	-7,09
ALE1	Normal	-2,98	0,41	-6,93
	Intermediária	-2,47	0,40	-7,16
	Modificada	-2,51	0,40	-7,37
ALE2	Normal	-1,65	0,76	-6,82
	Intermediária	-2,08	0,36	-7,37
	Modificada	-2,35	0,37	-7,36
PT1	Normal	-2,31	1,42	-6,56
	Intermediária	-1,86	1,44	-6,66
	Modificada	-1,74	2,00	-6,69
PT2	Normal	-3,11	0,43	-6,78
	Intermediária	-2,25	0,53	-6,93
	Modificada	-2,63	0,44	-6,43
RS	Normal	-2,70	0,37	-7,24
	Intermediária	-2,79	0,38	-7,04
	Modificada	-3,35	0,37	-7,37
TR	Normal	-2,88	3,33	-6,92
	Intermediária	-2,33	3,31	-6,81
	Modificada	-2,06	3,38	-6,80

Analisando-se a Tabela 5.12, observa-se que, o solo BOT1 apresentou os valores mais elevados de velocidade de caminhamento de frente de umidade, sendo este resultado já esperado devido as características do material que foram apresentadas no decorrer deste trabalho.

De maneira geral, nota-se que, o aumento da energia de compactação não alterou significativamente as velocidades de caminhamento de frente de umidade obtidas.

Para melhor visualizar os valores obtidos no ensaio de infiltrabilidade, o gráfico da Figura 5.21 ilustra a variação do coeficiente de sorção com relação a energia de compactação, para cada solo estudado.

Figura 5.21 - Infiltrabilidade ( $\log s$ ) versus energia de compactação



Fonte: Autora

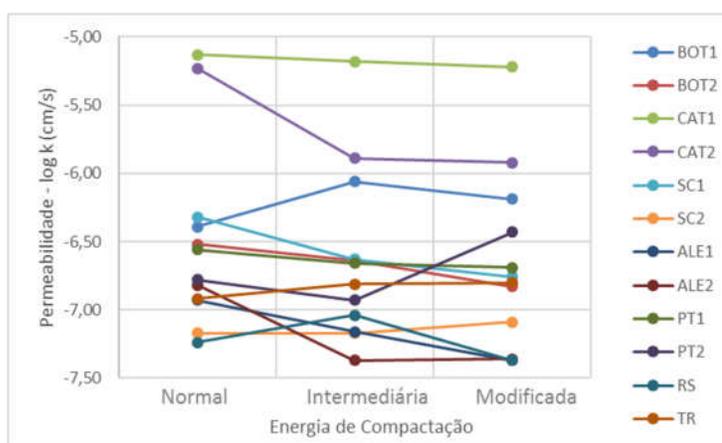
Analisando-se o gráfico acima, nota-se que, não há uma relação clara entre as características lateríticas dos materiais e a perda ou ganho da capacidade de sorção dos solos conforme o incremento da compactação. Têm-se como exemplos, o decréscimo no coeficiente de sorção, da energia normal para a modificada, do solo laterítico argiloso RS e o acréscimo para o solo TR.

Em relação aos valores estabelecidos na Figura 2.12, para a energia normal, os solos classificados como lateríticos (SC1, PT2, RS e TR) e os solos ALE1, PT1, CAT2 e BOT2 apresentaram coeficientes de sorção baixos. As demais amostras obtiveram coeficientes medianos. Entretanto, conforme os valores apresentados na

Figura 2.11, o resultado esperado para os solos da Formação Caturrita, BOT1, ALE1 e PT1, segundo o grupo da MCT da qual fazem parte, era um coeficiente de sorção elevado. Os demais solos apresentaram resultados coerentes com os parâmetros apresentados pela sistemática MCT.

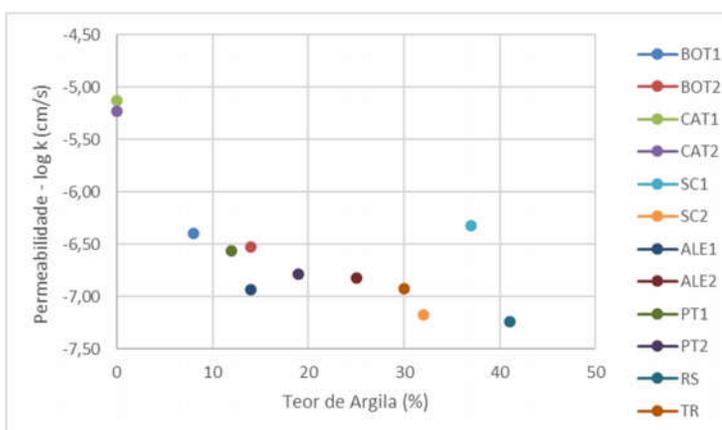
As Figuras 5.22 e 5.23 apresentam os valores dos coeficientes de permeabilidade ( $\log k$ ) para cada energia de compactação e a relação entre o teor de argila dos materiais e os valores de permeabilidade na energia de compactação normal.

Figura 5.22 - Coeficiente de permeabilidade ( $\log k$ ) versus energia de compactação



Fonte: Autora

Figura 5.23 - Coeficiente de permeabilidade ( $\log k$ ) na energia de compactação normal versus % de argila



Fonte: Autora

Em relação à energia de compactação, com o aumento do número de golpes, espera-se que ocorra uma redução dos vazios de ar e conseqüentemente uma redução da permeabilidade. Porém, analisando-se o gráfico da Figura 5.22, observa-se que, das doze amostras ensaiadas quatro (BOT1, SC2, PT2 e RS) não seguiram esse padrão.

Segundo os valores das propriedades ilustrados na Figura 2.12, os solos da Formação Caturrita apresentaram coeficiente de permeabilidade mediano e as demais amostras apresentaram permeabilidade baixa. Dessa forma, somente o solo BOT1 não apresentou o coeficiente esperado segundo a metodologia MCT.

A partir do gráfico na Figura 5.23, nota-se que, devido ao alto teor de argila, os solos SC2, RS, TR apresentaram os menores coeficientes de permeabilidade, havendo uma discrepância no valor da permeabilidade esperado para o solo SC1. Em contrapartida, os solos CAT1 e CAT2 apresentaram os maiores valores para o coeficiente  $k$ , indicando uma maior permeabilidade, conforme esperado, devido as características desses materiais apresentadas no decorrer do trabalho. No geral, à medida em que o teor de argila dos solos em estudos aumenta, há o decréscimo dos valores de permeabilidade.

## 5.9 COMENTÁRIOS FINAIS

Devido à quantidade de dados obtidos, acreditou ser de grande valia expor nessa seção uma síntese de todos os resultados.

A Tabela 5.13 apresenta um resumo dos parâmetros de caracterização, compactação, CBR, expansão e das classificações dos solos estudados nesta pesquisa, bem como os resultados dos ensaios complementares da metodologia MCT.

De acordo com o sistema de classificação universal – USCS, os solos das formações Rosário do Sul (SC1 e SC2) e Santa Maria/Alemoa (ALE1 e ALE2) e o solo RS foram classificados como argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade (CL), os solos BOT2, PT1 e TR foram designados como areias argilosas (SC), o solo BOT1 e os solos da Formação Caturrita (CAT1 e CAT2) foram classificados como areias siltosas (SM) e o solo PT2 foi designado como areia silto-argilosa (SM-SC).

Tabela 5.13 - Resultados dos ensaios

RESULTADOS DOS ENSAIOS TRADICIONAIS E DAS CLASSIFICAÇÕES													
Sigla dos Solos e Rochas Sedimentares estudados													
Parâmetros	BOT1	BOT2	CAT1	CAT2	SC1	SC2	ALE1	ALE2	PT1	PT2	RS	TR	
Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,698	2,695	2,670	2,690	2,810	2,743	2,725	2,742	2,755	2,703	2,737	2,720	
Limite de Liquidez (%)	NL	31	NL	NL	49	38	29	41	30	24	47	39	
Limite de Plasticidade (%)	NP	19	NP	NP	27	13	18	23	20	20	29	20	
Índice de Plasticidade (%)	NP	12	NP	NP	22	25	11	18	10	4	18	19	
Passante na peneira #200 (%)	10	18	10	9	55	74	66	49	36	36	55	43	
Classificação SUCS	SM	SC	SM	SM	CL	CL	CL	CL	SC	SM-SC	CL	SC	
Classificação TRB	A2-4	A2-6	A2-4	A2-4	A7-6	A6	A6	A7-6	A4	A4	A-7-6	A-6	
Classificação MCT	NA	NA'	NA	NA	LG'	NG'	NS'	NG'	NS'	LA'	LG'	LG'	
Classificação MCT-M	NA	TA'	NA	NA	LA'G'	NG'	TA'G'	TA'G'	TA'	LA'G'	LA'G'	LG'	
Classificação Expedida MCT	NA-NS'	NS'/NA'	NA-NS'	NA-NS'	LG'	NG'	NS'-NG'	NG'	NS'/NA'	LA'	LG'	LG'	
Classificação (S x CBR)	-	-	-	-	I	II	III	III	III	II	I	I	
Classificação (MCT)	III	II-III	III	III	II	II	II-III	II	II-III	II	II	II	
Resiliente (Preussler e Pinto)	A	A	A	A	II-I	II	III	I	II-I	II-I	I	I	
Módulo de Resiliência (MPa)	k1	2134,6	362,458	445,66	2663,9	700	42,991	137,45	53,3	1005,2	929,27	484,39	624,31
	k2	0,832	0,6991	0,5232	0,708	0,963	0,121	0,49	0,029	0,962	0,686	0,488	0,644
Modelo Composto	k3	0,344	0,0111	-0,020	0,227	-0,381	-0,423	0,075	-0,486	-0,057	-0,077	0,065	-0,202
Wótima (%)	EN	14,5	15,0	16,0	13,4	21,5	18,6	19,0	16,7	15,3	16,0	19,9	15,1
	EI	12,8	13,0	14,6	12,0	19,3	13,6	16,0	14,0	12,8	13,5	19,2	12,6
	EM	10,7	12,4	12,6	9,2	16,5	13,0	15,0	13,0	10,2	11,8	16,3	11,8
Y <sub>d</sub> máx (kg/m²)	EN	1835	1794	1690	1866	1648	1655	1748	1738	1810	1775	1647	1787
	EI	1930	1885	1792	1966	1783	1921	1872	1888	1955	1965	1792	1974
	EM	1985	1965	1878	1984	1887	1973	1938	1966	2045	2045	1861	2026
CBR com imersão (%)	EN	26	8	6	11	10	8	2	3	9	5	16	14
	EI	36	29	14	18	22	14	13	4	10	21	21	24
	EM	107	48	32	53	35	29	15	4	20	46	29	26
Expansão (%)	EN	0,78	0,41	0,00	0,01	0,20	4,91	0,24	2,62	0,51	0,06	0,18	0,27
	EI	0,50	0,48	0,00	0,00	0,24	8,05	0,39	4,48	1,25	0,10	0,14	0,21
	EM	0,60	0,63	0,00	0,00	0,28	9,36	0,41	4,81	2,58	0,13	0,06	0,91
RESULTADOS DOS ENSAIOS COMPLEMENTARES DA MCT													
Sigla dos Solos e Rochas Sedimentares estudados													
Parâmetros	BOT1	BOT2	CAT1	CAT2	SC1	SC2	ALE1	ALE2	PT1	PT2	RS	TR	
w ótima (%)	EN	14,5	15,0	15,8	13,4	21,5	18,2	19,0	16,6	15,3	15,2	19	15
	EI	12,8	12,8	14,4	11,9	19,0	13,7	16,0	13,9	12,5	11,6	16,5	13
	EM	11	12,0	12,4	9,3	16,3	13,0	15,0	13,0	10,0	10,8	15	11
Y <sub>d</sub> máx (kg/m²)	EN	1820	1786	1635	1861	1645	1765	1720	1700	1806	1865	1710	1785
	EI	1876	1876	1715	1950	1780	1915	1840	1880	1950	1990	1870	1930
	EM	1901	1940	1763	2045	1850	1972	1910	1934	2040	2040	1910	2020
Mini-CBR E+P (%)	EN	8	15	9	19	6	3	5	7	10	10	17	7
Cargas Padrão	EI	21	30	7	47	18	4	11	12	21	65	29	30
	EM	38	46	29	15	51	4	14	7	28	90	48	34
Expansão (%)	EN	0,04	0,20	0,00	0,00	0,47	4,41	0,20	1,89	0,91	0,10	0,12	0,47
	EI	0,05	0,15	0,06	0,00	0,24	4,14	0,77	2,88	1,59	0,20	0,12	0,51
	EM	0,02	0,28	0,04	0,02	0,49	5,20	1,29	3,93	0,99	0,19	0,64	1,70
Mini-CBR E (%)	EN	9	13	4	11	6	3	3	7	5	7	17	8
Cargas Padrão	EI	11	25	4	23	16	4	9	4	11	33	29	12
	EM	14	52	7	13	42	3	6	4	22	61	43	16
Expansão (%)	EN	0,08	0,18	0,14	0,00	0,45	6,79	0,58	1,60	1,46	0,63	0,02	0,88
	EI	0,10	0,26	0,08	0,06	0,38	4,49	1,57	2,42	3,36	0,38	0,20	0,74
	EM	0,02	0,28	0,04	0,00	0,56	6,00	2,98	6,20	2,40	0,60	0,89	2,21
Mini-CBR S+P (%)	EN	25	22	9	12	6	8	5	22	20	14	24	10
Cargas Padrão	EI	60	55	12	26	26	26	17	44	34	72	34	46
	EM	72	83	49	58	137	34	24	50	120	90	85	176
Contração (%)	EN	0,14	0,00	0,00	0,08	2,72	2,07	3,39	1,04	0,56	0,65	1,10	1,92
	EI	0,18	0,16	0,10	0,18	1,36	1,11	1,68	1,05	0,49	0,46	0,60	1,08
	EM	0,14	0,22	0,28	0,00	1,04	1,51	1,97	0,77	0,32	0,40	0,00	0,53
Mini-CBR S (%)	EN	27	16	7	6	13	10	7	22	14	13	22	10
Cargas Padrão	EI	50	49	5	29	41	23	22	61	24	59	41	59
	EM	47	72	14	46	79	20	39	64	100	120	87	176
Contração (%)	EN	0,08	0,12	0,16	0,16	1,45	2,22	2,59	1,07	0,94	0,67	0,59	3,56
	EI	0,18	0,12	0,22	0,04	2,20	1,11	1,92	0,60	0,36	0,57	0,00	0,77
	EM	0,14	0,18	0,26	0,04	1,07	1,16	1,84	0,51	0,23	0,34	0,00	0,53
RIS (%)	EN	39	63	49	86	91	36	61	34	28	48	70	77
	EI	18	45	34	86	62	15	49	10	33	46	57	26
	EM	20	63	15	23	31	8	27	8	18	67	51	9
PSI (%)	EN	61	37	51	14	9	64	39	66	72	52	30	23
	EI	82	55	66	14	38	85	51	90	67	54	43	74
	EM	80	37	85	77	69	92	73	92	82	33	49	91
Caminamento de frente de umidade - v log s (cm/vmin)	EN	10,06	0,48	3,32	0,44	5,56	7,10	0,41	0,76	1,42	0,43	0,37	3,33
	EI	10,14	0,48	3,31	0,44	5,54	7,16	0,40	0,36	1,44	0,53	0,38	3,31
	EM	9,79	0,48	5,48	0,43	5,44	7,21	0,40	0,37	2,00	0,44	0,37	3,38
Infiltrabilidade - log s (cm/vmin)	EN	-1,66	-2,31	-1,38	-2,20	-2,66	-1,77	-2,98	-1,65	-2,31	-3,11	-2,70	-2,88
	EI	-1,55	-2,40	-1,37	-2,32	-2,06	-1,62	-2,47	-2,08	-1,86	-2,25	-2,79	-2,33
	EM	-1,30	-2,47	-1,14	-2,40	-2,36	-1,42	-2,51	-2,35	-1,74	-2,63	-3,35	-2,06
Permeabilidade - log k (cm/s)	EN	-6,39	-6,39	-5,13	-5,23	-6,32	-7,17	-6,93	-6,82	-6,56	-6,78	-7,24	-6,92
	EI	-6,06	-6,06	-5,18	-5,89	-6,63	-7,17	-7,16	-7,37	-6,66	-6,93	-7,04	-6,81
	EM	-6,19	-6,19	-5,22	-5,92	-6,76	-7,09	-7,37	-7,36	-6,69	-6,43	-7,37	-6,80

Fonte: Autora

O sistema classificatório TRB, enquadrou os solos SC1, ALE2 e RS no grupo A-7-6 e os solos SC2, ALE1 e TR no grupo A-6, indicando, para ambos, materiais que não apresentam bom comportamento como subleito rodoviário. Característica também presente nos solos da Formação Santa Maria/Passo das Tropas (PT1 e PT2), os quais foram classificados no grupo A-4. Os solos da Formação Caturrita e o BOT1 foram enquadrados no grupo A-2-4 e o solo BOT2 no grupo A-2-6, sendo estes empregados na pavimentação devido ao bom comportamento apresentado como subleito rodoviário.

No que diz respeito ao peso específico real dos grãos, os solos apresentaram valores consistentes com a mineralogia de cada material. Quanto à plasticidade dos materiais, os solos da Formação Caturrita e a amostra BOT1 não apresentaram valores de IP, o solo PT2 apresentou baixa plasticidade e os solos BOT2, ALE1 e PT2, plasticidade média. Os demais solos, com índice de plasticidade variando entre 18% e 25%, foram caracterizados como materiais altamente plásticos.

Segundo a classificação MCT, os solos SC1, RS e TR apresentaram comportamento laterítico argiloso (LG'), sendo atribuído alta capacidade suporte, baixa permeabilidade e baixa expansão. O solo PT2 foi classificado com comportamento laterítico arenoso (LA'). Quando compactados adequadamente, esses solos apresentam ótimo comportamento como subleito, evidenciando a importância da classificação MCT no que se refere à solos tropicais. Os demais solos apresentaram comportamento não laterítico.

Ao analisar os resultados obtidos nas classificações MCT, MCT-M e a Expedita da MCT (método das pastilhas) para os solos em estudo, fica evidente a correspondência entre os resultados, principalmente no que diz respeito ao caráter laterítico e não laterítico dos materiais.

Em geral, as classificações resilientes dos solos, utilizando o método indireto, a classificação MCT e a proposta de Preussler e Pinto (1978), também apresentaram concordância entre si. Para o cálculo do módulo de resiliência, na maioria dos solos, o modelo que melhor caracterizou a deformabilidade dos materiais foi o modelo composto, conforme esperado, pois os solos apresentaram distribuições granulométricas contemplando as diversas frações e este modelo considera ambas as tensões, sendo o mais adequado.

No ensaio de CBR observa-se que, com o aumento do nível de energia de compactação, há um acréscimo nos valores de suporte, sendo que, todos os solos

apresentaram valores satisfatórios de CBR, segundo parâmetro do DNIT. Excetuando os solos SC2 e ALE2, os valores de expansão dos demais materiais foram inferiores à 2%, conforme esperado, devido a presença dos argilominerais caulinita e illita, observado nos valores de CTC obtidos na análise química dos solos.

Os valores de massa específica aparente máxima encontrados no ensaio Mini-Proctor foram menores que no ensaio Proctor, porém as umidades ótimas foram semelhantes, em concordância com diversos autores.

Analisando-se os resultados dos parâmetros RIS e PSI, observa-se que, para a energia normal de compactação, apenas o solo PT1 apresentou valores condizentes com os parâmetros estipulados pela norma DNER-CLA 259/96. Na energia intermediária, somente os solos CAT2, SC1 e RS obtiveram resultados satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos.

Em relação à expansão, segundo a classificação MCT, apenas os solos ALE1 e PT1, ambos NS', não apresentaram os resultados esperados. Todos os valores de contração dos solos em estudos foram condizentes com os parâmetros baseados na classificação MCT.

Comparando os valores do ensaio Mini-CBR com imersão e com sobrecarga padrão e os valores obtidos no ensaio CBR, observa-se que, para os solos SC1, ALE1, RS e TR, nas três energias de compactação, os valores de suporte de carga são bem semelhantes. Dentre os resultados apresentados pelos métodos de correlação e carga-padrão, este último apresentou valores de Mini-CBR mais elevados, em concordância com a literatura.

No ensaio de infiltrabilidade, para a energia normal, os solos da Formação Caturrita, BOT1, ALE1 e PT1 não apresentaram valores satisfatórios segundo o grupo da MCT da qual fazem parte. O aumento da energia de compactação não alterou significativamente as velocidades de caminamento de frente de umidade.

Em relação à permeabilidade, somente o solo BOT1 não apresentou o coeficiente esperado, para o restante dos solos, os resultados corroboraram as características apresentadas pela sistemática MCT. Em relação à energia de compactação, com o aumento do número de golpes, espera-se que ocorra uma redução dos vazios de ar e, conseqüentemente, uma redução da permeabilidade, porém, as amostras BOT1, SC2, PT2 e RS não seguiram esse padrão. Quanto ao teor de argila, no geral, à medida em que o teor de argila dos solos em estudos aumenta, há o decréscimo dos valores de permeabilidade.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou aprofundar os conhecimentos acerca dos perfis típicos de solos e rochas sedimentares das diferentes unidades geotécnicas da região de Santa Maria – RS, quanto à Metodologia MCT, objetivando conhecer as peculiaridades dos solos tropicais da região.

No presente capítulo são expostas as principais conclusões obtidas através do programa experimental proposto. Ao final, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1 CONCLUSÕES

A partir da apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foi possível concluir que:

- **Relativas aos ensaios tradicionais**

Os sistemas tradicionais de classificação dos solos - USCS e TRB - classificaram os solos das formações Rosário do Sul e Santa Maria/Alema e os solos RS e TR como solos argilosos, em que a presença elevada de finos resultou em categorização desfavorável para o emprego como subleito rodoviário. Categorização também imposta para as amostras da Formação Santa Maria/Passo das Tropas, classificadas como solos siltsos. Os solos das formações Caturrita e Botucatu são enquadrados no grupo das areias siltsos ou argilosas, sendo estes materiais empregados na pavimentação devido ao bom comportamento apresentado como subleito rodoviário.

A análise química mostrou a predominância do argilomineral caulinita na composição da maioria dos solos, corroborando a baixa expansão apresentada para os ensaios de CBR. O argilomineral illita está presente na composição dos solos BOT2, SC2 e ALE1, os quais apresentam maior CTC se comparados com os demais solos.

Em relação aos ensaios de CBR, todos os materiais apresentaram valores de capacidade de suporte de carga superiores ao descrito em norma, no que diz respeito à solos empregados em subleitos rodoviários ( $ISC \geq 2\%$ ). Porém, os solos SC2 e ALE2

apresentaram valores de expansão maiores que 2%, ultrapassando o limite exigido pelo órgão normativo para subleito.

- **Relativas ao módulo de resiliência e as classificações resilientes**

O modelo de resiliência que melhor se adequou, na maioria dos solos em estudo, foi o modelo composto, que considera o estado de tensões (confinante e desvio) atuantes no material. A exceção se deu para os solos granulares da Formação Botucatu e CAT1, nos quais o modelo com melhor correlação foi o da tensão confinante, proposta intencionalmente para este tipo de solo.

As classificações resilientes analisadas apresentaram, em geral, concordância nos resultados. Os solos SC1, RS e TR, por conterem as menores porcentagens de silte e  $CBR \geq 10\%$ , apresentaram comportamento Tipo I, podendo ser utilizados em camadas de pavimentos, como subleito, reforço do subleito e sub-base. Os solos SC2, PT1 e PT2 apresentaram comportamento regular. Os solos das Formações Botucatu e Caturrita e o solo ALE1 apresentaram a condição mais desfavorável, sendo classificados como Tipo III, não sendo recomendados para o emprego em pavimentação. Somente o solo ALE2 apresentou divergência entre os métodos, ao considerar a porcentagem de silte e o valor do CBR é tido como um solo ruim para o emprego em pavimentação e pela sua classificação MCT é considerado de regular a bom.

- **Relativas as classificações MCT**

Sendo o objetivo deste trabalho a classificação dos solos da região de Santa Maria - RS, conforme a metodologia MCT, nota-se a diferença quanto à caracterização do comportamento laterítico ou não dos solos de uma mesma formação geotécnica. Impossibilitando uma classificação MCT generalizada para cada formação, tendo em vista a extensa área estudada, sendo necessária uma maior amostragem de materiais para obtenção de uma classificação mais precisa.

Os solos PT2, SC1, RS e TR são classificados com comportamento laterítico, sendo o primeiro arenoso (LA') e os demais argilosos (LG'), sendo atribuído alta capacidade suporte, baixa permeabilidade e baixa expansão. Quando compactados adequadamente, esses solos apresentam ótimo comportamento como subleito,

podendo ser utilizados também, como base, reforço de subleito, aterro compactado, e revestimento primário. Contrariando as classificações tradicionais que definem esses solos como inadequados para uso na pavimentação, ficando evidente a importância dos estudos para solos tropicais e a classificação MCT.

Os demais solos apresentaram comportamento não laterítico, os solos da Formação Caturrita e o solo BOT1 são classificados como areias não lateríticas (NA), a amostra de solo BOT2 é enquadrado como solo não laterítico arenoso (NA'), as amostras PT1 e ALE1 são classificadas como solos não laterítico siltsos (NS') e os solos SC2 e ALE2 são considerados não lateríticos argilosos (NG'). Têm-se como características de solos não lateríticos o fato de que podem variar de extremamente plástico até não plástico, conforme apresentado pelos valores de IP, podem variar de altamente expansivos até muito contráteis. São bastante erodíveis e, geralmente, apresentam baixos valores de CBR e de módulo de resiliência.

Na classificação MCT-M, os solos BOT2, ALE1, ALE2 e PT1, que antes apresentavam caráter não laterítico, passaram a pertencer ao grupo dos solos transicionais. E as amostras de solo SC1, PT2 e RS foram enquadradas no mesmo grupo, sendo consideradas solos areno-argilosos lateríticos (LA'G').

Em geral, ao comparar as classificações geotécnicas para solos tropicais pela MCT e pelo método das pastilhas, conclui-se que, os solos estudados apresentaram concordância entre os resultados, principalmente no que diz respeito ao caráter laterítico e não laterítico de cada amostra. Mostrando a eficácia do método expedito das pastilhas na determinação do comportamento dos solos.

- **Relativas aos ensaios complementares da MCT**

O ensaio Mini-Proctor mostrou-se adequado para a determinação dos valores de massa específica aparente máxima e umidades ótimas de compactação, para as três energias, conforme as considerações realizadas por diversos autores.

Comparando os valores do ensaio Mini-CBR com imersão e com sobrecarga padrão e os valores obtidos no ensaio tradicional, observa-se que, para os solos SC1, ALE1, RS e TR, nas três energias de compactação, os valores de suporte de carga são bem semelhantes.

Dentre os resultados apresentados pelos métodos de correlação e carga-padrão, este último apresentou valores de Mini-CBR mais elevados, em concordância

com outros autores. Analisando-se os resultados dos parâmetros RIS e PSI, observa-se que, para a energia normal de compactação, apenas o solo PT1 apresentou valores condizentes com os parâmetros estipulados pela norma DNER-CLA 259/96. Na energia intermediária, os solos CAT2, SC1 e RS obtiveram resultados satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos.

Em relação à expansão, apenas os solos ALE1 e PT1, ambos NS', não apresentaram os resultados condizentes com a classificação MCT da qual fazem parte. Os valores de contração de todos os solos estiveram de acordo com os parâmetros estipulados pela metodologia MCT.

No ensaio de infiltrabilidade, quase a metade dos solos em estudo, CAT1, CAT2, BOT1, ALE1 e PT1, não apresentaram valores condizentes com o grupo da MCT da qual fazem parte. Em relação à permeabilidade, somente o solo BOT1, não apresentou o coeficiente esperado. Para o restante dos solos, os resultados corroboraram as características apresentadas pela metodologia MCT. Quanto ao teor de argila, no geral, à medida em que o teor de argila dos solos aumenta, há o decréscimo dos valores de permeabilidade.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a classificação MCT dos solos da região de MCT para uma amostragem maior, possibilitando o mapeamento geotécnico mais preciso da área pesquisada, tendo em vista a importância dessa ferramenta para organizar e pesquisar dados;

- Analisar mecanicamente, quanto à resistência e deformabilidade, os solos estudados para emprego como camada de subleito rodoviário;

- Estudar as deformações permanentes nos mesmos, como também a evolução (shakedown).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITANTE, E. **Proposta Metodológica de Mapeamento Geotécnico com o uso de Pedologia em Solos Tropicais Visando Obras Rodoviárias**. Dissertação de Mestrado. UFSC. Florianópolis/SC, 1997.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Designation TP 46/94, Standard Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Agregate Materials**. Washington, EUA, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Sction4: Construction, v.04.08: Soil and rock; dimension stone; geosynthetics. Philadelphia, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a. 8p. Origem: MB-28.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b. 13p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p. Origem: MB-33.

\_\_\_\_\_. **NBR 9895**: solo: índice de suporte Califórnia: método de ensaio. Rio de Janeiro: 1987, 13p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BARBOSA FILHO, J; VILAR, O. M.; BURGOS, P. C. **Otimização da classificação geotécnica MCT: tipologia multivariável de alguns solos tropicais**. TecBahia, Camaçari, v.14, n.3, 1999. 140p.

BARROS SARTORI, M. da G. **O clima de Santa Maria: do regional ao urbano**. Dissertação de Mestrado. USP. São Paulo, SP, 1979. 165p.

BARROSO, S. H. A. **Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária**. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 2002. 178p.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre, 1999. 251p.

\_\_\_\_\_; DIAS, R. D. **Caracterização e classificação MCT de solos de granitos e gnaisses de Porto Alegre**. In: 23ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Teresina, 1993. p.264-95.

\_\_\_\_\_; et al. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnicopesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande/RS, v. 1, p. 17- 26, 2000.

BERNUCCI, et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504 p.

BORTOLUZZI, C. A. **Contribuição à geologia da região de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil**. Pesquisas, Instituto de Geociências, UFRGS. Porto Alegre, RS, 1974. 100p.

CASAGRANDE, A. **Classifications and identification of soils**. In: American Society of Civil Enginners. Papers...EUA: ASCE, 1947. p.783-810.

CHAVES, F. J. **Caracterização geotécnica de solos da formação Barreiras da região metropolitana de Fortaleza para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OS THE ISSMFE. **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils**. ABMS. Progress Report. São Paulo, SP, 1985. 449p.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS. CPRM. **Mapa hidrogeológico da Folha de Santa Maria**. Escala 1:100.000, 1994.

CONTI, J. B.; FURLAN, S. A.; **Geoecologia: o clima, os solos e a biota**. In: Geografia do Brasil. São Paulo: editora da Universidade Federal de São Paulo, 2001.cap.2, p.69-207.

CÓRDOVA, H.; GUIMARÃES A. Avaliação e controle estrutural de pavimentos asfálticos utilizando deflectometria com uso de equipamento tipo FWD. In: 17ª Reunião de Pavimentação Urbana. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Porto Alegre, RS, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-CLA 259/96: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1996. 6 p.

\_\_\_\_\_. **Norma DNER - ME 256/94: Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão**. Rio de Janeiro, 1994b. 6 p.

\_\_\_\_\_. **Norma DNER - ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV**. Rio de Janeiro, 1994c. 14 p.

\_\_\_\_\_. **Norma DNER - ME 131/97: Solos – determinação do módulo de resiliência.** IPR/DNER/MT, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

\_\_\_\_\_. **Manual de Pavimentação.** 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ, 1996. 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 134/2010 – ME: pavimentação: solos: determinação do módulo de resiliência: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010a. 11 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de Pavimentação.** 3ª Edição. Rio de Janeiro, RJ, 2006. 274p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro, RJ, 1997. 212p.

\_\_\_\_\_. **Sistema Brasileiro de classificação de solos.** 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ, 2006. 306p.

FORTES, R. M.; ZUPPOLINI NETO, A.; MERIGHI, J. V. Proposta de normalização do método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. In: 11ª Reunião de Pavimentação Urbana. **Anais...** [S.l.:s.n.]. 2002.

FRANZOI, S. **Peculiaridades resilientes dos solos lateríticos e saprolíticos.** Dissertação de Mestrado em engenharia de transportes. Escola politécnica da Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 1990. 187p.

GODOY, H.; BERNUCCI, L. B. Localização de Jazidas de Solos, para Construção de Rodovias, com Auxílio de Mapas Pedológicos e de Método Expedito de Ensaio. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Universidade Mackenzie. São Paulo/SP, 2000.

\_\_\_\_\_. O método das pastilhas na compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos solos: um recurso didático. **Anais do XVI ANPET**, Natal, RN, 2002. P.145-156.

HEUKELOM, W.; KLOMP, A. J. G. **Dynamic Testing as a Mens of Controlling Pavements During and After Construction.** Proceedings, 1. Inter. Conf. Struct. Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, Univ. Michigan, EUA, 1962.

HICKS, R.G. **Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials.** Tese de PhD. Universidade da Califórnia, Berkeley, 1970.

MACÊDO, J. A. G. de. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** 1996. 455 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MACHADO C. C.; PIRES, J. M. M.; PEREIRA, R. S. Comportamento físico e ambiental de resíduos sólidos em pavimentos de estradas florestais. **Revista Árvore**, v.31, 2007. p.679-684.

MACIEL FILHO, C. L. **Caracterização geotécnica das formações sedimentares de Santa Maria**. 1977. 123 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1977.

\_\_\_\_\_. **Carta Geotécnica de Santa Maria**. Santa Maria: Imprensa Universitária UFSM, 1990.

MEDINA, F. **Mecânica dos Pavimentos**. 1ed, Editora UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

\_\_\_\_\_; PREUSSLER, E. S. Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. **Solos e Rochas**. Rio de Janeiro, RJ, 1980. v. 3, n.1, p.3-26.

NOBRE JUNIOR, E. F.; BARROSO, S. H. A.; ALDIGUERI, D. R.; LOIOLA, P. R. R. **Um primeiro estudo da aplicação do método MCT a alguns solos do Estado do Ceará**. In: XIII Congresso de pesquisa e ensino em transportes. **Anais...** [S.l.:s.n.], 1999. v1. p.253-61.

NOGAMI, J. S.; COZZOLINO, V. M. N. A identificação de solos tropicais: dificuldades e proposta de um método preliminar. In: 20ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Fortaleza, CE, 1985. p.113-134.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma Nova Classificação para Finalidades Rodoviárias**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Eng. COPPE/ABMS, Rio de Janeiro, 1981.

\_\_\_\_\_. Ampliação do uso da metodologia MCT no estudo de solos tropicais para pavimentação. 28ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Belo Horizonte, MG, 1994ª. v1, p.184-209.

\_\_\_\_\_. Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Foz do Iguaçu, PR, 1994b.

\_\_\_\_\_. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, SP, 1995. v1. 240 p.

\_\_\_\_\_. Interpretação da forma das curvas de deformação da metodologia MCT. In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Florianópolis, SC, 2001.

\_\_\_\_\_. Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia. VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. **Anais...** [S.l.:s.n.]. ABGE. Rio de Janeiro, RJ, 1996. v1, p.345-358.

OLIVEIRA, E. L. A. **Áreas de risco geomorfológico da bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria/RS: Zoneamento e Hierarquização**. Dissertação de Mestrado. UFSM. Santa Maria, RS, 2004. 141p.

PARSONS, A. W. **The rapid measurement of the moisture condition of earthwork material**. Transport and road research laboratory. Crowthorne, UK, 1976.

PASSOS, M. C. F. **Metodologia MCT aplicada aos solos arenosos finos lateríticos do Rio Grande do Sul visando Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre, RS, 2000.

\_\_\_\_\_; DIAS, R. D.; CERATTI, J. A. P. Aplicação da metodologia MCT a solos finos do Estado do Rio Grande do Sul. In: Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** [S.l.:s.n.]. São Paulo, 1991. v1, p.221-39.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D.; TAVARES, I. S.; RACHELLI, R. T.; LUZ, E. L. A importância da geologia nos problemas geotécnicos na região de Santa Maria. In: 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Ouro Preto, MG, 2002. 13p.

PREUSSLER, E. S. **Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso**. 1978. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1978.

\_\_\_\_\_; PINTO, S. Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência. In: 17ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Brasília, 1982.

RAUBER, A. C. C. **Diagnóstico ambiental urbano do meio físico de Santa Maria-RS**. Dissertação de Mestrado. UFSM. Santa Maria, RS, 2008. 97p.

ROBAINA, L. E. S.; OLIVEIRA, E. L. A.; PIRES, C. A. F. Estudo para instalação de aterro sanitário no município de Santa Maria – RS. In: 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. **Anais...** [S.l.:s.n.].Ouro Preto, MG, 2002. 13p.

SANTANA, H.; GONTIJO, P. R. A. Os materiais lateríticos na pavimentação de baixo custo. In: 22ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Maceió, 1987. p.850-899.

SANTOS, T. A. DOS. **Avaliação da resistência e deformabilidade de solos empregados em subleitos rodoviários do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. 150p.

SEED, H. B., MITRY, F. G., MONISMITH, C. L.; CHAN, C. K. Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated load tests. **National Cooperative Highway Research Program**: NCHRP, report n.35, 1962.

SILVA, L. F.; RIBEIRO, L. A. L.; AULICINO, M. **Caracterização de solos - métodos para ensaios correntes**. Boletim DER, Vol XVII, no 62, 314/350, São Paulo, 1950.

SILVA, T. O.; CARVALHO, A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; LANI, J. L.; OLIVEIRA, T. M. Sistemas de classificações geotécnicas de solos: estudo de caso aplicado à rodovia não pavimentada VCS 346, Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v.34, n.2. Viçosa, MG, 2010. p.313-321.

SOUZA, R. A. **Estudo comparativo dos ensaios de CBR e Mini-CBR para solos de Uberlândia/MG**. Dissertação de Mestrado. UFU. Uberlândia, MG, 2007.

SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologia MCT e resiliente**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1988. 276 p.

\_\_\_\_\_. **Tecnologia de solos tropicais**. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 1994.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; BELIGNI, M.; CINCERRE, J. R. **Pavimentos com Solos Lateríticos e Gestão de Manutenção de Vias Urbanas**. ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação e Univ. Federal de Uberlândia – Fac. de Eng. Civil. São Paulo, Brasil, 2000.

\_\_\_\_\_; et al. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 196 p.

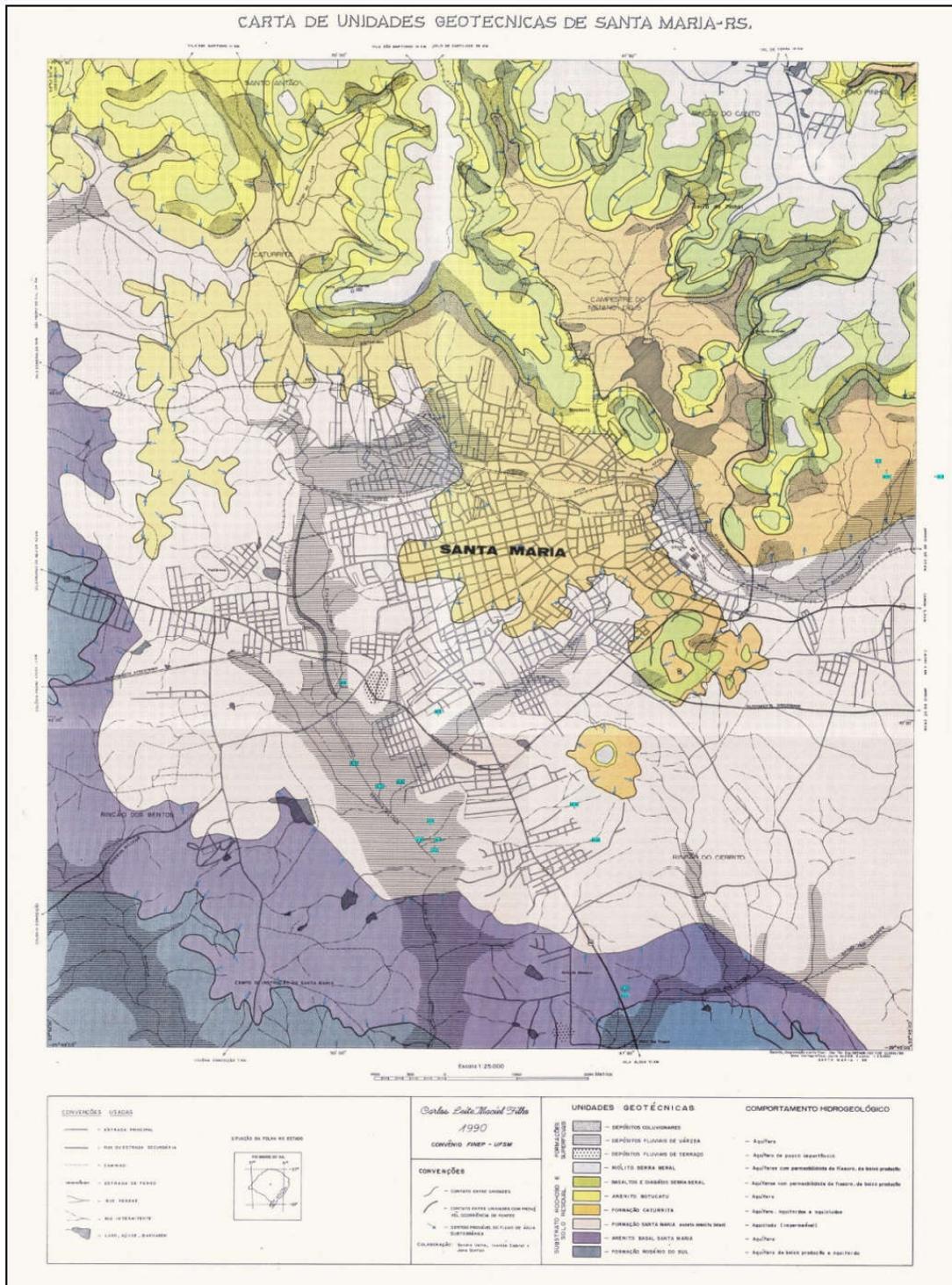
\_\_\_\_\_; NOGAMI, J. S. Aspectos fundamentais para uso adequado de SAFL em bases de pavimentos de baixo custo. In: 33ª Reunião Annual de Pavimentação. ABPv. **Anais...** [S.l.:s.n.]. Florianópolis, SC, 2001.

\_\_\_\_\_; NOGAMI, J.S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo, Arte & Ciência, 2009.

WIKIPEDIA, a Encyclopédia Livre. **Rio Grande do Sul**. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio\\_Grande\\_do\\_Sul](https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Grande_do_Sul). Acesso em: 26/10/2016.



**ANEXO B – CARTA DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS DE SANTA MARIA**



Fonte: Maciel Filho (1990)

## ANEXO C – LAUDO QUÍMICO: ALE1, ALE2, BOT1, BOT2, CAT1 e CAT2

	<b>MEC - Universidade Federal de Santa Maria</b> <b>Centro de Ciências Rurais - Departamento de Solos</b> Santa Maria/RS Cep:97 105-900 Fone: (55) 3220-8153 <a href="http://www.ufsm.br/sofos">http://www.ufsm.br/sofos</a>	 Departamento de Solos UFSM
	<b>Laudo de Análise de Solo</b>	

Nome: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Solicitante: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Município: SANTA MARIA

Endereço:

Localidade:

Entrada: 11/04/16

Emissão: 26/04/16

CPF/CNPJ: 456.700.210-53

Matrícula:

Registro	Cx.	Cel.	Identificação da amostra	Área (ha)	Sistema de cultivo	Prof. (cm)	Georef.
2575	C52	6	ALE 1-1				
2576	C52	7	ALE 2-2				
2577	C52	8	ROT 1-3				
2578	C52	9	ROT 2-4				
2579	C52	10	CAT 1-5				
2580	C52	11	CAT 2-6				

## Diagnóstico para acidez do solo e calagem

Registro	pH água 1:1	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efet.	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol <sub>d</sub> m <sup>-3</sup>				Al	Bases		
2575	7,8	31,7	4,9	0,0	0,9	36,7	0,0	97,7	7,4
2576	4,6	1,9	1,6	5,1	30,7	8,7	58,6	10,6	4,3
2577	4,8	4,9	3,7	1,9	3,1	10,5	18,1	73,5	6,3
2578	5	13,8	2,8	2,4	3,9	19,3	12,4	81,0	6,1
2579	5,9	5,5	3,6	0,0	0,9	9,1	0,0	91,0	7,4
2580	6,9	3,6	2,1	0,0	1,0	5,8	0,0	85,0	7,3

## Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S

Registro	% MO	% Argila	Textura	S	P-Mehlich	C Total*	K	CTC pH7	K
	m/v			mg/dm <sup>3</sup>		g/kg	cmol <sub>d</sub> m <sup>-3</sup>		mg/dm <sup>3</sup>
2575	0,2	13,0	4,0	10,0	17,1	-X-	0,123	37,6	48,0
2576	0,1	32,0	3,0	8,2	5,3	-X-	0,133	34,3	52,0
2577	0,1	8,0	4,0	8,3	5,3	-X-	0,082	11,7	32,0
2578	0,1	14,0	4,0	9,7	14,4	-X-	0,235	20,8	92,0
2579	0,1	3,0	4,0	8,6	10,1	-X-	0,082	10,0	32,0
2580	0,1	8,0	4,0	8,4	18,9	-X-	0,113	6,8	44,0

## Diagnóstico para micronutrientes e relações molares

Registro	Cu	Zn	B	Fe	Mn	Na	Relações Molares		
	mg/dm <sup>3</sup>						Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg) <sup>1/2</sup>
2575	0,144	0,627	0,1	-X-	-X-	-X-	6,5	297,60	0,02
2576	0,603	2,754	0,1	-X-	-X-	-X-	1,1	26,30	0,071
2577	0,206	1,587	0,1	-X-	-X-	-X-	1,3	103,90	0,028
2578	0,532	3,782	0,1	-X-	-X-	-X-	5	70,70	0,058
2579	0,09	0,751	0,1	-X-	-X-	-X-	1,5	110,00	0,027
2580	0,137	11,567	0,1	-X-	-X-	-X-	1,7	50,20	0,047

Vinculado à ROLAS-RS/SC



Assinatura digital

95-7F-9F-36-2E-8E-DC-64-6D-84-2C-44-A2-91-AA-AE

Para autenticar acesse <http://silas.ccr.ufsm.br>, em "Autenticar" informe a sequência acima.

Responsável técnico: Gustavo Brunetto (CREA/RS 204807)

Pagamento Realizado

\* Determinado em analisador elementar-combustão seca

## ANEXO D – LAUDO QUÍMICO: PT1, PT2, SC1 e SC2.

	<b>MEC - Universidade Federal de Santa Maria</b> <b>Centro de Ciências Rurais - Departamento de Solos</b> Santa Maria/RS Cep:97105-900 Fone: (55) 3220-8153 <a href="http://www.ufsm.br/solos">http://www.ufsm.br/solos</a>	 Departamento de Solos UFSM
	<b>Laudo de Análise de Solo</b>	

Nome: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Solicitante: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Município: SANTA MARIA

Endereço:

Localidade:

Entrada: 11/04/16

Emissão: 26/04/16

CPF/CNPJ: 456.700.210-53

Matrícula:

Registro	Cx.	Cel.	Identificação da amostra	Área (ha)	Sistema de cultivo	Prof. (cm)	Georef.
2581	C52	12	PT 1-7				
2582	C52	13	PT 2-8				
2583	C52	14	SC 1-9				
2584	C52	15	SC 2-10				

## Diagnóstico para acidez do solo e calagem

Registro	pH água 1:1	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efet.	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol/dm <sup>3</sup>					Al	Bases	
2581	4,8	1,9	1,8	2,7	6,9	6,6	40,9	36,4	5,6
2582	4,8	1,3	1,0	4,1	6,2	6,4	64,1	27,4	5,7
2583	5	0,7	0,8	3,2	12,3	4,8	66,7	11,4	5,1
2584	7,5	9,0	13,0	1,4	2,8	23,6	5,9	88,9	6,4

## Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S

Registro	% MO	% Argila	Textura	S	P-Mehlich	C Total	K	CTC pH7	K
	-----g/V-----	-----g/V-----		-----mg/dm <sup>3</sup> -----	-----mg/dm <sup>3</sup> -----	-----g/kg-----	-----cmol/dm <sup>3</sup> -----	-----mg/dm <sup>3</sup> -----	
2581	0,1	24,0	3,0	8,3	9,3	--X--	0,164	10,8	64,0
2582	0,1	28,0	3,0	12,0	3,7	--X--	0,072	6,5	28,0
2583	0,1	48,0	2,0	12,7	3,0	--X--	0,061	13,9	24,0
2584	0,1	27,0	3,0	9,0	4,5	--X--	0,205	25,0	80,0

## Diagnóstico para micronutrientes e relações molares

Registro	Cu	Zn	B	Fe	Mn	Na	Relações Molares		
	-----mg/dm <sup>3</sup> -----						Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg)=
2581	0,542	8,777	0,1	--X--	--X--	--X--	1,1	23,00	0,084
2582	0,799	3,971	0,1	--X--	--X--	--X--	1,3	31,40	0,048
2583	0,841	6,235	0,1	--X--	--X--	--X--	0,9	24,90	0,05
2584	0,1	1,453	0,1	--X--	--X--	--X--	0,7	107,40	0,044

Vinculado à ROLAS-RS/SC



Assinatura digital

A6-32-05-1D-14-D9-AD-F4-DE-B8-F4-37-3F-BF-20-36

Para autenticar acesse <http://silas.ccr.ufsm.br>, em "Autenticar" informe a sequência acima.

Responsável técnico: Gustavo Brunetto (CREA/RS 204807)

Pagamento Realizado

\* Determinado em analisador elemental-combustão seca