

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JANAINA FRESINGHELLI NETTO

**CLASSIFICAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DE SOLOS
ORIUNDOS DO MUNICÍPIO DE ALEGRETE/RS**

Alegrete

2018

JANAINA FRESINGHELLI NETTO

**CLASSIFICAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DE SOLOS
ORIUNDOS DO MUNICÍPIO DE ALEGRETE/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Maurício Silveira dos Santos

Alegrete

2018

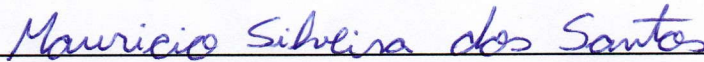
JANAINA FRESINGHELLI NETTO

**CLASSIFICAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DE SOLOS
ORIUNDOS DO MUNICÍPIO DE ALEGRETE/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29/06/2018.

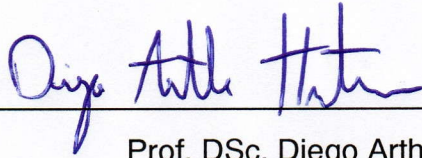
Banca examinadora:



Prof. Me. Maurício Silveira dos Santos

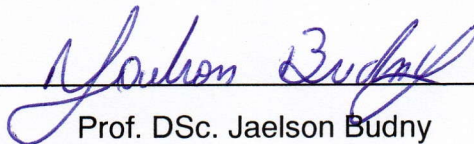
Orientador

Unipampa



Prof. DSc. Diego Arthur Hartmann

Unipampa



Prof. DSc. Jaelson Budny

Unipampa

Dedico este trabalho aos meus pais, Véra e Renato, e às minhas irmãs, Jainara e Jacinara. Família é a base de tudo!

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente à Deus, que em sua infinita sabedoria, me guiou e deu forças para não fraquejar perante os obstáculos.

Aos meus pais, Véra e Renato, que sempre me incentivaram a estudar e que hoje tenho consciência dos esforços que fizeram em prol de facilitar a caminhada de estudo das filhas. Com certeza absoluta, sem vocês eu não teria chegado tão longe nessa caminhada!

Às minhas irmãs, Jainara e Jacinara, que fizeram parte dessa caminhada. Jacinara, obrigada pela ajuda no laboratório!

Ao Prof. Me. Maurício Silveira dos Santos, pelos ensinamentos, pelos auxílios no laboratório, pelo empenho em sanar as dúvidas que surgiram no decorrer do trabalho e pela paciência.

Aos colegas e aos amigos que fiz durante o curso, tanto aqueles que tiveram uma rápida passagem pela Engenharia Civil quanto aos que tive um período maior de convivência durante a graduação.

Aos professores, que compartilharam seus conhecimentos e dedicaram seu tempo para que eu tivesse ferramentas para evoluir durante o curso. Faço um agradecimento especial ao Prof. DSc. Magnos Baroni, cujas aulas me motivaram a escolher a área de solos para o desenvolvimento do meu TCC.

“A vida é uma combinação de destino e livre-arbítrio. A chuva é o destino, a possibilidade de se molhar ou não, é escolha sua.”

Sri Sri Ravi Shankar

RESUMO

A grande diversidade de tipos de solo que podem ser encontrados, levam à necessidade de se conhecer as características físicas do material, previamente ao seu emprego. Em decorrência de os sistemas SUCS e TRB apresentarem limitações quando empregados para a classificação de solos tropicais, como os encontrados no Brasil, foi desenvolvida a Metodologia MCT. Porém quando o problema envolve a percolação de água, é necessário, também, o conhecimento da permeabilidade do material. Este trabalho visa apresentar a classificação de três solos provenientes do município de Alegrete/RS, com base nos sistemas SUCS e TRB, e na Metodologia MCT, além de avaliar a permeabilidade dos mesmos. Para a classificação de cada material segundo os sistemas SUCS e TRB realizaram-se os ensaios de limite de consistência e de granulometria por peneiramento e por sedimentação. Já para a classificação conforme a Metodologia MCT necessitou-se realizar o ensaio de compactação Mini-MCV e o ensaio de Perda de Massa por Imersão (Pi). Para o ensaio de permeabilidade, foram moldados corpos de prova dos quais obtiveram-se os coeficientes de permeabilidade (k) para cada solo. Com relação aos solos Campo, Rodovia e Caverá, os mesmos receberam as denominações de silte de baixa compressibilidade (ML), areia argilosa (SC) e areia argilosa (SC) respectivamente conforme o sistema SUCS e foram alocados no grupo A-4 (solos siltosos) do sistema TRB. Já a Metodologia MCT apontou o grupo de solo arenoso laterítico (LA') como classificação para os 3 solos trabalhados, enquanto o coeficiente de permeabilidade denotou aos materiais comportamento condizente com uma argila. As classificações obtidas através dos sistemas SUCS e TRB e da Metodologia MCT apresentam correlação entre si, assim como o coeficiente de permeabilidade (k) calculado para os solos condiz com os dados encontrados na literatura. Segundo dados referentes à Metodologia MCT, o solo LA' apresenta excelente desempenho quando empregado para fins construtivos.

Palavras-chave: classificação, SUCS, TRB, MCT, permeabilidade

ABSTRACT

The great diversity of soil types that can be found, demonstrate the need to know physical characteristics of material, previously to their use. As the Unified Soil Classification System (USCS) and the transportation Research Board (TRB), considered as traditional, present limitations when employed for the classification of tropical soils, like those found in Brazil, was developed the MCT Methodology. But when the problem involves the water percolation, it's also necessary the know of material permeability. This work aims present the classification of three soil samples from the municipality of Alegrete/RS, using the USCS and TRB systems, the MCT Methodology, in addition to evaluating the soils permeability. The laboratory tests were performed with deformed soil samples. For the classification of each material according to the USCS and TRB systems have been performed laboratory tests of consistency limits and determination of size distribution, by sieving and sedimentation. For the classification according the MCT Methodology needed perform the Mini-MCV compaction test and the loss of mass by immersion test. Already for the permeability test, were shaped test bodies and has obtained permeability coefficient of each sample. The *Campo*, *Rodovia* and *Caverá* soils, received designation of clay of low plasticity (CL), clayey sand (SC) and clayey sand (SC) according to the USCS, were allocated to the group A-4 (silty soils) of the system TRB, already the MCT Methodology classified soils as lateritic sandy soil (LA'), lateritic clayey soil (LG') and lateritic clayey soil (LG'), while the permeability coefficient denoted to soil behavior of clay, respectively. The classifications found through USCS and TRB systems and the MCT Methodology have correlation, as well as the permeability coefficient calculated for the soils is compatible with data found in literature. According to the MCT Methodology, LA' soil has an excellent performance where applied for constructive purposes.

Keywords: classification, USCS, TRB, MCT, permeability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Influência da zona climática na intensidade do intemperismo	21
Figura 2 - Mapa de solos do estado do Rio Grande do Sul.....	30
Figura 3 - Curvas de distribuição granulométrica dos solos SL (média) e HA. Sedimentação com solução de hexametáfosfato de sódio	40
Figura 4 - Distribuição granulométrica por sedimentação das amostras SL06 e SL16, com e sem uso do defloculante.....	40
Figura 5 - Fluxograma com os ensaios executados	44
Figura 6 - Localização das áreas de coleta dos solos.....	45
Figura 7 - Material utilizado para destorroar o solo	46
Figura 8 - Processo de quarteamento do solo.....	46
Figura 9 - Ensaio de teor de umidade	47
Figura 10 - Peneira de 2 mm de abertura no agitador mecânico	49
Figura 11 - Preparação do solo para o ensaio de sedimentação	49
Figura 12 - Aparelho dispersor	50
Figura 13 - Ensaio de sedimentação.....	51
Figura 14 - Materiais empregados na preparação da pasta de solo	52
Figura 15 - Aparelho de Casagrande	53
Figura 16 - Ensaio do limite de liquidez.....	54
Figura 17 - Placa esmerilhada com cilindro guia.....	55
Figura 18 - Ensaio de LP.....	56
Figura 19 - Calibração do picnômetro	57
Figura 20 - Picnômetro e solo preparado para o ensaio de massa específica	58
Figura 21 - Picnômetro com conteúdo até a marca de referência.....	59
Figura 22 - Carta de plasticidade	59
Figura 23 - Esquema para classificação pelo SUCS.....	60
Figura 24 - Porções de solo acondicionadas em sacos de polietileno	63
Figura 25 - Ensaio Mini-MCV	64
Figura 26 - Corpo de prova deslocado do interior do molde	65
Figura 27 - Introdução de água no recipiente de imersão	66
Figura 28 - Gráfico Mini-MCV x Δh	67
Figura 29 - Gráfico MEAS x Teor de Umidade.....	68

Figura 30 – Gráfico para a classificação MCT.....	69
Figura 31 - Montagem do permeâmetro.....	71
Figura 32 - Permeômetros fixados e com a mangueira de alimentação	71
Figura 33 - Ensaio de permeabilidade.....	72
Figura 34 - Curvas granulométricas dos solos Campo, Rodovia e Caverá	76
Figura 35 – Classificação do solo Campo pelo sistema SUCS	78
Figura 36 - Classificação dos solos Rodovia e Caverá pelo sistema SUCS	79
Figura 37 - Ábaco para a classificação dos solos pela Metodologia MCT	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de permeabilidade.....	33
Tabela 2 - Resultados dos ensaios geotécnicos de granulometria, limites de Atterberg e peso específico dos grãos.....	35
Tabela 3 - Índices classificatórios e classificação MCT.....	35
Tabela 4 - Determinação do grupo MCT conforme metodologia expedita	39
Tabela 5 - Limites de consistência para o solo SL	41
Tabela 6 – Identificação do solo SL no grupo MCT conforme metodologia expedita	41
Tabela 7 - Classificação dos solos pelo sistema TRB.....	42
Tabela 8 - Classificação dos solos SL e HA conforme o sistema TRB e a metodologia MCT	42
Tabela 9 - Classificação dos solos para uso em pavimento rodoviário	43
Tabela 10 – Limites de Atterberg e massa específica dos grãos	75
Tabela 11 - Dados do ensaio de granulometria por peneiramento e valor de IG dos solos.....	77
Tabela 12 – Classificação dos solos Campo, Rodovia e Caverá pelo sistema TRB.	80
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de Mini-MCV e Perda de massa por imersão do solo Campo	81
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de Mini-MCV e Perda de massa por imersão do solo Rodovia	82
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Mini-MCV e Perda de massa por imersão do solo Caverá	83
Tabela 16 - Parâmetros para a classificação pela Metodologia MCT	84
Tabela 17 - Resultado do ensaio de permeabilidade para o solo Campo	86
Tabela 18 - Resultado do ensaio de permeabilidade para o solo Rodovia	87
Tabela 19 - Resultado do ensaio de permeabilidade para o solo Caverá	87
Tabela 20 - Índice de vazios, grau de saturação e dados para o cálculo	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação dos parâmetros utilizados nos sistemas SUCS e TRB	26
Quadro 2 - Comparação entre TRB e SUCS.....	26
Quadro 3 - Comparação entre SUCS e TRB.....	27
Quadro 4 - Ensaio da Sistemática MCT	32
Quadro 5 - Subdivisões dos solos lateríticos e não lateríticos	32
Quadro 6 - Resultados das classificações geotécnicas SUCS, TRB, classificação MCT, classificação pedológica e características do greide da estrada	36
Quadro 7 - Agrupamentos possíveis para os solos analisados nos sistemas SUCS e TRB e na Metodologia MCT	37
Quadro 8 - Agrupamento de solos, segundo Nogami e Villibor (1995), entre a Metodologia MCT e os Sistemas SUCS e TRB	37
Quadro 9 - Esquema para a classificação pelo TRB.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δh – variação de altura

A-4 – solos siltosos

cm – centímetro

CP – Corpo de Prova

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

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

e – Índice de vazios

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nation*

Fc – Fator de correção

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG – Índice de Grupo

IP – Índice de Plasticidade

k – coeficiente de permeabilidade

$k_{\text{médio}}$ – coeficiente de permeabilidade médio

L – Laterítico

LA' – solo arenoso laterítico

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCT – Miniatura Compactada Tropical

m/s – metros por segundo

MEAS – Massa Específica Aparente Seca

ML – silte de baixa compressibilidade

N – Não laterítico

Pi – Perda de massa por imersão

S – Grau de saturação

SC – areia argilosa

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

TCC – Trabalho de conclusão de curso

TRB – *Transportation Research Board*

Unipampa – Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivo Específico.....	19
1.2 Justificativa.....	20
1.3 Estrutura do trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Formação dos solos	21
2.2 Classificações Preliminares	22
2.2.1 Classificação pela origem	22
2.2.2 Classificação tátil e visual	23
2.2.3 Classificação por Horizontes	23
2.3 Sistemas de classificação SUCS e TRB	24
2.3.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS	24
2.3.2 Sistema de classificação Rodoviária – TRB	25
2.3.3 Comparação entre os Sistemas SUCS e TRB.....	25
2.3.4 Limitações de uso dos Sistemas SUCS e TRB para solos tropicais	27
2.4 Classificação para solos tropicais.....	28
2.4.1 Solos tropicais.....	28
2.4.2 Solos do Rio Grande do Sul	29
2.4.3 Metodologia MCT.....	31
2.5 Permeabilidade.....	33

2.6 Casos práticos.....	34
2.6.1 Sistemas de classificações geotécnicas de solos: Estudo de caso aplicado à rodovia não pavimentada VCS 346, Viçosa, MG.....	34
2.6.2 Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais: Estudo de caso.....	38
3 METODOLOGIA	44
3.1 Coleta e preparação das amostras	44
3.2 Ensaio de teor de umidade.....	47
3.3 Classificação das amostras pelos sistemas SUCS e TRB.....	48
3.3.1 Ensaio de granulometria.....	48
3.3.2 Ensaio de Limite de Liquidez	52
3.3.3 Ensaio de Limite de Plasticidade	54
3.3.4 Ensaio de massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm.....	56
3.3.5 Sistema Unificado de Classificação de Solos	59
3.3.6 <i>Transportation Research Board</i>.....	61
3.4 Ensaio para a classificação das amostras através da Metodologia MCT ..	62
3.4.1 Ensaio Mini-MCV	62
3.4.2 Perda de massa por imersão.....	65
3.4.3 Metodologia MCT.....	67
3.5 Ensaio de permeabilidade	69
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
4.1 Ensaio de caracterização.....	75
4.2 Classificação dos solos pelos sistemas SUCS e TRB	77
4.3 Classificação dos solos pela Metodologia MCT	80

4.4 Permeabilidade dos solos	86
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
6 CONCLUSÕES	92
7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	93
REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material de construção de grande importância para a engenharia civil, apresentando-se de forma muito diversificada ao redor do mundo, em decorrência de seus fatores ambientais de formação. Segundo Pinto (2006) para o emprego do solo em obras de engenharia é necessário que o material seja classificado de acordo com seus parâmetros físicos, com o objetivo de estimar o provável comportamento do mesmo, ou ao menos servir de orientação para a adequada análise de um problema.

Os sistemas de classificação de solos mais difundidos ao redor do mundo são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e o *Transportation Research Board* (TRB), sendo que ambos fazem uso dos limites de consistência e da granulometria do solo. Entretanto, conforme observado por Villibor et al. (2009) tais sistemas foram desenvolvidos para solos de clima frio e temperado, apresentando deficiências quando aplicados a solos formados sob o domínio tropical, como é o caso do Brasil. Como uma alternativa ao uso dos sistemas SUCS e TRB, os pesquisadores Nogami e Villibor propuseram o emprego da Metodologia MCT para solos tropicais. Dentre os ensaios disponíveis para solos na Metodologia MCT está o ensaio de permeabilidade.

Segundo Machado e Vilar (2015), a perda de água pela fundação ou corpo de uma barragem é um exemplo de situação prática da engenharia que requer o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, assim como das condições de contorno do problema. A identificação e classificação dos solos, a serem empregados nestas e em outras obras de engenharia, são de fundamental importância para os estudos preliminares. Além disso, a FAO (2011) esclarece que para a correta seleção dos materiais a serem utilizados, é necessário que sejam executados testes laboratoriais, que apesar de apresentarem um custo elevado são justificados pela importância dos resultados nos estudos preliminares.

O conhecimento das características físicas do solo por meio dos sistemas SUCS e TRB bem como através da Metodologia MCT, são de fundamental importância para os estudos preliminares ao emprego do solo como material de construção. Assim como o conhecimento da permeabilidade do solo é fundamental

para a correta seleção do material, apresentando correspondência com o tipo de solo classificado por meio dos sistemas.

Este trabalho de pesquisa objetiva avaliar de forma geral os solos encontrados na região de Alegrete/RS com relação a permeabilidade e os sistemas de classificação SUCS e TRB, além da Metodologia MCT, para o posterior emprego dos materiais em obras de engenharia. De forma específica, o intuito deste trabalho é encontrar a correlação entre as classificações obtidas por meio do emprego dos sistemas SUCS, TRB e Metodologia MCT para cada solo estudado, assim como correlaciona-las com a permeabilidade dos solos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma avaliação de solos encontrados na região de Alegrete/RS com relação a permeabilidade e a classificação dos mesmos, por meio do emprego dos sistemas SUCS e TRB, e da Metodologia MCT, visando sua posterior utilização em obras de engenharia.

1.1.2 Objetivo Específico

- Comparar os resultados obtidos entre os sistemas SUCS e TRB, e entre os referidos sistemas e a Metodologia MCT;
- Correlacionar a permeabilidade dos solos com a classificação atribuída aos mesmos por meio da Metodologia MCT;
- Comparar os resultados obtidos com os trabalhos apresentados no item casos práticos;
- Correlacionar a classificação obtida para os solos, por meio da Metodologia MCT e do coeficiente de permeabilidade, com aplicações práticas para os materiais.

1.2 Justificativa

A FAO (2015) aponta que a localização da área de empréstimo impacta diretamente na construção de uma obra de engenharia, principalmente em aspectos econômicos, uma vez que, quanto maior a distância de transporte a ser percorrida, maiores serão os custos com a construção, maior será o desgaste do maquinário assim como o tempo necessário para a execução da obra. Desta forma, a escolha de áreas de empréstimo o mais próximo possível do local de construção representará ganhos para a obra.

O solo é provavelmente o material de construção mais antigo a ser utilizado pelo homem e ao mesmo tempo o mais barato e abundante na face da Terra. Em decorrência do apresentado, aliado ao fato de a região de Alegrete/RS apresentar potencial agrícola, a construção de barragens de terra assim como o melhoramento de estradas rurais não pavimentadas, viria a contribuir com o desenvolvimento das práticas agrícolas.

Sendo assim, a classificação dos solos por meio dos sistemas SUCS e TRB, e da Metodologia MCT fornecem uma estimativa do comportamento do solo, através da classificação dos mesmos nas categorias estabelecidas por cada sistema, enquanto a avaliação da permeabilidade torna-se um complemento aos resultados oriundos dos sistemas de classificação. Justificando, desta forma, o estudo dos solos da região, tendo como base a classificação por meio de sistemas assim como a análise da permeabilidade.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi elaborado através de 3 etapas básicas, sendo a primeira delas a revisão bibliográfica, na qual foram apresentados os sistemas de classificação SUCS, TRB e Metodologia MCT, além do ensaio de permeabilidade do solo. A segunda etapa do trabalho consistiu na coleta das amostras de solo, bem como na execução dos ensaios pertinentes a obtenção da classificação das mesmas, por meio dos sistemas supracitados, além da realização do ensaio de permeabilidade. Já a terceira e última etapa, foi a análise dos resultados, sendo que nesta fase foram realizadas, efetivamente, a classificação das 3 amostras ensaiadas, tendo como base os dados obtidos nos ensaios laboratoriais.

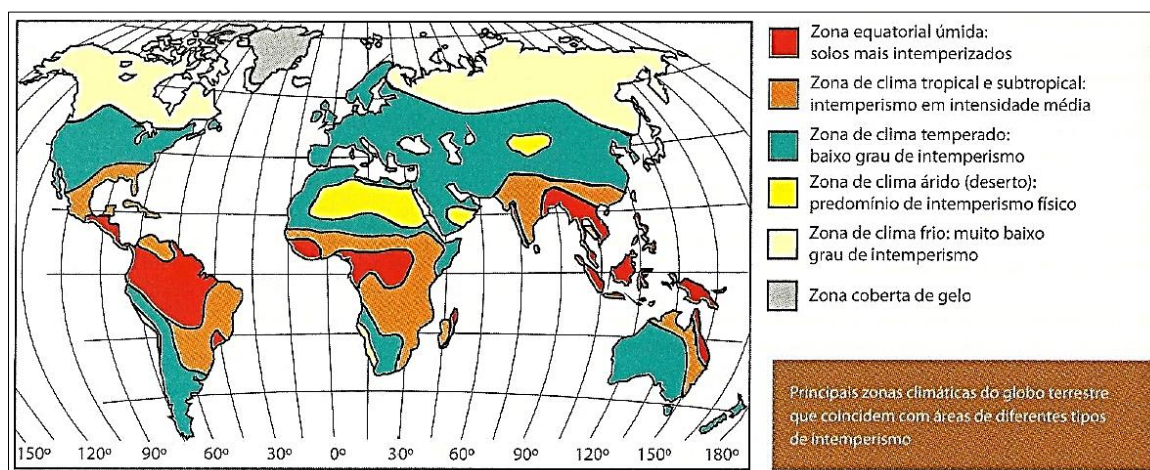
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Formação dos solos

Os solos são formados pelo processo denominado intemperismo ou meteorização. O intemperismo é um processo que ocorre de duas formas principais, por desintegração mecânica e por decomposição química. Regiões onde há escassez de água, como nos desertos, o intemperismo físico atua mais fortemente sobre a formação rochosa que o intemperismo químico e o oposto ocorre em regiões úmidas e quentes (CAPUTO, 1988; LEPSCH, 2010).

Na Figura 1 tem-se a representação das principais zonas climáticas do globo terrestre com as respectivas intensidades do intemperismo atuante sobre elas.

Figura 1 - Influência da zona climática na intensidade do intemperismo



Fonte: Lepsch (2010, p.64)

Segundo Luchese, Favero e Lenzi (2001), o intemperismo físico, também designado como desintegração, é caracterizado pela ação de fenômenos físicos sobre a rocha de origem, assim promovendo a fragmentação da mesma sem que ocorra alteração química em sua composição. De acordo com Caputo (1988), os agentes responsáveis pelo intemperismo físico são a água, a temperatura, a vegetação e o vento.

Caputo (1988) define o intemperismo químico, também denominado de decomposição, como sendo o processo que promove modificação química ou mineralógica na formação rochosa de origem, sendo que, conforme Lepsch (2010) a principal causa do intemperismo químico é a ação da água, que nunca é pura e que

sempre contém certas quantidades dissolvidas de oxigênio, gás carbônico e substâncias orgânicas derivadas do ar, bem como da respiração de organismos.

De acordo com Toledo, Oliveira e Melfi (2009), quando no processo de formação do solo ocorre a participação da ação física ou bioquímica, decorrente de organismos vivos ou do material orgânico originado da sua decomposição, o intemperismo atuante é denominado de físico-biológico ou químico-biológico. Segundo Suguio (1980) o intemperismo biológico pode desenvolver-se de forma a contribuir na atuação dos processos essencialmente químicos ou físicos, agindo como um facilitador para o trabalho dos mesmos.

Cabendo destacar que a formação de solos residuais, provenientes da decomposição da rocha cujos sedimentos não sofrem transporte, é muito comum no Brasil. Apresentando como explicação o fato de que o clima brasileiro apresenta as características climáticas necessárias para a atuação do intemperismo químico, visto que é o responsável pela concepção deste tipo de solo (LAMBE; WHITMAN, 1969; ORTIGÃO, 2007).

2.2 Classificações Preliminares

Caracterizam-se como meios de se classificar um solo sem o emprego de ensaios laboratoriais específicos, sendo possível atribuir certas características aos solos no próprio local de coleta dos mesmos.

2.2.1 Classificação pela origem

Classificar um solo através de sua origem pode ser considerado um importante instrumento para a identificação das ocorrências e para o compartilhamento de conhecimentos adquiridos. Conforme sua origem os solos podem ser classificados em dois grandes grupos, sendo eles os solos residuais e os solos transportados ou sedimentares (PINTO, 2006).

Lambe e Whitman (1969) definem solo residual como o material proveniente da decomposição da rocha em que seus sedimentos não sofrem transporte, sendo desta forma acumulados no próprio local de origem. Segundo Pinto (2006) o solo sedimentar

é definido como o material que sofreu transporte, por meio de algum agente, de sua área de origem para o seu local atual, sendo o agente transportador o responsável pelas características que o solo irá apresentar.

Observa-se que dentre os solos sedimentares uma variedade especial é o solo orgânico, cuja formação dá-se através da decomposição de matéria de origem animal ou vegetal. Os solos orgânicos são materiais de fácil identificação em decorrência da coloração escura e de seu odor característico, além disso, de forma geral são problemáticos por apresentarem alta compressibilidade (DNIT, 2006; PINTO, 2006).

2.2.2 Classificação tátil e visual

Conforme Pinto (2006), o uso da identificação tátil e visual possibilita estimar o tipo de solo, bem como, o estado em que o material se encontra. Para tal identificação é necessário sentir a reação do solo ao manuseio.

A quantidade de partículas grossas presentes no solo é um primeiro aspecto a ser avaliado. Para a identificação dos pedregulhos é realizada uma análise visual, pois são de fácil reconhecimento, enquanto que para os grãos de areia é realizada uma identificação tátil, estando os mesmos com certo teor de umidade. Já para se estimar a quantidade de finos contidos em uma pequena amostra de solo em seu estado seco, deve-se friccionar uma porção da amostra sobre uma folha de papel, desta forma, as partículas finas irão impregnar-se na folha, enquanto as grossas ficarão isoladas (PINTO, 2006).

2.2.3 Classificação por Horizontes

O intemperismo age de forma a promover transformações na rocha, gerando faixas de solo que irão arranjar-se em horizontes aproximadamente paralelos a superfície do terreno. Sendo que em pedologia, o conceito de horizontes remete as camadas que compõe um perfil de solo (CAPUTO, 1988; ALMEIDA, 2005).

O IBGE (2007), aponta que é necessário estudar o perfil de solo no seu local de origem para que se possa identificar suas características e posteriormente poder descrevê-lo. Lepsch (2010) comenta que um perfil de solo considerado completo e

bem desenvolvido é formado por cinco tipos de horizontes, que comumente são chamados de horizontes principais e identificados com as letras maiúsculas O, A, E, B e C. Segundo Campos (2009), quanto maior o número de horizontes, bem como a espessura de cada um, mais maduro será o perfil de solo.

2.3 Sistemas de classificação SUCS e TRB

De acordo com Caputo (1988), o Sistema Unificado de Classificação de Solos e o *Transportation Research Board* são os sistemas classificatórios considerados tradicionais e mais difundidos ao redor do mundo, sendo baseados na granulometria e nos índices de consistência do solo. Segundo Das (2010) o SUCS é normalmente o escolhido para obras geotécnicas, enquanto o sistema TRB é o mais utilizado nos EUA, ao que tange à obras rodoviárias nos estados e municípios.

2.3.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS

Unified Soil Classification System (USCS) ou Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) é atualmente empregado, principalmente, por geotécnicos que trabalham com barragens de terra. O SUCS faz uso de propriedades como textura e plasticidade do solo para classificá-lo, uma vez que os mesmos são agrupados conforme seu comportamento para quando empregados em estradas, aeroportos, aterros e fundações (DNIT, 2006; PINTO, 2006).

No SUCS os solos são divididos basicamente em solos de granulometria grossa, solos de granulometria fina e em solos altamente orgânicos. Os dois primeiros são identificados através do ensaio de granulometria e o último por meio de um exame visual (CAPUTO, 1988; DNIT, 2006).

Com base na composição granulométrica, os solos grossos podem ser classificados como bem graduados ou mal graduados, sendo considerado mal graduado o solo com predominância de determinado diâmetro de partícula e bem graduado o solo que apresenta partículas de diversos diâmetros, visto que o último oferece o melhor comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Para enquadrar um solo granular como bem graduado ou mal graduado, faz-se uso do coeficiente de

não uniformidade (CNU), que expressa a amplitude de tamanho dos grãos e do coeficiente de curvatura (CC), que é responsável por fornecer uma ideia de como será a curva granulométrica, assim como detectar eventuais descontinuidades (PINTO, 2006).

Segundo o DNIT (2006), os solos finos são subdivididos conforme o valor do seu limite de liquidez (LL). Assim sendo, o material poderá ser classificado como de baixa plasticidade ou de alta plasticidade e ainda cabe salientar que os solos altamente orgânicos não admitem subdivisões.

2.3.2 Sistema de classificação Rodoviária – TRB

O sistema que hoje é denominado de *Transportation Research Board* (TRB), foi originalmente desenvolvido na década de 20 pelo *US Bureau of Public Road*, como uma adaptação de trabalhos de Terzaghi e Hogentogler (NUNES, 2010).

Conforme o DNIT (2006), o sistema TRB realiza a classificação do solo através de dados provenientes do ensaio de granulometria, do ensaio de LL, do índice de plasticidade (IP) e do índice de grupo (IG) do solo. Já Pinto (2006) esclarece que tal sistema de classificação de solos é o mais empregado ao redor do mundo ao que concerne à obras viárias.

Assim como no SUCS, o sistema TRB separa os solos em dois grandes grupos, os de granulometria grossa e os de granulometria fina. Os solos grossos abrangem os grupos A-1, A-2 e A-3, já os solos finos compreendem os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 (CAPUTO, 1988; PINTO, 2006).

Caputo (1988) aponta que a inserção do chamado índice de grupo, definido como um número inteiro entre 0 e 20, que diz sobre a capacidade de suporte do solo de fundação de um pavimento, foi uma importante modificação realizada na classificação primitiva do *Public Roads*.

2.3.3 Comparação entre os Sistemas SUCS e TRB

No Quadro 1 é apresentada uma comparação entre os sistemas SUCS e TRB, fazendo uso de algumas de suas características para tal.

Quadro 1 - Comparação dos parâmetros utilizados nos sistemas SUCS e TRB

Comparações ou parâmetros		SUCS	TRB
Base da classificação		Textura e plasticidade do solo	
Divisões granulométricas	Principais	Solos Grossos e Solos Finos	
	Peneira utilizada para a separação das frações	#200 (0,075 mm)	
	Solo Fino	% passante # 200 > 50	% passante # 200 > 35
	Solo Grosso	% passante # 200 < 50	% passante # 200 < 35
	Peneira utilizada para separar areia e pedregulho	#4 (4,8 mm)	#10 (2 mm)
	Solos contendo pedregulho e areia	Claramente separados	Não são separados
	Solos orgânicos	Possuem classificação	Não são considerados

Fonte: Adaptado de Pinto (2006, p.80)

O Quadro 2 traz as siglas utilizadas no sistema TRB e as compara com o Sistema Unificado, mostrando as combinações prováveis, possíveis e possíveis mas improváveis. Já o Quadro 3 apresenta a comparação entre o sistema SUCS e o sistema TRB.

Quadro 2 - Comparação entre TRB e SUCS

Grupo de solos no sistema TRB	Grupo de solos Comparáveis no Sistema Unificado		
	Mais provável	Possível	Possível mas improvável
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A-1-b	SW, SP, GM, SM	GP	-
A-3	SP	-	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP
A-2-5	GM, SM	-	GW, GP, SW, SP
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP
A-2-7	GM, GC, SM, SC	-	GW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	-	SM, GM
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

Fonte: Liu (1967, apud DAS, 2007, p.81)

Quadro 3 - Comparação entre SUCS e TRB

Grupo de solos do Sistema Unificado	Grupo de solos comparáveis no Sistema TRB		
	Mais provável	Possível	Possível mas improvável
GW	A-1-a	-	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2-7	A-2-4	A-4, A-6, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4	A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	-
CL	A-6, A-7-6	A-4	-
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	-
MH	A-7-5, A-5	-	A-7-6
CH	A-7-6	A-7-5	-
OH	A-7-5, A-5	-	A-7-6
Pt	-	-	-

Fonte: Liu (1967, apud DAS, 2007, p.82)

2.3.4 Limitações de uso dos Sistemas SUCS e TRB para solos tropicais

De acordo com Villibor et al. (2009) a metodologia MCT foi desenvolvida para suprir algumas carências deixadas pelos sistemas SUCS e TRB, tais como:

- Dificuldades apresentadas para caracterizar e classificar os solos baseados na granulometria e nos limites físicos (LL e IP), uma vez que os sistemas tracionais apresentam incapacidade de diferenciar os principais tipos de solos tropicais, sendo estes denominados equivocadamente de residuais.
- Os solos lateríticos de granulação fina e o solo agregado com grande porcentagem de finos (com quase 100% passando na peneira de abertura 0,42mm) são considerados inadequados para uso como base de pavimentos, tal constatação baseada nos sistemas de classificação SUCS e TRB. Entretanto, quando os mesmos são testados experimentalmente apresentam resultados que comprovam seu bom desempenho.

Conforme Nogami e Villibor (2009), ao que se refere a obras viárias verifica-se que as camadas executadas com uso de solos de comportamento laterítico apresentam bom comportamento. No entanto, esse bom comportamento não é verificado quando se emprega os sistemas de classificação SUCS e TRB, ocorrendo o contrário no caso dos solos de comportamento não laterítico.

2.4 Classificação para solos tropicais

A incompatibilidade identificada entre os sistemas SUCS e TRB, e o comportamento dos solos encontrados no Brasil, que em geral são solos residuais ou lateríticos, ocasiona problemas no que diz respeito ao emprego dos índices de consistência. Visando o desenvolvimento de um sistema de classificação que melhor representasse o comportamento dos solos encontrados em regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil, foi apresentada a Metodologia MCT (PINTO, 2006; VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

2.4.1 Solos tropicais

Denominam-se como tropicais os materiais que apresentam, dentro da classificação dos solos, alguns aspectos peculiares, como consequência da ação de processo geológico e/ou pedológico característicos das regiões tropicais úmidas. Dentre os solos tropicais duas grandes classes merecem destaque, sendo elas os solos lateríticos, designados como maduros e, os solos saprolíticos também chamados de solos residuais jovens (VILLIBOR et al., 2009).

Villibor et al. (2009) esclarecem que os solos saprolíticos formam a camada subjacente a faixa de solo superficial laterítico, ou eventualmente outro tipo de solo. Os solos saprolíticos somente serão encontrados na superfície do perfil em decorrência de interferência do homem ou devido a erosão.

Quando encontrados em campo os solos lateríticos apresentam-se geralmente em estado não saturados e com alto índice de vazios. Outra característica desse solo é que depois de compactado, sofrerá contração caso haja diminuição do teor de umidade, no entanto, não apresenta expansão em presença de água (PINTO, 2006).

Os solos lateríticos possuem coeficiente de permeabilidade que varia de 10^{-3} a 10^{-6} m/s, sendo esses valores característicos de areias limpas. Entretanto a permeabilidade sofre um decréscimo que pode ser abrupto ou gradual, conforme a profundidade avança (CONCIANI; BURGOS; BEZERRA, 2015).

Visto que as partículas que constituem os solos saprolíticos são depositadas no próprio local em que a rocha sofreu decomposição, diz-se que tais solos são genuinamente residuais. Além disso, frequentemente verifica-se a presença de expansão nos solos saprolíticos (VILLIBOR et al., 2009; CONCIANI; BURGOS; BEZERRA, 2015).

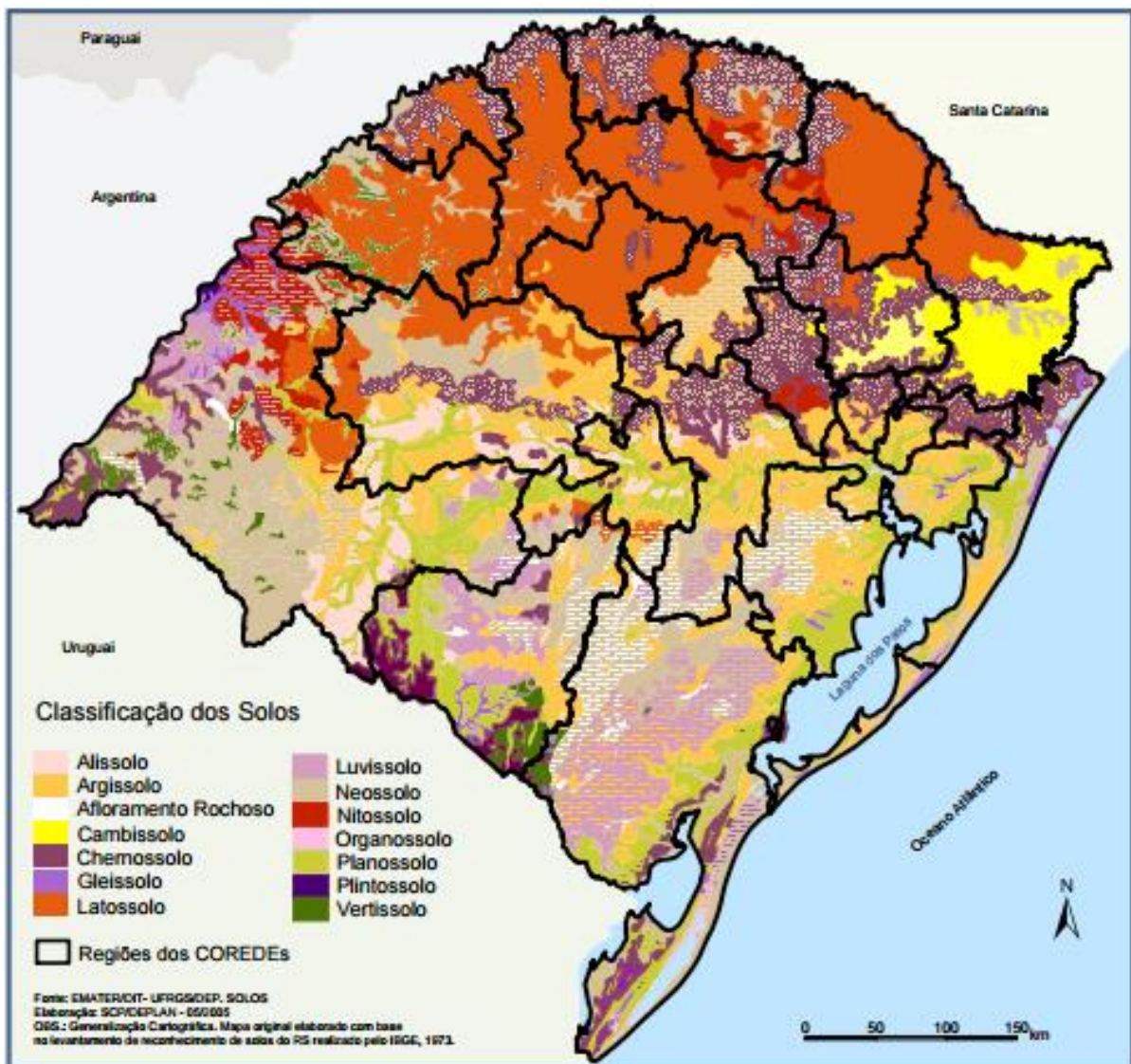
2.4.2 Solos do Rio Grande do Sul

A região Sul do Brasil, composta pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, localiza-se em uma zona de transição entre o clima tropical e o clima temperado. As variações climáticas, as quais a região Sul está submetida, são explicadas por sua localização ao sul do Trópico de Capricórnio e por abranger extensas áreas do Planalto Meridional com altitudes girando em torno de 1000m, apresentando temperaturas relativamente mais baixas (LEPSCH, 2010).

Conforme Kämpf e Streck (2010) pode-se identificar no Rio Grande do Sul uma grande diversidade de tipos de solos, podendo ser explicada pela variabilidade nas combinações dos fatores ambientais que atuam na formação dos mesmos. E para exemplificar tal constatação apresenta-se a Figura 2, sendo esta referente a distribuição dos diversos tipos de solo no território do Rio Grande do Sul.

Com base no Mapa de solos do estado do Rio Grande do Sul, presente na Figura 2, foram descritos, de forma breve, os principais solos com ocorrência na região em que está localizado o município de Alegrete/RS.

Figura 2 - Mapa de solos do estado do Rio Grande do Sul



Fonte: EMATER/DIT-UFRGS/DEP.SOLOS (2005?)

Conforme Lepsch (2010), os Latossolos são a ordem de maior representatividade no território brasileiro, sendo provenientes de ambientes que apresentam prolongadas e marcantes características de clima tropical quente e úmido. São solos profundos e muito intemperizados, cuja ocorrência se dá em relevos com inclinação suave.

Os Nitossolos são solos bastante intemperizados, apresentando profundidade média. Seu desenvolvimento dá-se sob clima tropical úmido, subtropical de altitude e em regiões intermediárias entre os referidos climas (LEPSCH, 2010).

Segundo Lepsch (2010), Argissolos são, em geral, bastante intemperizados, com desenvolvimento em regiões de clima tropical úmido, caracterizando-se como a segunda ordem de maior ocorrência no Brasil. Os perfis variam de rasos a muito profundos, enquanto o relevo pode variar de montanhoso a suave ondulado.

Planossolos são, em geral, pouco profundos, com ocorrência em áreas que variam de planas a suavemente onduladas, sendo solos pouco permeáveis. Já os Neossolos têm ocorrência desde áreas com relevo plano até áreas com relevo variando de ondulado a montanhoso, caracterizando-se como solos pouco evoluídos (JARBAS et al., 2018; SANTOS; ZARONI, 2018).

Os Luvissolos tratam-se de solos pouco ou medianamente intemperizados, que são formados sob regiões climáticas diversas. Já os Chernossolos apresentam um perfil com espessura média, sendo a área típica de ocorrência no Brasil, a campanha gaúcha, cujo clima é relativamente seco (LEPSCH, 2010).

Por apresentarem muita argila, os Vertissolos têm grande capacidade de expansão e contração, além de formarem fendas quando secos, sendo que tais características limitam seu emprego na engenharia civil. Enquanto os Gleissolos apresentam perfil com cores acinzentadas, sendo comuns em várzeas que permanecem saturadas na maior parte do ano (LEPSCH, 2010).

2.4.3 Metodologia MCT

O uso da abreviatura MCT justifica-se pelo fato de que os corpos de prova utilizados apresentam diâmetro de 50mm e aproximadamente o mesmo valor de altura, sendo denominados de “Miniatura” (M), além de sua moldagem ser realizada, basicamente, em laboratório com o uso de Compactação (C), utilizando-se uma sistemática desenvolvida especialmente para solos Tropicais (T). A Metodologia MCT compreende dois grupos de ensaios, a saber, o ensaio Mini-CBR e associados e, o ensaio Mini-MCV e associados, sendo o último responsável por fornecer parâmetros para a obtenção dos coeficientes c' e e' empregados para classificar o solo com o uso da Metodologia MCT (VILLIBOR; NOGAMI, 2009; VILLIBOR et al., 2009).

De acordo com Villibor e Nogami (2009), os ensaios que compõe a Metodologia MCT são elencados do M1 ao M9, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Ensaio da Sistemática MCT

SIGLA	ENSAIO
M1	Compactação Mini-Proctor
M2	Mini-CBR e Expansão
M3	Contração
M4	Infiltrabilidade e Permeabilidade
M5	Compactação Mini-MCV
M6	Penetração da Imprimadura Betuminosa
M7	Mini-CBR de campo - Procedimento Dinâmico
M8	Perda de Massa por Imersão
M9	Classificação Geotécnica MCT

Fonte: Adaptado de Villibor e Nogami (2009, p.39)

Villibor et al. (2009) esclarecem que a Metodologia MCT classifica os solos de acordo com seu comportamento em dois grandes grupos, sendo eles, solos lateríticos (L) e solos saprolíticos ou não lateríticos (N). A Metodologia MCT apresenta, dentro do grupo dos solos de comportamento laterítico e não laterítico, 7 classificações possíveis para o material. O Quadro 5 traz as subdivisões aplicadas aos dois grandes grupos em que os solos tropicais são divididos, ou seja, aos solos lateríticos e não lateríticos.

Quadro 5 - Subdivisões dos solos lateríticos e não lateríticos

Comportamento	Sigla	Descrição
Laterítico	LA	Areia laterítica quartzosa
	LA'	Solo arenoso laterítico
	LG'	Solo argiloso laterítico
Não Laterítico	NA	Areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico
	NA'	Misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso)
	NS'	Solo siltoso não laterítico
	NG'	Solo argiloso não laterítico

Fonte: Adaptado de Villibor et al. (2009, p.38)

2.5 Permeabilidade

De acordo com o DNIT (2006), permeabilidade é a propriedade do solo que permite a circulação de água no seu interior, seja sob a ação da gravidade ou sob a ação de outra força. A permeabilidade é avaliada através do coeficiente de permeabilidade (k), que pode ser medido tanto em campo quanto em laboratório.

A permeabilidade de um solo está associada ao índice de vazios, ao tamanho médio dos grãos e a estrutura da amostra de solo em análise. Com relação a presença de água entre os grãos de solo, verifica-se que os solos de granulação fina podem apresentar comportamentos diversos sob a ação de cargas, já no caso dos solos de granulação grossa a presença de água praticamente não influencia no seu comportamento (DNIT, 2006).

Ortigão (2007) apresenta a Tabela 1 com os valores típicos de permeabilidade para solos arenosos e argilosos.

Tabela 1 – Valores típicos de permeabilidade

Permeabilidade	Tipo de solo	k (m/s)
Solos permeáveis		
Alta	Pedregulhos	$> 10^{-3}$
Alta	Areias	10^{-3} a 10^{-5}
Baixa	Siltes e argilas	10^{-5} a 10^{-7}
Solos impermeáveis		
Muito baixa	Argila	10^{-7} a 10^{-9}
Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

Fonte: Ortigão (2007, p. 104)

De acordo com Das (2007), a importância do conhecimento da permeabilidade dos solos reside na necessidade de se estudar problemas envolvendo o bombeamento de água em obras subterrâneas, bem como estudar o comportamento de barragens de terra quanto sua estabilidade e estruturas de contenção sob a ação de forças de percolação.

No caso de barragens de terra, a FAO (2011) esclarece que a percolação sempre representa um problema em potencial que deverá ser considerado na fase de projeto. É necessário analisar a permeabilidade dos materiais utilizados, a posição e o fluxo de água subterrânea na área, além do tipo e a idealização do núcleo ou

trincheira de vedação subterrâneo no aterro, assim como o uso de sistema de drenagem visando a captação e condução da água proveniente de infiltração na seção jusante do aterro.

2.6 Casos práticos

Neste item serão apresentados dois estudos de caso aplicados a obras viárias. O objetivo dos mesmos é avaliar a qualidade do solo por meio da aplicação dos sistemas de classificação de solos.

2.6.1 Sistemas de classificações geotécnicas de solos: Estudo de caso aplicado à rodovia não pavimentada VCS 346, Viçosa, MG

De acordo com Silva et al. (2010), o estudo de caso é referente a um trecho do subleito da rodovia municipal não pavimentada VCS 346 localizada em Viçosa/MG, sendo que os principais objetivos dos autores de tal estudo é a contribuição com um banco de dados geotécnicos sobre as classificações de solos tropicais, assim como verificar os possíveis agrupamentos entre os sistemas SUCS e TRB, e a Metodologia MCT.

Silva et al. (2010) esclarecem que foram extraídas amostras de solo deformadas de vários pontos de coleta localizados no subleito da plataforma da estrada vicinal não pavimentada VCS 346 provenientes do município de Viçosa/MG. Para a realização dos testes laboratoriais foram utilizadas no total 12 amostras de solo.

Conforme Silva et al. (2010), utilizaram-se os ensaios de granulometria conjunta, limites de Atterberg e massa específica dos grãos de solo para a caracterização geotécnica tradicional das amostras. Para a classificação conforme a metodologia MCT, foram utilizadas 5 amostras de solo para a execução dos ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão.

Com relação aos sistemas SUCS e TRB, pode-se visualizar na Tabela 2 os resultados obtidos após a realização dos ensaios de granulometria, limites de Atterberg e peso específico dos grãos das amostras em estudo.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios geotécnicos de granulometria, limites de Atterberg e peso específico dos grãos

Propriedades Analisadas Granulometria ABNT (%)	Amostras de Solos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Argila ($\phi \leq 0,002$ mm)	40	50	18	55	44	15	49	26	66	55	74	67
Silte ($0,002 < \phi \leq 0,06$ mm)	22	15	23	17	31	28	17	21	4	15	4	2
Areia fina ($0,06 < \phi \leq 0,2$ mm)	18	18	19	15	9	22	14	21	14	7	4	13
Areia média ($0,2 < \phi \leq 0,6$ mm)	18	16	36	12	15	34	18	31	15	20	16	17
Areia grossa ($0,6 < \phi \leq 2$ mm)	2	1	4	1	1	1	2	1	1	3	2	1
Pedregulho ($\phi > 2$ mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LL (%)	50	51	35	72	61	65	54	46	65	57	59	65
LP (%)	26	33	35	44	24	44	34	27	42	45	41	32
IP (%)	24	18	0	28	37	21	20	19	22	12	18	33
γ_s (kN/m ³)	26	28	22	28	28	24	29	29	27	28	23	31

Fonte: Silva et al. (2010)

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos após as amostras terem sido ensaiadas visando a classificação pela metodologia MCT, bem como a devida identificação dentro do sistema classificatório.

Tabela 3 - Índices classificatórios e classificação MCT

Amostras	Índices classificatórios				Classificação MCT
	c'	d'	P_i (%)	e'	
Solo 01	2,44	28,8	123,00	1,24	NG'
Solo 02	2,89	64,2	98,00	1,09	LG'
Solo 03	2,00	9,40	284,00	1,71	NG'
Solo 04	3,67	66,2	22,00	0,81	LG'
Solo 05	2,44	21,3	0,00	0,98	LG'
Solo 06	2,56	19,2	104,50	1,28	NG'
Solo 07	2,33	21,7	10,00	1,00	LG'
Solo 08	2,00	35,7	107,00	1,18	NG'
Solo 09	2,78	45,5	0,00	0,78	LG'
Solo 10	1,78	13,6	10,00	1,10	NG'
Solo 11	2,44	38,0	27,00	0,93	LG'
Solo 12	3,11	51,5	0,00	0,73	LG'

Fonte: Silva et al. (2010)

O Quadro 6 mostra a compilação dos resultados obtidos para cada amostra ensaiada levando-se em consideração as classificações geotécnicas SUCS, TRB, MCT, Classificação pedológica e ainda as características do greide da estrada.

Quadro 6 - Resultados das classificações geotécnicas SUCS, TRB, classificação MCT, classificação pedológica e características do greide da estrada

Designação das amostras	Características do Greide da amostra da estrada	Classificações geotécnicas tradicionais		Classificação MCT	Classificação Pedológica
		SUCS	TRB		
Solo 01	Plano	CL	A-7-6	NG'	Argissolo Vermelho-Amarelo
Solo 02	Plano	MH	A-7-5	LG'	Argissolo Vermelho-Amarelo
Solo 03	Plano	SM	A-4	NG'	Câmbissolo latossólico
Solo 04	Plano	MH	A-7-5	LG'	Argissolo Vermelho-Amarelo
Solo 05	Plano	CH	A-7-6	LG'	Argissolo Vermelho-Amarelo
Solo 06	Plano	SM	A-7-5	NG'	Latossolo Vermelho-Amarelo
Solo 07	Plano	MH	A-7-5	LG'	Latossolo Vermelho-Amarelo
Solo 08	Plano	SC	A-7-6	NG'	Câmbissolo latossólico
Solo 09	Declive suave	MH	A-7-5	LG'	Câmbissolo latossólico
Solo 10	Plano	MH	A-7-5	NG'	Argissolo Vermelho-Amarelo
Solo 11	Aclive suave	MH	A-7-5	LG'	Argissolo Vermelho-Amarelo
Solo 12	Aclive suave	CH	A-7-5	LG'	Argissolo Vermelho-Amarelo

Fonte: Silva et al. (2010)

Com os dados do Quadro 6, foram elaborados o Quadro 7 e o Quadro 8, onde pode-se verificar que foram agrupados os resultados das classificações geotécnicas SUCS e TRB com os obtidos com a aplicação da Metodologia MCT e as recomendações de Nogami e Villibor (1995), respectivamente.

Quadro 7 - Agrupamentos possíveis para os solos analisados nos sistemas SUCS e TRB e na Metodologia MCT

Classificações geotécnicas tradicionais	Classes e grupos da classificação MCT	
	Não laterítico	Laterítico
	NG'	LG'
Classificação SUCS	CL	MH
	SM	CH
	SC	
	MH	
Classificação TRB	A-4	A-7-5
	A-7-5	A-7-6
	A-7-6	

Fonte: Silva et al. (2010)

Quadro 8 - Agrupamento de solos, segundo Nogami e Villibor (1995), entre a Metodologia MCT e os Sistemas SUCS e TRB

Classificações geotécnicas tradicionais	Classes e grupos da classificação MCT						
	Não laterítico				Laterítico		
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Classificação SUCS	SP	MS	SM, CL	MH	SP	SC	MH
	SM	SC	ML, MH	CH	SC		ML
			ML				CH
Classificação TRB	A-2	A-2	A-4	A-6	A-2	A-2	A-6
		A-4	A-5	A-7-5		A-4	A-7-5
		A-7	A-7-5	A-7-6			

Fonte: Silva et al. (2010)

Segundo Silva et al. (2010), se comparados os resultados do Quadro 7 com o apresentado no Quadro 8, no grupo LG' pode-se verificar que os agrupamentos são semelhantes aos expostos por Nogami e Villibor (1995). Contudo, ao se considerar o processo geológico e/ou pedológico típico da região de viçosa/MG, no grupo NG' houve a contribuição dos grupos SC, SM e CL do Sistema SUCS e do grupo A-4 do Sistema TRB.

2.6.2 Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais: Estudo de caso

Conforme Emmert e Pereira (2016), a caracterização geotécnica e a classificação rodoviária de solos foram realizadas através de ensaios laboratoriais, cuja finalidade foi a de apresentar as características pertinentes para sua aplicação em estradas florestais. Para o estudo foram coletados, de áreas florestais do município de Niquelândia/GO, solos finos e granulares, predominantes, que receberam as siglas de SL e HA, respectivamente, e cujas áreas de coleta foram chamadas de hortos.

No horto SL, foram coletadas ao total 19 amostras de solo provenientes de um trecho da estrada florestal principal, as amostras deste local foram denominadas de SL e numeradas do 01 ao 19, conforme ordem de coleta. Já no horto HA foram coletados cerca de 100 kg de solo granular, sendo estes provenientes de vários pontos da jazida de cascalho, cujo material coletado recebeu a designação de HA.

Para a classificação expedita MCT e para a classificação pelo sistema rodoviário TRB, Emmert e Pereira (2016) esclarecem que foram realizados os ensaios de contração e penetração e, os ensaios de granulometria e limites de consistência, respectivamente, para as amostras SL01, SL04, SL08, SL09 e SL14, tendo estas sido selecionadas de forma aleatória.

A Tabela 4 apresenta a classificação do material conforme a metodologia MCT expedita.

Tabela 4 - Determinação do grupo MCT conforme metodologia expedita

Determinação do Grupo MCT		
c' ¹	Penetração (mm)	Grupo MCT
< 0,5	< 3,0	LA
	3,1 a 3,9	NA
	≥ 4,0	NA / NS'
0,6 a 0,9	< 2,0	LA - LA'
	2,1 a 3,9	NA' - NS'
	≥ 4,0	NS' - NA'
1,0 a 1,3	< 2,0	LA'
	2,1 a 3,9	NA'
	≥ 4,0	NS'
1,4 a 1,7	< 2,0	LA' - LG'
	2,1 a 3,9	NA' / NG' - NS'
	≥ 4,0	NS' - NG'
≥ 1,8	< 2,0	LG'
	2,1 a 3,9	NG'
	≥ 4,0	NG'

Em que: Os símbolos "-" e "/" significam opção equivalente e opção decrescente, respectivamente.

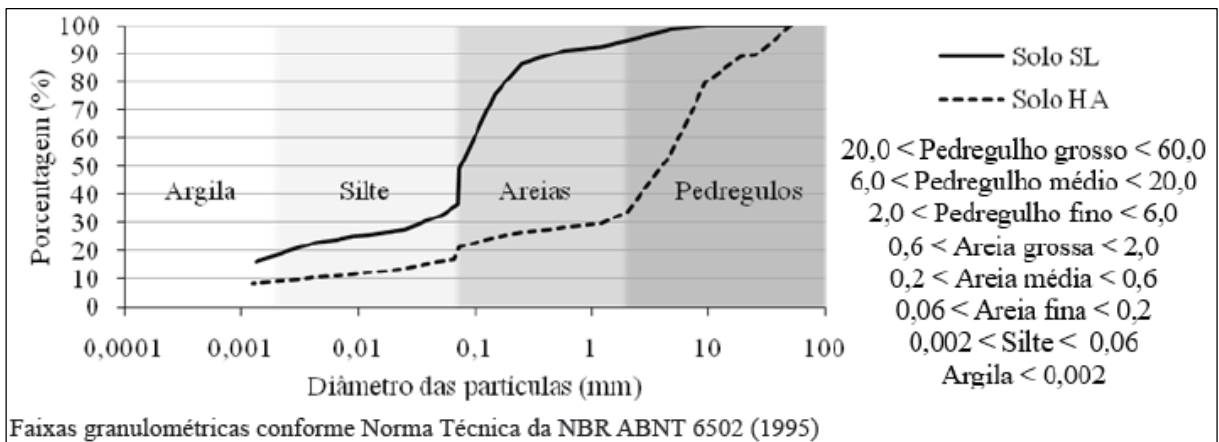
¹Contração total das pastilhas (ct): ct de 0,1 a 0,5 mm, $c' = (\log_{10}ct + 1)/0,904$; ct > 0,6 mm, $c' = (\log_{10}ct + 0,7)/0,5$

Fonte: Emmert e Pereira (2016)

Com relação a massa específica dos grãos dos solos finos, Emmert e Pereira (2016) apontam que as amostras do horto florestal SL e de cascalho HA retornaram valores médios de 2,69 g/cm³ e 2,85 g/cm³, respectivamente.

Segundo Emmert e Pereira (2016) para a caracterização da granulometria das amostras de SL adotou-se a média dos diâmetros e das porcentagens das frações. Por meio da análise da Figura 3, pode-se ver como é a curva de distribuição granulométrica dos solos SL e HA.

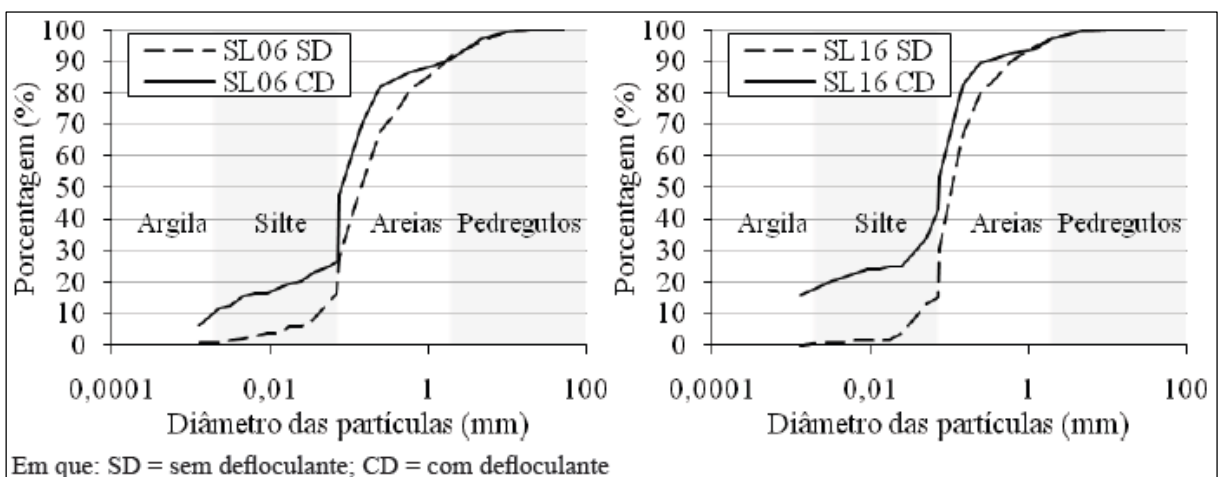
Figura 3 - Curvas de distribuição granulométrica dos solos SL (média) e HA. Sedimentação com solução de hexametáfosfato de sódio



Fonte: Emmert e Pereira (2016)

De acordo com Emmert e Pereira (2016), foram selecionadas aleatoriamente as amostras SL06 e SL16 para a realização do ensaio de sedimentação, com e sem uso da solução defloculante de hexametáfosfato de sódio, e comparou-se os resultados com o intuito de verificar o estado de agregação das partículas de silte e argila no solo. A Figura 4 traz a curva granulométrica referente ao ensaio de sedimentação das amostras SL06 e SL16, com e sem o uso do defloculante.

Figura 4 - Distribuição granulométrica por sedimentação das amostras SL06 e SL16, com e sem uso do defloculante



Fonte: Emmert e Pereira (2016)

Baseado nos valores oriundos dos ensaios de limite de consistência, Emmert e Pereira (2016) apontam que as umidades do LL e LP denotam ao solo SL características mais arenosas, cujos valores médios de LL e LP são de 25,2% e

18,6%, respectivamente, com valores baixos de IP. Os resultados dos ensaios de índices de consistência, obtidos para as amostras de SL selecionadas podem ser verificados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites de consistência para o solo SL

Amostra	Amostras selecionadas			Valores Médios Solo SL		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
SL01	31,0	19,4	11,6			
SL04	24,4	18,5	5,9			
SL08	25,4	18,7	6,7	25,2	18,6	6,6
SL09	25,7	17,9	7,8			
SL14	19,4	18,3	1,1			

Em que: LL = Limite de liquidez; LP = Limite de plasticidade; IP = Índice de plasticidade

Fonte: Emmert e Pereira (2016)

De acordo com Emmert e Pereira (2016), as amostras de solo SL, segundo a metodologia expedita utilizada para a classificação dos solos no grupo MCT, apresentaram características lateríticas, conforme pode-se ver na Tabela 6.

Tabela 6 – Identificação do solo SL no grupo MCT conforme metodologia expedita

Amostra	Valor/Amostra		Grupo MCT Amostras	Valores Médios		Grupo MCT Solo SL
	c' (mm)	Penetração (mm)		c' (mm)	Penetração (mm)	
SL01	1,5	0,5	LA' - LG'			
SL04	1,0	0,5	LA' - LG'			
SL08	1,0	1	LA' - LG'	1,1	1,3	LA'
SL09	1,5	1	LA' - LG'			
SL14	0,5	3,5	NA			

Em que: Para contração total (ct) entre 0,1 e 0,5 mm, $c' = (\log_{10}ct + 1)/0,904$; Para contração total (ct) > 0,6 mm, $c' = (\log_{10}ct + 0,7)/0,5$

Fonte: Emmert e Pereira (2016)

Já para a classificação dos solos SL e HA, pelo sistema TRB, Emmert e Pereira (2016) esclarecem que foram utilizados os dados obtidos nos ensaios de granulometria e limites de consistência, tal classificação pode ser vista na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação dos solos pelo sistema TRB

Amostra	Valor / Amostra						Valores adotados para solo					
	LL (%)	IP (%)	F ₁₀	F ₄₀	F ₂₀₀	IG	Grupo TRB	LL (%)	IP (%)	F ₂₀₀	IG	Grupo TRB
SL01	31,0	11,6	96,9	93,1	67,8	6	A-6(6)					
SL04	24,4	5,9	97,4	92,5	51,2	0	A-4(0)					
SL08	25,4	6,7	96,0	91,0	51,9	1	A-4(1)	25,2	6,6	52,7	1	A-4(1)
SL09	25,7	7,8	96,7	90,1	52,7	1	A-4(1)					
SL14	19,4	1,1	96,0	88,3	39,8	0	A-4(0)					
HÁ	-	-	33,9	27,5	21,5	0	A-1b	-	-	21,5	0	A-1-b

Em que: LL = Limite de Liquidez; IP = Índice de Plasticidade; F10 = Porcentagem que passa na peneira nº 10; F40 = Porcentagem que passa na peneira nº 40; F200 = Porcentagem que passa na peneira nº 200; IG = Índice de Grupo.

Fonte: Emmert e Pereira (2016)

Emmert e Pereira (2016) expõe que os diferentes sistemas de classificação enquadram o mesmo solo em categorias de materiais constituintes e comportamentos distintos. O solo SL de acordo com o sistema TRB enquadra-se como material constituinte usual siltoso, já na Metodologia MCT o material recebe a denominação de areia argilosa. Baseado na granulometria a fração de areia fina compõe 41,9% e a de argila compõe 27,8% do total do solo SL. A Tabela 8 apresenta a classificação atribuída aos solos SL e HA, segundo o sistema TRB e a metodologia MCT.

Tabela 8 - Classificação dos solos SL e HA conforme o sistema TRB e a metodologia MCT

Solo	Classificação		Características do grupo TRB			Características do grupo MCT			
	MCT	TRB	Material	Qualidade geral como subleito	Material	Ordem preferencial de uso			
						Base vicinal	Reforço do subleito	Subleito compactado	Revestimento primário
SL	LA'	A-4(1)	Solos siltosos	Satisfatória	Areias argilosas	1º	1º	1º	1º
HA	-	A-1-b	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia	Excelente	-	-	-	-	-

Fonte: Emmert e Pereira (2016)

Já em relação aos resultados obtidos com os ensaios de CBR, Emmert e Pereira (2016) apresentam a Tabela 9 que traz a classificação dos solos visando seu emprego em pavimento rodoviário.

Tabela 9 - Classificação dos solos para uso em pavimento rodoviário

Solo	Energia de compactação	Expansão (%)	CBR (%)	Material rodoviário
SL	Intermediária	0,03	13,5	Reforço de subleito
	Modificada	0,06	8,0	Reforço de subleito
HA	Intermediária	0,03	59,3	Sub-base
	Modificada	0,12	94,9	Base

Fonte: Emmert e Pereira (2016)

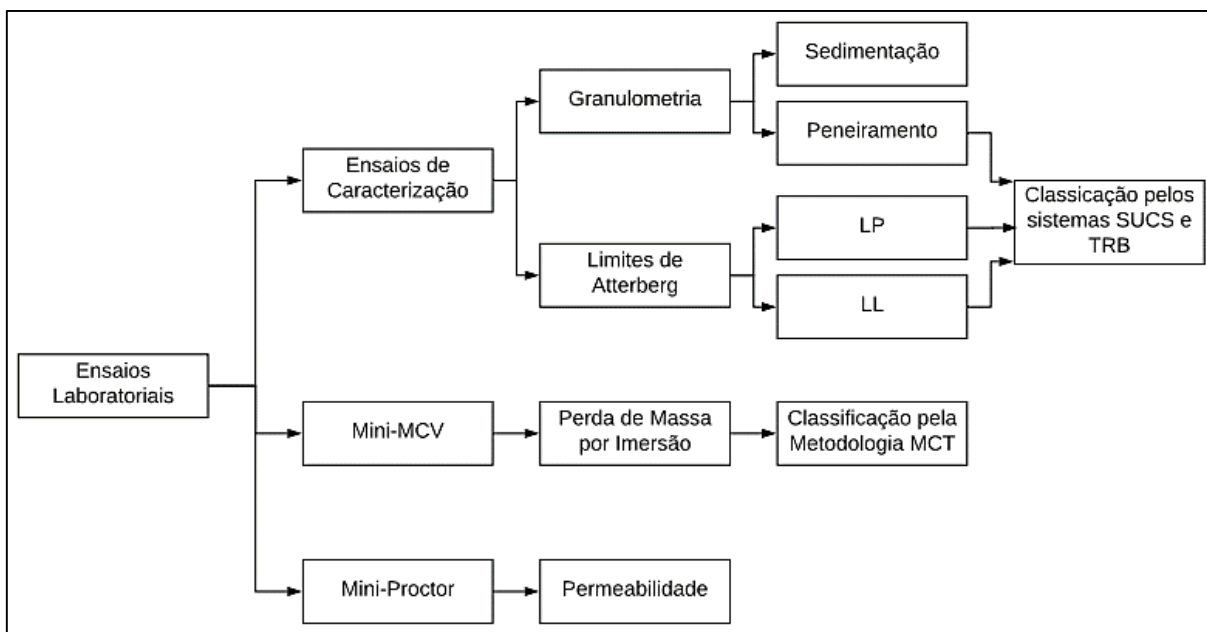
Com relação ao solo SL, Emmert e Pereira (2016) apontam que conforme a classificação TRB este enquadra-se no grupo A-6(1), já com relação a metodologia MCT o mesmo foi designado como LA' (arenoso laterítico), tais classificações foram atribuídas em decorrência de o solo fino SL apresentar predominância da fração de areia fina e por ter baixa plasticidade. Enquanto o solo HA, foi classificado como A-1-b, conforme o Sistema TRB, isto em decorrência de a fração predominante neste solo ser de pedregulho fino.

O resultado final indica que os solos estudados apresentaram comportamento de satisfatório a excelente quando cogitado seu emprego em estradas florestais, isto quando compactados corretamente, sendo o solo SL indicado como subleito e o solo HA como base ou revestimento primário.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados e descritos os ensaios necessários para a caracterização dos solos coletados. A Figura 5 mostra a sequência de ensaios executados visando classificar os materiais conforme os sistemas SUCS e TRB, além da Metodologia MCT.

Figura 5 - Fluxograma com os ensaios executados



Fonte: Autoria própria

3.1 Coleta e preparação das amostras

As 3 amostras de solo avaliadas no presente trabalho são provenientes do município de Alegrete/RS. Cada amostra recebeu uma denominação, a saber: Campo, Rodovia e Caverá. As duas primeiras amostras são oriundas da localidade do Durasnal, já a última amostra foi coletada no Balneário Caverá, distantes cerca de 20 Km e 5 Km da sede da Unipampa Campus Alegrete, respectivamente. A justificativa para o nome dado aos materiais deve-se ao fato de a amostra Campo ter sido coletada alguns quilômetros adentro da propriedade rural, enquanto a amostra Rodovia foi coletada, dentro da propriedade, nas proximidades da BR 290, já com relação a amostra Caverá, esta recebeu o nome do local de coleta do solo, sendo este o Balneário Caverá. A Figura 6 traz o mapa com a localização das áreas de coleta dos solos Campo, Rodovia e Caverá.

Figura 6 - Localização das áreas de coleta dos solos



Fonte: Autoria própria

A coleta das amostras dos solos Campo e Rodovia foram realizadas manualmente, com auxílio de uma pá, obtendo-se assim amostras de solo deformadas. Já a coleta do solo Caverá deu-se por meio do uso de maquinário, sendo que a amostra deformada foi transportada até a Unipampa visando o desenvolvimento de atividades relacionadas a pesquisa de iniciação científica. Tais amostras foram armazenadas, inicialmente, em sacos de rafia para posterior preparo das mesmas e execução dos ensaios laboratoriais. Cabendo destacar que todos os ensaios realizados, a fim de se obter os dados necessários para cumprir com os objetivos almejados para o trabalho, foram executados no Laboratório de Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa (Unipampa), Campus Alegrete/RS.

Através das orientações contidas na NBR 6457/2016, foi realizada a preparação das amostras de solo Campo, Rodovia e Caverá para os ensaios. Inicialmente, os materiais foram secos ao ar, em bandejas metálicas, até que a umidade presente na amostra estivesse próxima da umidade higroscópica. Após a secagem, as amostras foram destorroadas, com o auxílio de um almofariz e de um pistilo, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Material utilizado para destorroar o solo



Fonte: Aatoria própria

Com as amostras devidamente destorroadas e homogeneizadas, as mesmas passaram pelo processo de quartejamento, ilustrado na Figura 8, que consiste basicamente em dividir a amostra, de forma a se obter uma porção representativa do material, em quantidade suficiente para a execução dos ensaios pertinentes.

Figura 8 - Processo de quartejamento do solo



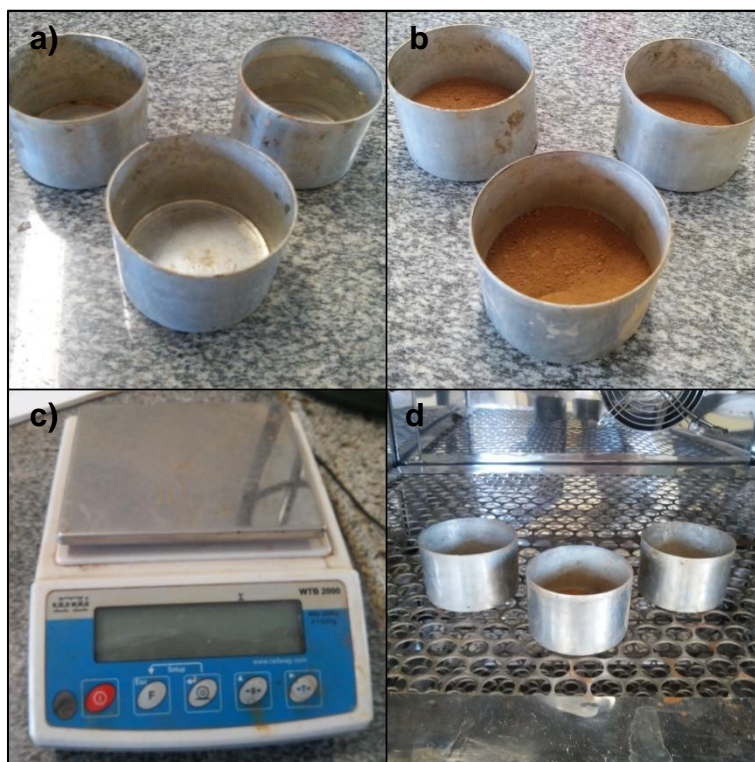
Fonte: Aatoria própria

3.2 Ensaio de teor de umidade

O ensaio de teor de umidade de solos é normatizado pela NBR 6457/2016, em seu Anexo A. O valor obtido após o ensaio foi de fundamental importância na realização dos diversos ensaios executados durante a fase laboratorial do trabalho. Tal ensaio será descrito de forma breve, previamente à apresentação dos demais, dada sua importância para a execução dos mesmos.

O primeiro passo para a realização do ensaio, foi a separação e pesagem (a) de 3 cápsulas metálicas a serem empregadas no acondicionamento do solo em estufa, cujo valor obtido para cada uma delas foi anotado como M3. Em cada cápsula depositou-se cerca de 30 g de material, sendo que o conjunto (b) composto pela cápsula e o solo foi pesado, em uma (c) balança de precisão, e o valor anotado como M1. Na sequência, a mesma foi transferida para (d) a estufa onde permaneceu por, no mínimo, 24 horas com temperatura variando entre 105°C e 110°C. A Figura 9 apresenta de forma simplificada a sequência de execução do ensaio de teor de umidade.

Figura 9 - Ensaio de teor de umidade



Fonte: Autoria própria

Passadas, ao menos, 24 horas, as cápsulas metálicas contendo solo foram retiradas da estufa e deixadas em repouso até entrarem em equilíbrio com a temperatura ambiente. Logo após as mesmas foram pesadas e os valores obtidos anotados como M2. De posse dos dados provenientes do ensaio, empregou-se a Equação 1 para o cálculo do teor de umidade de cada porção de solo.

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} * 100 \quad \dots (1)$$

Ao término do ensaio, o teor de umidade da amostra em questão foi calculado através da média aritmética dos dados obtidos.

3.3 Classificação das amostras pelos sistemas SUCS e TRB

Neste item serão apresentados os ensaios que se fizeram necessários para realizar a classificação das amostras através dos sistemas SUCS e TRB, assim como serão apresentados quadros, tabelas, figuras e afins necessários para se obter a classificação das amostras segundo cada sistema.

3.3.1 Ensaio de granulometria

Para a caracterização granulométrica de cada amostra de solo foi empregada a NBR 7181/2016, tendo sido executados, de forma conjunta, o ensaio de granulometria por peneiramento e por sedimentação. Após a preparação das amostras, conforme descrito no item 3.1 do presente trabalho, foi separada uma porção de 1 kg de material para a execução dos devidos ensaios.

Na sequência, a quantidade de material supracitada foi submetida ao peneiramento na malha de abertura 2mm (#10), fazendo-se uso do agitador mecânico para tal, como mostra a Figura 10. Cabendo observar que o peneiramento foi realizado em etapas, uma vez que a quantidade de material adicionado na peneira não deveria ultrapassar 1/3 de sua altura, de forma a facilitar o processo.

Figura 10 - Peneira de 2 mm de abertura no agitador mecânico



Fonte: Autoria própria

Com a fração passante na peneira de abertura 2 mm foram executados os ensaios de sedimentação e peneiramento fino, além do ensaio de teor de umidade, como descrito no item 3.2 do presente trabalho. Já o material retido na referida peneira foi empregado no peneiramento grosso da amostra. Para a realização do ensaio de sedimentação, foram separadas 70 g de material e depositadas em um béquer de 250 cm³, onde adicionou-se 125 cm³ da solução de hexametáfosfato de sódio, como defloculante. Após a adição do defloculante, o béquer contendo solo foi deixando em repouso por, no mínimo, 12 horas. A Figura 11 ilustra o procedimento descrito acima.

Figura 11 - Preparação do solo para o ensaio de sedimentação



Fonte: Autoria própria

Passadas, ao menos 12 horas do solo em repouso, a amostra foi vertida no copo de dispersão onde adicionou-se água destilada até cerca de 5 cm abaixo da borda do copo. Na sequência, o material foi submetido ao aparelho dispersor por 15 minutos, como mostra a Figura 12.

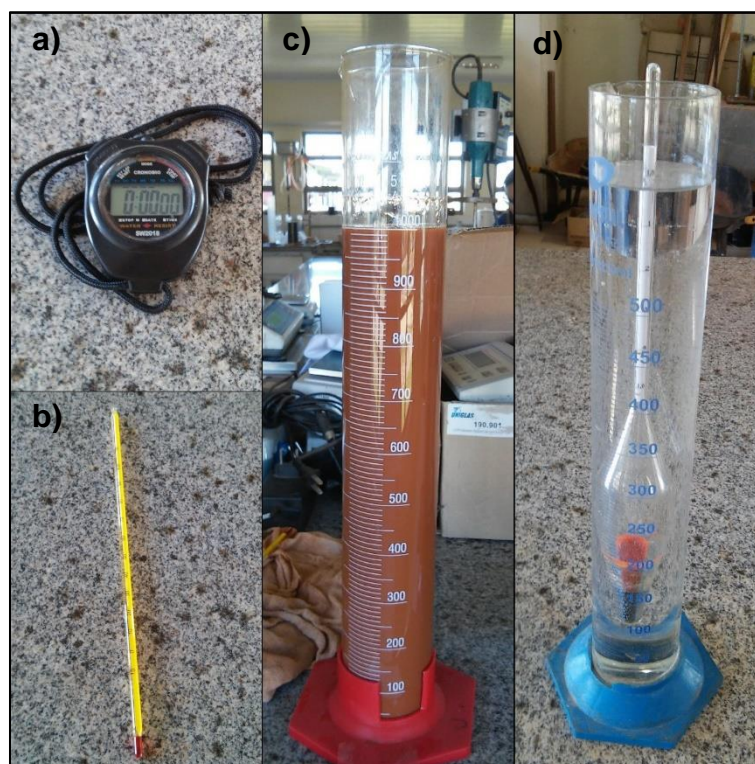
Figura 12 - Aparelho dispersor



Fonte: Autoria própria

Passados os 15 minutos, o conteúdo do copo foi transferido para uma proveta, onde se adicionou água destilada até a marca de 1000 cm³. Com a proveta em mãos, foram executados movimentos vigorosos de rotação durante 1 minuto. Logo após, a mesma foi posicionada sobre a bancada e acionou-se (a) o cronômetro, sendo que as leituras de densidade e temperatura, com o emprego de um (b) termômetro, foram realizadas nos tempos de 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas. Cabendo destacar que ao lado da (c) proveta contendo o material ensaiado, foi colocada uma (d) proveta com água potável, à mesma temperatura da dispersão, sendo nesta depositado o densímetro logo após cada leitura realizada. A Figura 13 traz os materiais utilizados durante o ensaio de sedimentação.

Figura 13 - Ensaio de sedimentação



Fonte: Autoria própria

Realizada a última leitura do ensaio de sedimentação, o material da proveta foi vertido na peneira de abertura 0,075 mm (#200) e lavado, em água corrente à baixa pressão, o conteúdo retido na peneira foi transferido para uma cápsula de porcelana e colocado em estufa, com temperatura variando entre 105°C e 110°C por, no mínimo, 24 horas. Na sequência, o material foi submetido ao peneiramento fino, com emprego das peneiras de abertura 1.2, 0.6, 0.42, 0.25, 0.15 e 0.075 mm.

Já o material retido na peneira de abertura 2 mm foi lavado, em água corrente à baixa pressão, na própria malha. Imediatamente após ser lavado, o material foi transferido para uma cápsula de porcelana e colocado em estufa, com temperatura variando entre 105°C e 110°C, onde permaneceu por, no mínimo, 24 horas. Na sequência o material retirado da estufa foi submetido ao peneiramento grosso, com o emprego das peneiras 50, 38, 25, 19, 9.5 e 4.8 mm.

O solo retido em cada peneira foi pesado, em uma balança de precisão, tendo seus pesos anotados com o objetivo de se calcular a porcentagem de material retido em cada malha.

3.3.2 Ensaio de Limite de Liquidez

Para a execução do ensaio de limite de liquidez (LL) dos solos, se utilizou como base as orientações fornecidas pela NBR 6459/2016. Assim como recomendado pela norma supracitada, previamente ao início do ensaio, o equipamento utilizado foi devidamente aferido. Inicialmente, foi feita a preparação da amostra, como descrito no item 3.1 do presente trabalho, na sequência, a mesma foi submetida ao peneiramento na malha de abertura 0.42 mm, sendo que da fração passante foi separado material, em quantidade suficiente, para a execução do ensaio.

Em uma cápsula de porcelana, foi depositada a quantidade de solo separada para o ensaio, onde se adicionou água destilada, em pequenos incrementos até a obtenção de uma pasta apresentando certa consistência. A Figura 14 mostra os materiais empregados na preparação da pasta de solo.

Figura 14 - Materiais empregados na preparação da pasta de solo

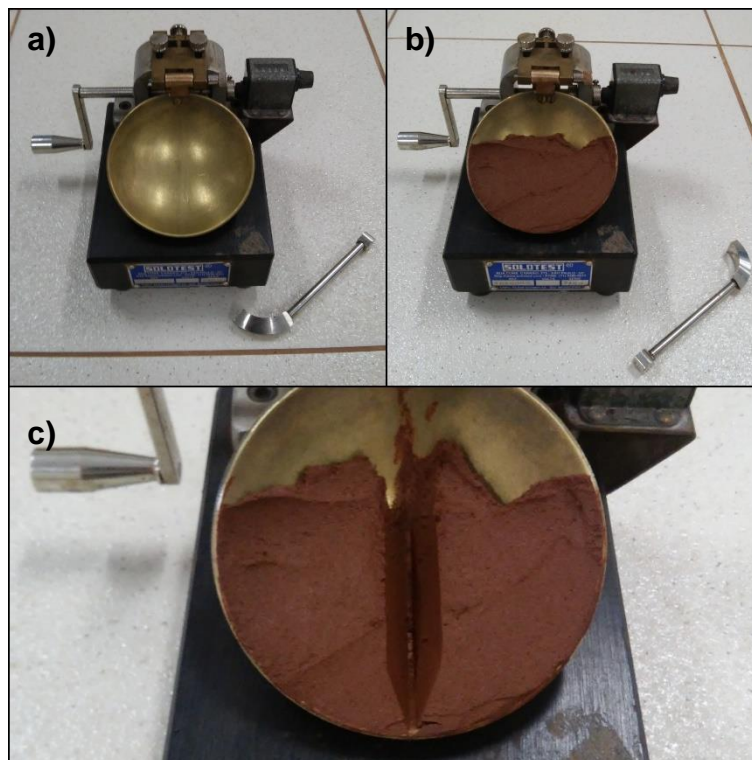


Fonte: Autoria própria

Para a realização do ensaio de LL foi empregado o aparelho de Casagrande, sendo este composto, basicamente, por uma concha, uma manivela responsável pela aplicação dos golpes e por um cinzel. Com a concha em mãos, fez-se a moldagem da pasta de solo, já com a mesma reinstalada no aparelho de Casagrande, foi feita com o cinzel, uma ranhura de cerca de 13 mm de largura no centro da pasta. A Figura 15

apresenta o (a) aparelho de Casagrande com o cinzel, assim como a (b) pasta moldada na concha e a (c) ranhura aberta.

Figura 15 - Aparelho de Casagrande



Fonte: Autoria própria

A etapa seguinte foi a aplicação dos golpes, cujo objetivo consiste em fechar a ranhura aberta com o cinzel, com um número de golpes não inferior a 15 e nem superior a 35. A cada tentativa em que o número de golpes esteve fora dos limites, retornou-se com o material para a cápsula de porcelana onde se adicionou mais água destilada à amostra, sendo a mesma homogeneizada para a repetição do ensaio.

Encontrado o primeiro ponto do ensaio, onde o número de golpes esteve dentro dos limites, foi retirada das bordas que se uniram, uma pequena porção de solo que foi imediatamente transferida para uma cápsula metálica, assim como apresentado na Figura 16, sendo a mesma pesada, em uma balança de precisão, e inserida na estufa, com a finalidade de se obter o teor de umidade da pasta. A cada ponto de LL obtido, o processo de aplicar mais umidade à amostra, através da adição de água destilada, foi repetido até que se obtiveram 4 pontos de limite de liquidez, dando-se assim, o ensaio por encerrado.

Figura 16 - Ensaio do limite de liquidez



Fonte: Autoria própria

3.3.3 Ensaio de Limite de Plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade (LP) foi executado com base na NBR 7180/2016. Após a preparação da amostra, como descrito no item 3.1 do presente trabalho, a mesma foi submetida ao peneiramento na malha de abertura 0.42 mm, extraíndo-se material em quantidade suficiente para execução do ensaio.

A porção de solo separada foi depositada em uma cápsula de porcelana onde adicionou-se, em pequenos incrementos, água destilada ao material, revolvendo-o com uma espátula até a obtenção de uma pasta. Para a execução do ensaio foi separada uma bolinha de cerca de 10 gramas do material homogeneizado.

Fazendo uso de uma placa esmerilhada, como mostra a Figura 17, a bolinha foi rodada sobre a mesma com a finalidade de se obter um cilindro apresentando 3 mm de diâmetro e cerca de 10 mm de comprimento, sem se fragmentar porém apresentando pequenas fissuras em sua superfície. No caso do cilindro se fragmentar antes de atingir as dimensões estipuladas, o mesmo foi transferido para a cápsula de porcelana, onde se adicionou pequena quantidade de água destilada, com posterior homogeneização da amostra, visando repetir o ensaio.

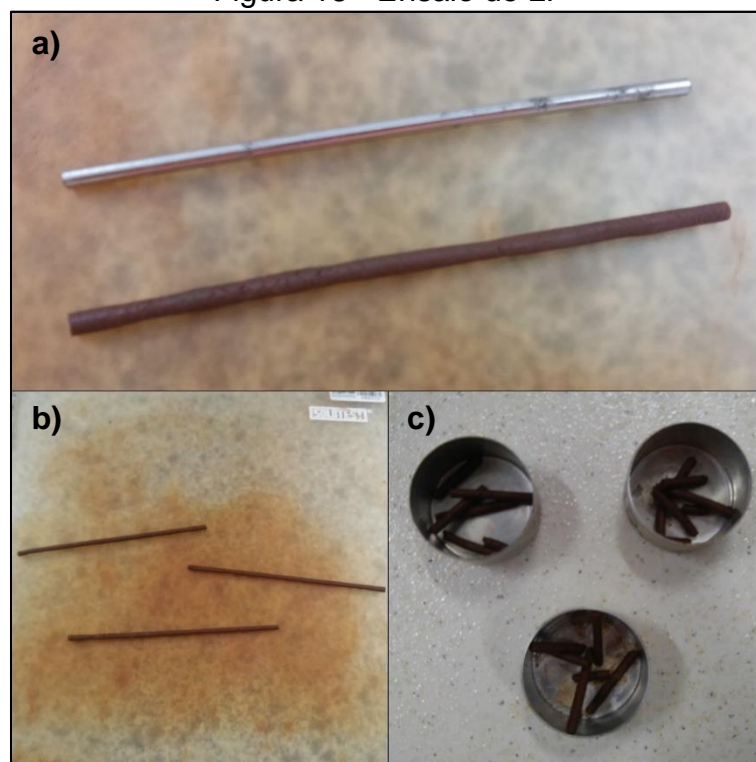
Figura 17 - Placa esmerilhada com cilindro guia



Fonte: Autorial própria

Com o objetivo do ensaio alcançado transferiu-se, imediatamente, o cilindro para uma cápsula metálica, sendo esta pesada e transferida para uma estufa, onde permaneceu por, no mínimo, 24 horas com temperatura variando entre 105°C e 110°C. O ensaio foi repetido, de forma a se obter, ao menos, 3 valores de teor de umidade para a amostra ensaiada. A Figura 18 mostra (a) o cilindro com as dimensões requeridas, apresentando pequenas fissuras em sua superfície, os (b) 3 cilindros obtidos para o ensaio e (c) os mesmos depositados nas cápsulas metálicas.

Figura 18 - Ensaio de LP



Fonte: Autoria própria

3.3.4 Ensaio de massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm

Previamente à realização do ensaio de massa específica, regido pela NBR 6508/1984, fez-se a calibração do picnômetro. Para tal, como mostra a Figura 19, adicionou-se certa quantidade de água ao picnômetro, (a) transferindo-o para um recipiente contendo água em estado de ebulição, onde foi (b) aplicada pressão de, no mínimo, 88 kPa ao líquido presente no picnômetro, por 15 minutos.

Logo após a aplicação de pressão, resfriou-se o picnômetro até as temperaturas de 40°C, 30°C e 20°C, obtendo o peso referente a cada temperatura, realizando assim a calibração do mesmo.

Figura 19 - Calibração do picnômetro



Fonte: Autoria própria

A preparação da amostra para o ensaio de massa específica foi realizada como descrito no item 3.1 do presente trabalho, logo após, a mesma foi peneirada na malha de abertura 4,8 mm. Com o emprego de um picnômetro de 500 cm³, separou-se uma fração de 70 g do material passante na referida peneira para a execução do ensaio.

O solo foi colocado em um béquer de 250 cm³, onde adicionou-se água destilada, em quantidade suficiente para que todo o material ficasse submerso no líquido, permanecendo assim por, no mínimo, 12 horas. A Figura 20 traz o (a) picnômetro utilizado, assim como o (b) solo preparado para o ensaio.

Figura 20 - Picnômetro e solo preparado para o ensaio de massa específica



Fonte: Autoria própria

Passadas ao menos 12 horas do material em imersão, o solo foi vertido no copo de dispersão, onde se adicionou água destilada até a metade de seu volume, sendo que o mesmo foi submetido ao aparelho dispersor durante 15 minutos. O conteúdo do copo foi imediatamente transferido, com o auxílio de um funil, para o picnômetro, que por sua vez, foi colocado em um recipiente com água em estado de ebulição. Com o picnômetro devidamente posicionado, aplicou-se vácuo de, no mínimo, 88 kPa por 15 minutos, ao material contido no mesmo.

Logo após, o picnômetro contendo solo foi resfriado até que se atingisse as temperaturas de 40°C, 30°C e 20°C. Ao se atingir as temperaturas almejadas, completou-se o picnômetro com água destilada, até a marca de referência, como mostra a Figura 21, e anotou-se o seu peso.

Figura 21 - Picnômetro com conteúdo até a marca de referência

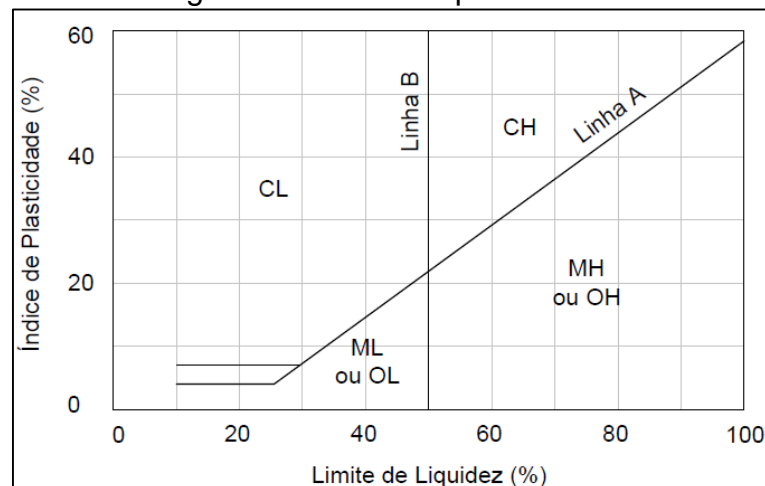


Fonte: Autoria própria

3.3.5 Sistema Unificado de Classificação de Solos

Para a classificação dos solos através do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o primeiro aspecto considerado foi a porcentagem de material passante na peneira #200, dado este obtido por meio do ensaio de peneiramento. Após constatado que o material em análise trata-se de um solo fino, ou seja, que a porcentagem passante na peneira supracitada é superior a 50, empregou-se a carta de plasticidade, presente na Figura 22, para o prosseguimento da classificação.

Figura 22 - Carta de plasticidade



Fonte: Pinto (2006, p.68)

Para a classificação do solo, com base na Figura 22, empregou-se o índice de plasticidade (IP), calculado com o emprego da Equação 2, e o LL. Na carta de plasticidade, conforme o valor de LL, o material recebeu a classificação complementar de solo de baixa plasticidade ou de alta plasticidade.

$$IP = LL - LP \quad \dots (2)$$

Já no caso de se tratar de um solo grosso, onde a porcentagem de material passante na #200 é inferior a 50, o aspecto seguinte a ser analisado foi o percentual de material que passa nas peneiras #4 e #200. No caso da porcentagem referente a #4 superar os 50%, e a #200 apresentar valor superou a 12%, para se obter a classificação final do solo emprega-se o valor de Índice de Plasticidade, calculado através da Equação 2. A Figura 23 apresenta o esquema empregado para realizar a classificação de solos por meio do SUCS.

Figura 23 - Esquema para classificação pelo SUCS

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	<table border="1"> <tr><td>GC</td></tr> <tr><td>GM</td></tr> </table>	GC
	GC			
	GM			
		5 < #200 < 12	GW - GC, GP - GM, etc.	
S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3		
		SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3		
	% P #200 > 12	<table border="1"> <tr><td>SC</td></tr> <tr><td>SM</td></tr> </table>	SC	SM
SC				
SM				
	5 < #200 < 12	SW - SC, SP - SC, etc.		
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: Pinto (2006, p.69)

3.3.6 Transportation Research Board

Para a classificação segundo o sistema *Transportation Research Board (TRB)*, foram empregados dados provenientes do ensaio de granulometria por peneiramento, sendo que a informação de entrada no sistema é a porcentagem de material passante na peneira # 200, além de dados oriundos dos ensaios de LL e LP do solo. Ainda se fez necessário o cálculo do índice de grupo (IG), através da Equação 3 que leva em consideração, dentre outras informações, a porcentagem passante na peneira #200 (F_{200}), sendo o valor obtido no cálculo referente a capacidade de suporte do solo de fundação para uma rodovia.

$$IG = (F_{200} - 35) * [0,2 + 0,05 * (LL - 40)] + 0,01 * (F_{200} - 15) * (IP - 10) \quad \dots (3)$$

Com base nas informações provenientes dos ensaios de granulometria, LL e LP, bem como após a execução dos devidos cálculos, empregou-se o Quadro 9 para realizar a classificação da amostra de solo em estudo.

Quadro 9 - Esquema para a classificação pelo TRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N° 200							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 e 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 N° 10 N° 40 N° 200	50 máx. 30 máx. 15 máx.	30 máx. 25 máx.	51 máx. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 máx.	36 máx.	36 máx.	36 máx.
Características da fração passando na peneira N° 40: Limite de Liquidez Limite de Plasticidade Índice de Grupo	6 máx.	6 máx.	NP	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.*
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 que do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006, p.56)

A classificação, através do Quadro 9, foi realizada da esquerda para a direita, de cima para baixo. O primeiro grupo de solos no qual todos os dados já citados estiveram dentro dos limites estabelecidos, foi a classificação atribuída ao material por meio do sistema TRB.

3.4 Ensaios para a classificação das amostras através da Metodologia MCT

Neste item do trabalho serão apresentados os procedimentos que se fizeram necessários para a viabilidade da classificação das amostras de solo por meio da Metodologia MCT. As normas técnicas que regem a execução dos ensaios que serão empregados no desenvolvimento do presente trabalho, ao que tange à Metodologia MCT, foram desenvolvidas pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

3.4.1 Ensaio Mini-MCV

O ensaio para solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV, foi executado seguindo-se o recomendado pela norma DNER-ME 258/94. A preparação dos solos para a execução dos ensaios referentes à Metodologia MCT seguiu a mesma sequência descrita no item 3.1 deste trabalho. Após a preparação, o material foi submetido ao peneiramento na malha de abertura 2 mm, sendo que previamente à execução do ensaio de compactação Mini-MCV foram elaboradas as curvas de compactação para cada solo, de forma a ter-se uma ideia dos teores de umidade ideais para aplicar às frações de solo, visando a execução do referido ensaio.

Para a curva de compactação de cada solo, inicialmente, foi obtido o teor de umidade da amostra a ser preparada, logo após foram separadas porções de 225 gramas, sendo a elas aplicados diferentes teores de umidade. Tais porções foram deixadas em repouso por 24 horas, de forma a uniformizar o teor de umidade. Após o tempo estabelecido, cada porção foi homogeneizada, dando-se início ao ensaio através da separação de certa quantidade de material a compactar. Com a porção de solo devidamente acomodada dentro do molde e por meio do emprego do soquete tipo leve, foram desferidos 5 golpes em cada lado do CP, cuja altura final deveria ser de 5 cm +/- 0,1cm. Com os teores de umidade no eixo das abcissas e com os valores de Massa Específica Aparente Seca (MEAS), calculadas com o emprego da Equação 4, no eixo das ordenadas, obteve-se a curva de compactação para cada solo.

$$MEAS = \frac{100 * M_h}{(100 + h) * V} \quad \dots (4)$$

Onde:

MEAS – massa específica aparente seca (g/cm^3);

Mh – peso do solo úmido empregado na compactação (g);

h – teor de umidade da amostra (%);

V – volume do CP após a compactação (cm^3).

Através da curva de compactação, definiu-se os teores de umidade que deveriam ser empregados a cada porção de material, visando a execução do ensaio de compactação Mini-MCV. Baseado nisso, calculou-se a quantidade de água que deveria ser adicionada a cada porção de material, a fim de se obter o teor de umidade almejado. Para cada solo foram preparadas 6 porções de material com umidades crescentes, sendo que cada porção foi acondicionada em um saco de polietileno, como ilustra a Figura 24, por um período de 24 horas. Previamente à execução do ensaio, o aparelho de compactação miniatura foi aferido, assim como foi colocado em um dos lados do molde o anel de vedação e o disco de polietileno para posteriormente posicioná-lo sobre a base metálica destinada à execução do ensaio de compactação.

Figura 24 - Porções de solo acondicionadas em sacos de polietileno

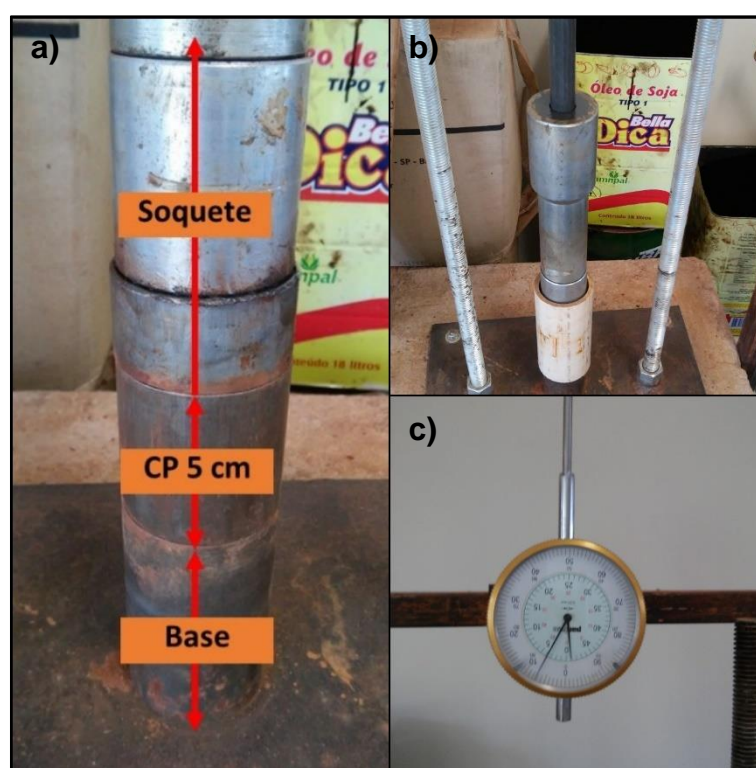


Fonte: Autoria própria

Na sequência, começando pelo maior teor de umidade, cada porção de solo foi homogeneizada, assim como foram separadas 200 gramas, que com o auxílio de um

funil foram depositadas dentro do molde, inserindo-se logo após o anel metálico e o disco de polietileno na face superior do mesmo. Com a etapa de preparação finalizada, deu-se início à compactação do material, através da aplicação de sucessivos golpes, sendo considerado satisfatório o número de golpes que gerou uma diferença de altura inferior a 2 mm entre o golpe n e o golpe $4n$. A Figura 25 apresenta de forma simplificada a execução do ensaio de compactação Mini-MCV, onde é possível ver a (a) aferição do conjunto, o (b) soquete posicionado sobre o solo que se encontra no interior do molde e o (c) extensômetro.

Figura 25 - Ensaio Mini-MCV



Fonte: Autoria própria

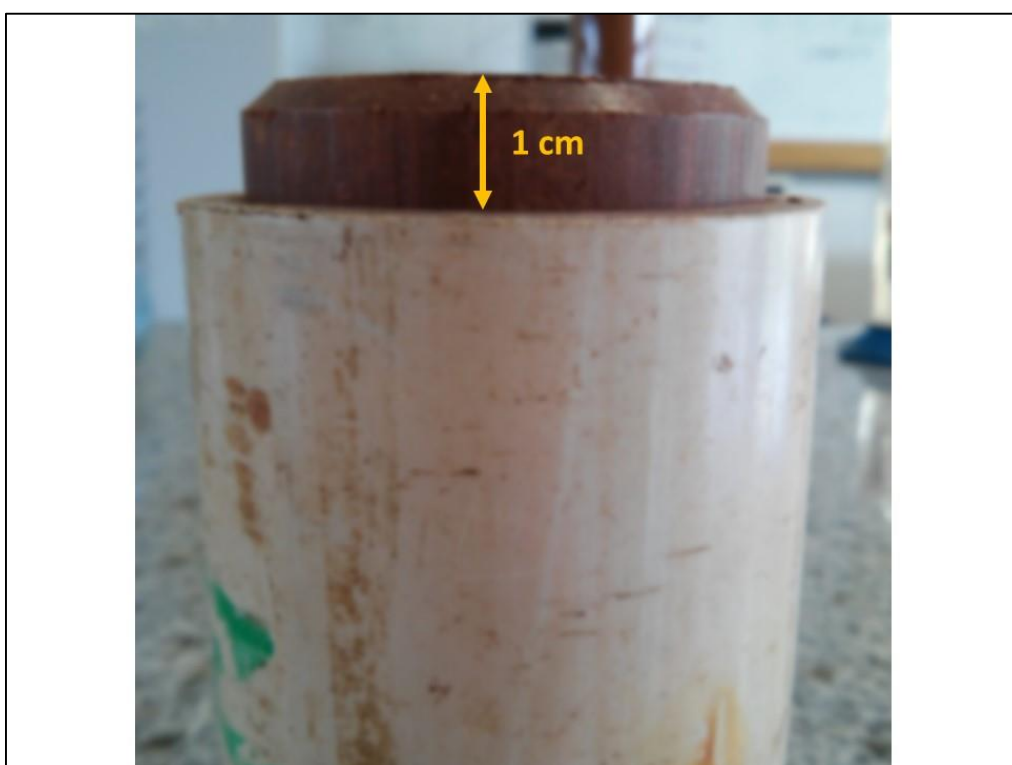
Após a separação do solo necessário à execução do ensaio de compactação Mini-MCV, foi realizado o ensaio de teor de umidade com o material que restou em cada saco de polietileno, conforme descrito no item 3.2. O objetivo da realização de tal ensaio reside em se obter o teor de umidade real com o qual cada porção de solo foi compactada.

3.4.2 Perda de massa por imersão

A DNER-ME 256/94 é a norma técnica responsável por reger o ensaio empregado na determinação da perda de massa por imersão de corpos de prova previamente submetidos ao ensaio de compactação, sendo este executado em laboratório com o emprego de equipamento miniatura.

Previamente ao início dos procedimentos para a execução do ensaio de perda de massa por imersão, foram separadas e pesadas as cápsulas de porcelana que farão parte do ensaio. Com a compactação Mini-MCV concluída pode-se dar início ao ensaio de perda de massa por imersão, sendo que para tal, procedeu-se com a extração de 1 centímetro do solo compactado do interior de cada molde, como ilustra a Figura 26.

Figura 26 - Corpo de prova deslocado do interior do molde



Fonte: Autoria própria

Na sequência, os moldes foram devidamente posicionados no interior do recipiente de imersão, cada qual com sua respectiva cápsula de porcelana, estando estas dispostas de forma a coletar o material que venha a se desprender da massa de solo. Com os moldes e as cápsulas de porcelana posicionadas, deu-se início à

introdução de água, como pode ser visto na Figura 27, de forma suave e contínua até que a lâmina de água atingisse cerca de 1 cm acima da face superior do molde.

Figura 27 – Introdução de água no recipiente de imersão



Fonte: Autoria própria

Transcorridas, ao menos, 20 horas de execução do ensaio de perda de massa por imersão, retirou-se, de forma cuidadosa, as cápsulas de porcelana do interior do recipiente. As cápsulas foram imediatamente transferidas para a estufa, onde permaneceram até que o material contido nas mesmas estivesse completamente seco. Após terem sido retirados da estufa e estando em temperatura ambiente, cada cápsula contendo solo desprendido foi pesada para posterior cálculo da perda de massa por imersão, com o emprego da Equação 5. Cabendo salientar que no cálculo da P_i foi empregado um coeficiente de correção (F_c), sendo que o mesmo leva em consideração a forma de desprendimento do solo. O material poderá se desprender em forma de bloco, recebendo assim o valor 0,5 como coeficiente, ou poderá ocorrer desprendimento normal de solo, desta forma o mesmo receberá como coeficiente o valor 1.

$$P_i = \frac{M_d * 100}{M_o} * F_c \quad \dots (5)$$

Onde:

P_i – perda de massa por imersão (%);

M_d – massa de solo seco presente na cápsula de porcelana (g);

M_o – massa de solo úmido compactado referente a porção de 10 mm (g);

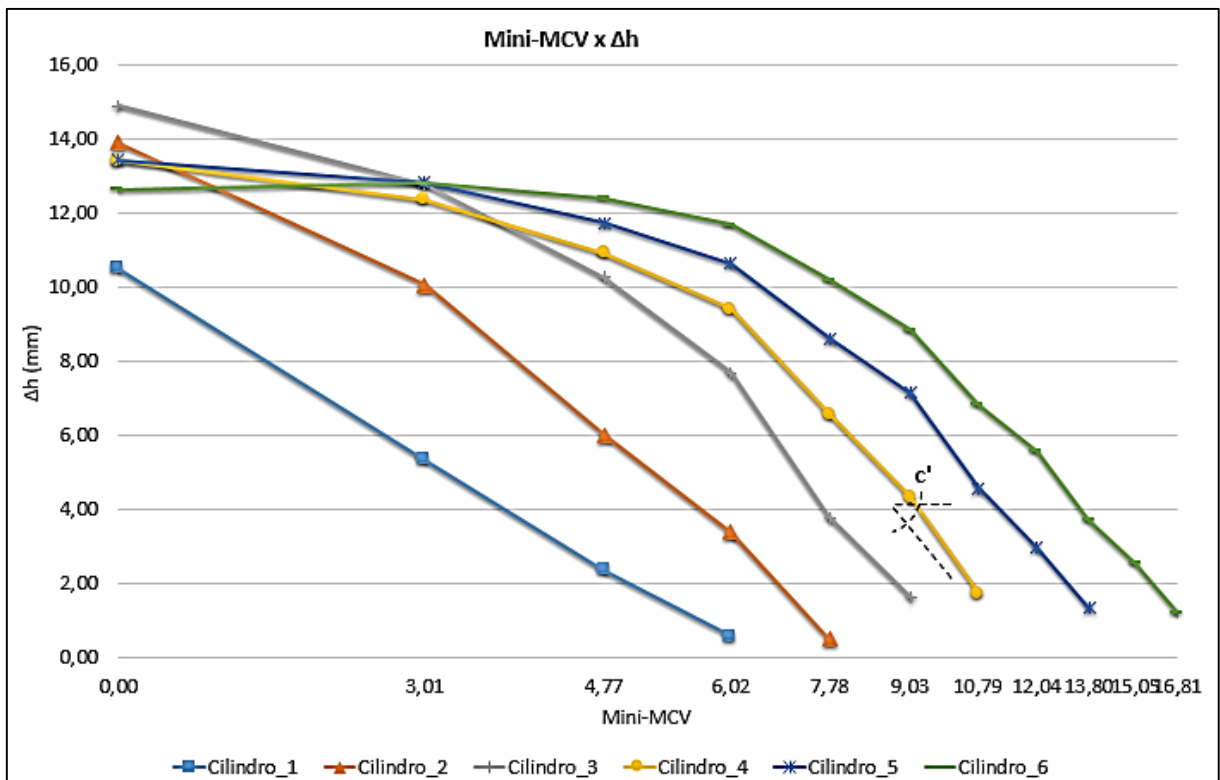
F_c – fator de correção.

3.4.3 Metodologia MCT

Com os dados oriundos dos ensaios de compactação Mini-MCV, realizados para cada solo, foi construído o gráfico Mini-MCV *versus* a diferença de altura (Δh), cuja representação dá-se em um gráfico de eixos ortogonais onde o eixo das abcissas representa o valor de Mini-MCV, calculado através da Equação 6, estando o mesmo em escala logarítmica, e o eixo das ordenadas representa a diferença de altura. Por meio do referido gráfico obteve-se o coeficiente angular c' , sendo este proveniente de uma reta inclinada, cuja origem reside no Mini-MCV = 10 bem como no $\Delta h = 2\text{mm}$, estando a mesma paralela as curvas adjacentes. A Figura 28 ilustra o gráfico Mini-MCV *versus* a diferença de altura (Δh), assim como o coeficiente c' identificado.

$$\text{Mini - MCV} = 10\log(N^\circ \text{ de golpes}) \quad \dots (6)$$

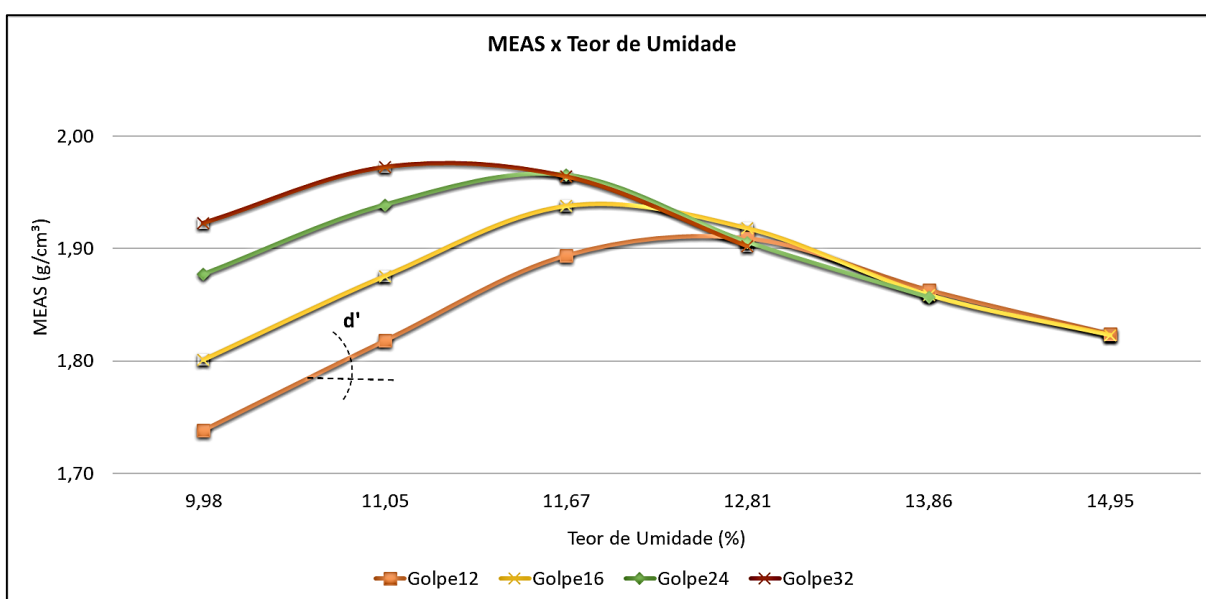
Figura 28 - Gráfico Mini-MCV x Δh



Fonte: Autoria própria

Já com base no valor da MEAS, calculada para cada teor de umidade referente ao número de golpes aplicados durante a compactação, foi possível traçar o gráfico cujo eixo das ordenadas abriga a MEAS e no eixo das abcissas está o Teor de umidade. Com o referido gráfico encontrou-se o coeficiente angular d' , sendo este derivado da parte retilínea (ou semelhante a uma reta) mais inclinada do ramo seco da curva de compactação. A Figura 29 ilustra o gráfico MEAS *versus* Teor de umidade, construído para a obtenção do coeficiente d' .

Figura 29 - Gráfico MEAS x Teor de Umidade



Fonte: Autoria própria

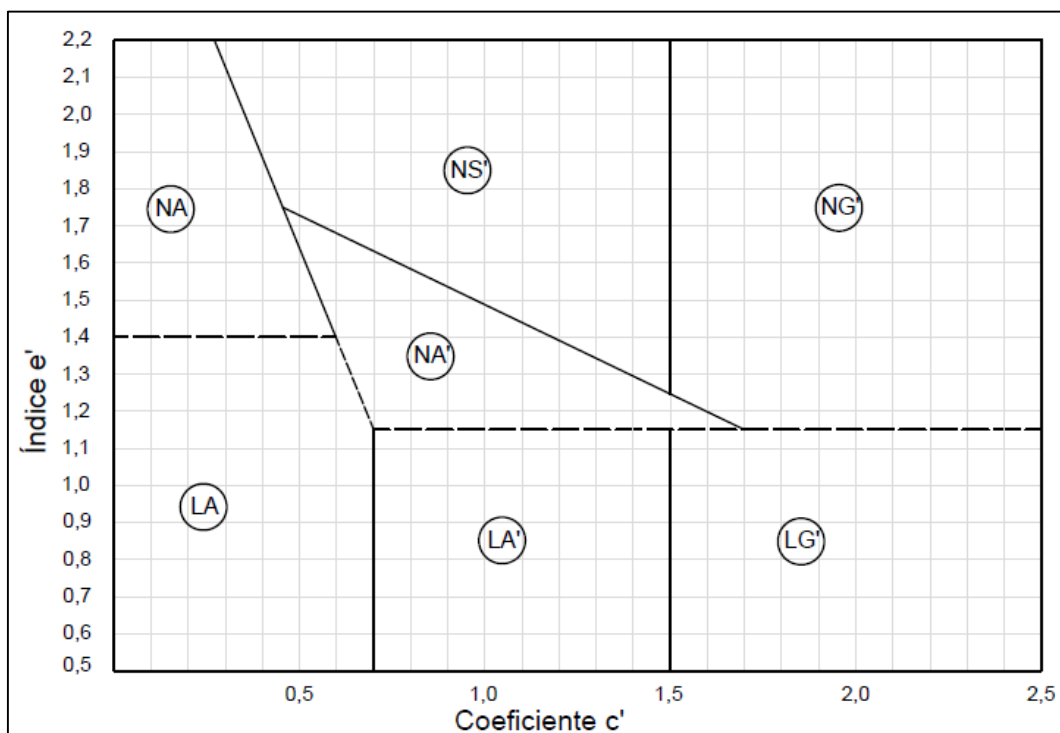
Enquanto para a obtenção da perda de massa por imersão (P_i), que será empregada na sequência da classificação das amostras de solo pela Metodologia MCT, foi preciso confeccionar um gráfico que relaciona a perda de massa por imersão com o número de golpes. Com a Perda de massa no eixo das ordenadas e o número de golpes no eixo das abcissas, localizou-se no mesmo o ponto de Mini-MCV = 15, em decorrência de os corpos de prova apresentarem altura final inferior a 53 mm, sendo que através deste foi possível obter a perda de massa por imersão da amostra.

Para a determinação do coeficiente e' foi empregada a Equação 7, que relaciona a perda de massa por imersão (P_i) com o coeficiente d' .

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad \dots (7)$$

Após a obtenção de todos os parâmetros necessários para a classificação do solo por meio da Metodologia MCT, empregou-se a Figura 30 para a definição do tipo de solo em estudo, uma vez que a mesma apresenta no eixo das abscissas o coeficiente c' e no eixo das ordenadas o coeficiente e' .

Figura 30 – Gráfico para a classificação MCT



Fonte: DNIT (2006, p.68)

3.5 Ensaio de permeabilidade

Com base no teor de umidade ótimo, obtido na curva de compactação de cada solo, foram preparadas 3 porções de cada material para a execução do ensaio de permeabilidade com carga variável, de forma a se obter 3 corpos de prova para cada solo em estudo. Após o preparo das porções, as mesmas foram depositadas em sacos de polietileno e deixadas em repouso por 24 horas, para posterior compactação com a utilização do ensaio Mini-Proctor.

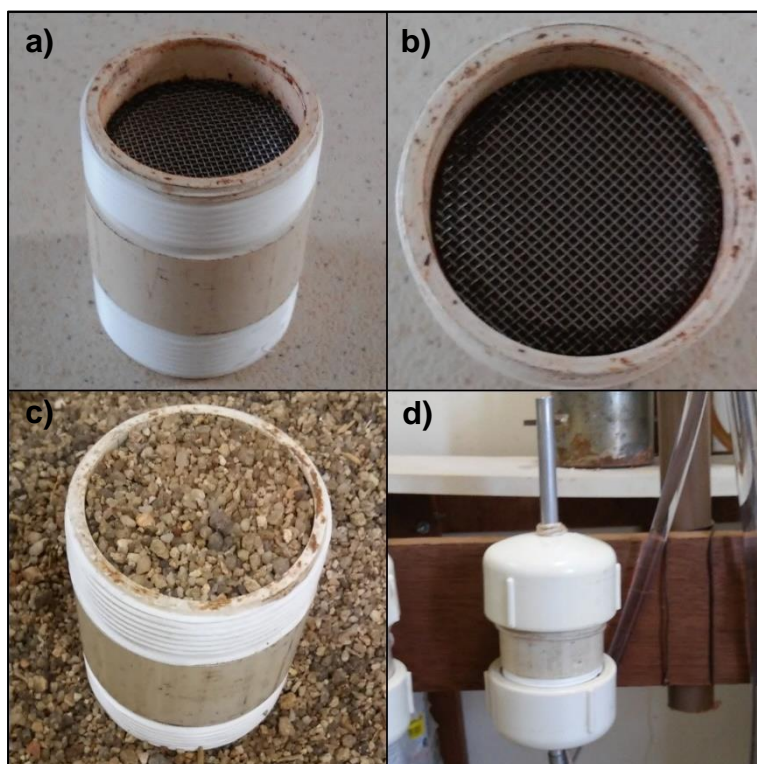
Previamente ao início do ensaio, o aparelho de compactação miniatura foi aferido, obtendo-se assim a leitura, no extensômetro, para um CP com altura de 5 cm,

sendo tal valor idealizado para a altura final do CP a ser compactado. Na sequência, uma porção de material foi homogeneizada e desta separada certa quantidade de solo para a compactação. A quantidade necessária de material a ser empregada na compactação foi definida através da Massa Específica Aparente Seca (MEAS) do solo.

Com o material separado, optou-se por compactar o solo já no molde onde foi realizado o ensaio de permeabilidade com a finalidade de minimizar ao máximo a possível influência do contato da borda da amostra com o molde do permeâmetro. Desta forma, posicionou-se sobre a base de compactação o molde contendo o disco de polietileno em seu interior, cuja função reside em evitar o contato direto entre o solo e a base, dando prosseguimento à preparação do CP, o solo foi depositado dentro do molde com o auxílio de um funil. Com o soquete tipo leve devidamente posicionado sobre o solo, desferiu-se 5 golpes em um dos lados do molde, na sequência o mesmo foi invertido no compactador, de forma a se aplicar mais golpes na face oposta, sendo que ao término da compactação o CP apresentou altura final de cerca de 5 cm.

Com a compactação finalizada, iniciou-se a montagem do permeâmetro a ser empregado na realização do ensaio. O molde no qual o solo foi compactado, recebeu algumas camadas de fita veda rosca, assim como sobre o CP foi posicionada uma tela metálica, já o espaço vazio entre a tela e a borda do molde foi preenchido com areia de granulação grossa, com o intuito de não permitir o contato direto da água com o CP compactado. Com um dos lados do molde devidamente preparado, foi rosqueado o “tampão”, estando este munido de um canudo metálico em seu centro, de forma a permitir a entrada/saída de água. Na sequência, o mesmo procedimento descrito acima foi executado para a outra face do molde. A Figura 31 apresenta a sequência de montagem do permeâmetro, sendo possível visualizar o (a) molde com algumas camadas de fita veda rosca e a tela metálica posicionada sobre o CP, a (b) tela metálica em detalhe, o (c) espaço vazio entre a tela e a borda do molde preenchido com areia, assim como o (c) permeâmetro montado e fixado no local para o início do ensaio.

Figura 31 - Montagem do permeâmetro



Fonte: Autoria própria

Com a montagem do permeâmetro finalizada, o mesmo foi fixado em um lastro de madeira, onde a mangueira de alimentação foi instalada no canudo metálico inferior e preenchida com água, com o objetivo de saturar a amostra antes da realização do ensaio de permeabilidade, como ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Permeômetros fixados e com a mangueira de alimentação



Fonte: Autoria própria

Para a execução do ensaio de permeabilidade do solo, foi necessário aguardar certo tempo até que a água transpassasse pelo interior do CP. A definição de que a amostra havia sido saturada, se deu quando visualizou-se que o líquido extravasou através do canudo metálico presente na face superior do permeâmetro.

Na sequência, a mangueira antes instalada no canudo inferior do permeâmetro, foi transferida para o canudo localizado na parte superior do mesmo. Ao lado da mangueira de alimentação, foi fixada uma escala graduada, cujo objetivo reside em medir o nível de água nos tempos preestabelecidos para o ensaio. A Figura 33 apresenta a mangueira posicionada no canudo superior, estando o permeâmetro pronto para a execução do ensaio de permeabilidade.

Figura 33 - Ensaio de permeabilidade



Fonte: Autoria própria

As leituras, na escala graduada, do nível da mangueira foram realizadas nos tempos 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 240 e 300 minutos. Já para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k) de cada CP foi empregada a Equação 8.

$$k = \frac{2,3 * a * S_b}{60 * S_p * t} * \log \frac{H_1}{H_2} \quad \dots (8)$$

Onde:

k – coeficiente de permeabilidade (cm/s);

a – altura do CP (cm);

S_b – seção interna média da bureta (cm²);

S_p – seção do CP (cm²);

H₁ – nível do menisco corresponde ao tempo t₁ (mm);

H₂ – nível do menisco corresponde ao tempo t₂ (mm);

t – t₁ - t₂ (min).

De forma complementar ao ensaio de permeabilidade dos solos, foram calculados o índice de vazios e o grau de saturação das amostras submetidas ao referido ensaio. O DNIT (2006) destaca que o índice de vazios é um fator que tem influência direta na permeabilidade de um solo, sendo o mesmo expresso pela Equação 9. Enquanto o grau de saturação de um solo se refere à porcentagem do volume total de vazios que está preenchido por água, sendo o mesmo calculado através da Equação 10.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad \dots (9)$$

Onde:

ρ_s – massa específica do solo (g/cm³);

ρ_d – massa específica aparente seca (g/cm³).

$$S = \frac{\rho_s * w}{e * \rho_w} \quad \dots (10)$$

Onde:

ρ_s – massa específica do solo (g/cm³);

w – teor de umidade (%);

e – índice de vazios;

ρ_w – massa específica da água à 4°C (g/cm³).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados obtidos através da realização dos ensaios, assim como será feita a análise dos mesmos.

4.1 Ensaios de caracterização

Com o objetivo de caracterizar os solos em estudo, foram realizados os ensaios de granulometria, por peneiramento e sedimentação, limite de liquidez, limite de plasticidade, assim como o ensaio de massa específica dos grãos de solo, sendo o último empregado nos cálculos referentes ao ensaio de sedimentação. De posse dos dados provenientes dos ensaios supracitados, foram elaborados gráficos e tabelas de forma a facilitar a análise dos mesmos.

Na Tabela 10 estão os resultados dos ensaios de LL, LP e massa específica dos grãos de solo, além do valor calculado do índice de plasticidade.

Tabela 10 – Limites de Atterberg e massa específica dos grãos

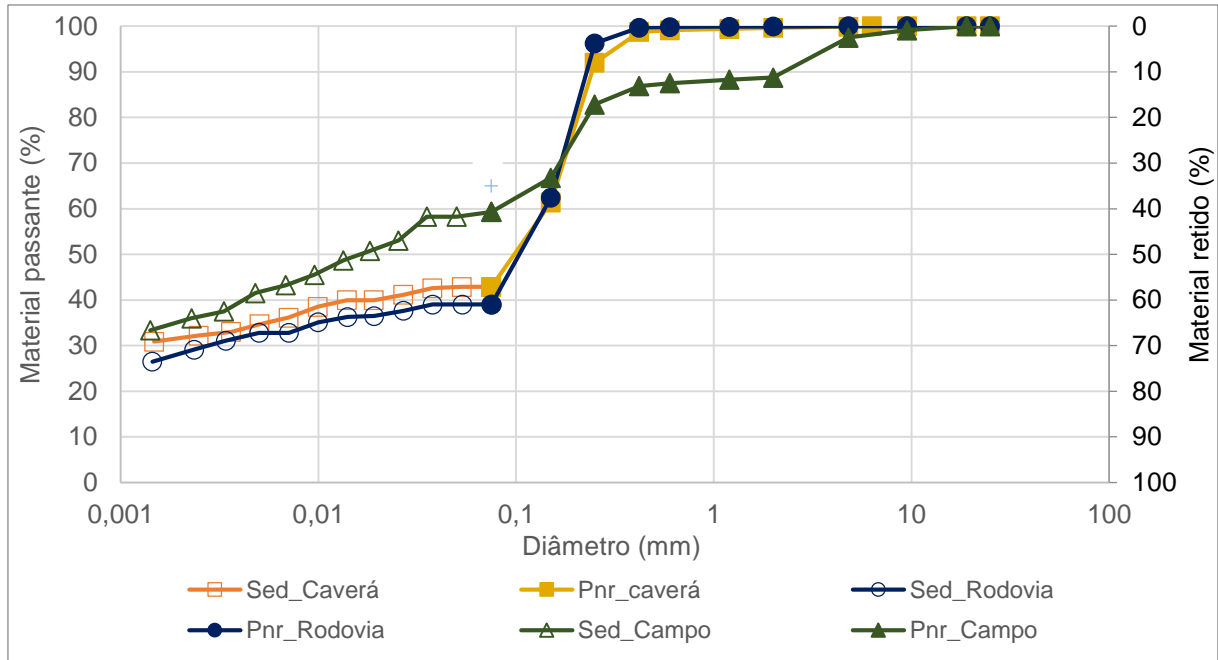
Solo	Campo	Rodovia	Caverá
Limite de liquidez (%)	30,87	25,93	23,91
Limite de plasticidade (%)	23,84	17,99	14,45
Índice de plasticidade (%)	7,03	7,94	9,46
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,71	2,71	2,52

Fonte: Autoria própria

Com relação ao índice de plasticidade dos solos estudados e baseando-se nos valores apresentados como referência por Caputo (1988), os 3 materiais ensaiados são considerados medianamente plásticos, uma vez que o IP dos mesmos se encontra entre 7 e 15%.

Através dos dados oriundos dos ensaios de granulometria, por peneiramento e sedimentação, foram elaboradas as curvas granulométricas para os solos em estudo. A representação dos dados através das curvas granulométricas se deu através da Figura 34, sendo as mesmas referentes aos solos Campo, Rodovia e Caverá.

Figura 34 - Curvas granulométricas dos solos Campo, Rodovia e Caverá



Fonte: Autoria própria

Analisando as curvas granulométricas geradas, com base na porcentagem de material passante na # 200, é possível verificar que o solo Campo apresenta mais de 50% do material ensaiado passante na peneira de abertura 2 mm. Já observando as curvas dos solos Rodovia e Caverá pode-se ver que pouco menos de 40% das amostras passam na referida malha. Com relação ao tipo de distribuição granulométrica, pode-se dizer que o solo Campo é um material bem graduado, uma vez que apresenta ampla faixa de tamanhos de partículas, enquanto os solos Rodovia e Caverá apresentam granulometria uniforme.

Com os dados referentes aos ensaios de limite de consistência, presentes na Tabela 10, e com os dados do ensaio de granulometria por peneiramento, calculou-se o IG de cada solo, com o emprego da Equação 3. A Tabela 11 traz as porcentagens de material retido nas peneiras empregadas no ensaio de granulometria por peneiramento dos solos, bem como o valor calculado de IG a ser empregado pelo sistema TRB.

Com os dados que constam na Tabela 10 e na Tabela 11 procedeu-se com a classificação dos 3 solos utilizando os sistemas SUCS e TRB para tal.

Tabela 11 - Dados do ensaio de granulometria por peneiramento e valor de IG dos solos

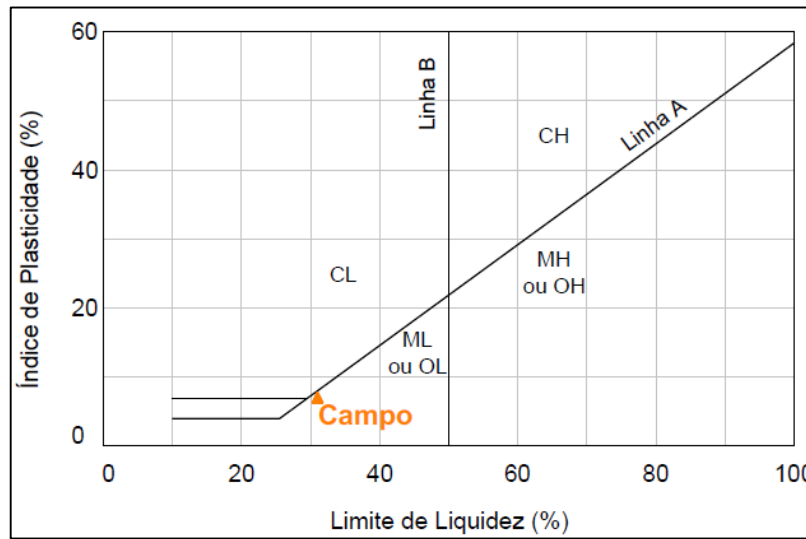
Nº	Peneiras Abertura (mm)	Material passante (%)		
		Campo	Rodovia	Caverá
1"	25	100	100	100
3/4"	19	100	100	100
3/8"	9,5	99,11	100	100
# 4	4,8	97,53	100	99,91
# 10	2	88,74	99,95	99,64
# 16	1,2	88,27	99,90	99,40
# 30	0,6	87,52	99,82	99,13
# 40	0,42	86,89	99,70	98,73
# 60	0,25	82,85	96,24	92,01
# 100	0,15	66,77	62,45	61,37
# 200	0,075	59,33	39,00	39,24
Fundo	-	56,73	35,95	39,09
IG		4,41	0,21	0,85

Fonte: Autoria própria

4.2 Classificação dos solos pelos sistemas SUCS e TRB

Como mais de 50% da amostra do solo Campo passa na peneira #200, conforme dado contido na Tabela 11, tal material apresenta granulometria fina, desta forma para classificá-lo através do sistema SUCS foi empregada a Carta de Plasticidade. A Figura 35 traz a classificação final do solo Campo através do sistema SUCS.

Figura 35 – Classificação do solo Campo pelo sistema SUCS

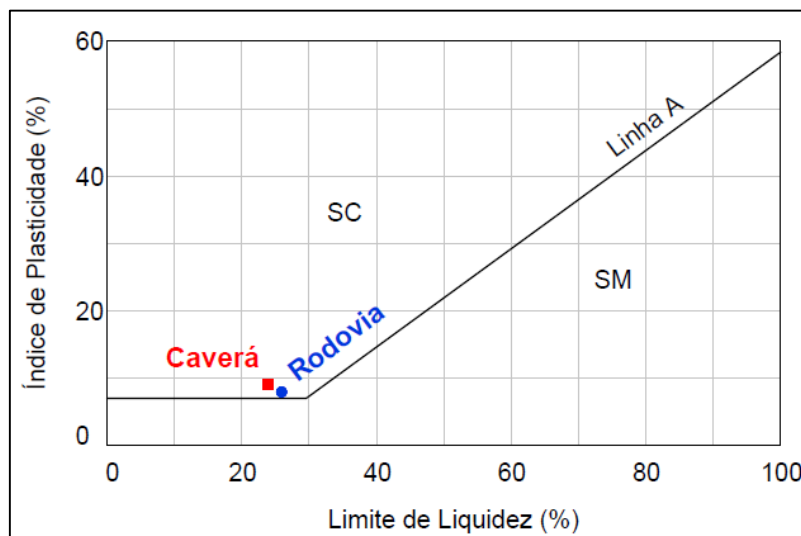


Fonte: Adaptado de Pinto (2006, p.68)

A região da Carta de Plasticidade na qual o solo Campo está inserido compreende os solos ML e OL, sendo o último um solo orgânico. Como o referido material não apresenta as particularidades de um solo orgânico, sendo elas coloração escura e odor característico, o mesmo recebeu a sigla ML segundo o SUCS. Como visto na Figura 35, o ponto obtido através da união dos valores de LL e IP da amostra situa-se abaixo da Linha A, recebendo assim a classificação de silte (M) e de forma complementar é denominado como material de baixa compressibilidade, pois seu $LL < 50\%$, ou seja, está situado à esquerda da Linha B. De acordo com o DNIT (2006), a sigla ML engloba siltes inorgânicos, areias muito finas e areias finas siltosas e argilosas.

Já com relação aos solos Rodovia e Caverá, os mesmos apresentam porcentagem passante na peneira #200 inferior a 50%, desta forma os materiais receberam inicialmente a denominação de solos de granulometria grossa. A Tabela 11 mostra que tanto o solo Rodovia quanto o solo Caverá apresentam porcentagem passante na peneira #4 superior a 50, sendo assim denominados de areia. Avaliando novamente a porcentagem de solo passante na peneira #200, constata-se que mais de 12% de material passa na mesma, para ambos os solos, sendo assim o gráfico de plasticidade foi novamente empregado de forma a definir a classificação final dos materiais. A Figura 36 apresenta a classificação final dos solos Rodovia e Caverá pelo sistema SUCS.

Figura 36 - Classificação dos solos Rodovia e Caverá pelo sistema SUCS



Fonte: Adaptado de Pinto (2006, p.68)

Com o emprego dos dados de LL e IP presentes na Tabela 10, constata-se que os solos Rodovia e Caverá estão localizados acima da Linha A, sendo a eles atribuída a sigla SC. Tal conjunto de letras denota ao solo a classificação principal de areia e de forma secundária o mesmo é identificado como argila, recebendo assim a identificação de areia argilosa (SC).

Com base nos dados da Tabela 10 e da Tabela 11, fez-se a classificação dos solos Campo, Rodovia e Caverá conforme o sistema TRB. A Tabela 12 traz os dados pertinentes à classificação identificados, conforme a metodologia proposta pelo sistema em questão.

Tabela 12 – Classificação dos solos Campo, Rodovia e Caverá pelo sistema TRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES (35% ou menos passando na peneira Nº 200)							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS (35% ou mais passando na peneira Nº 200)			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 e 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 siltosas 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 que do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006, p.56)

Como é perceptível através da Tabela 11, os solos Campo, Rodovia e Caverá apresentam mais de 35% de material passando na peneira #200, sendo assim foi consultado o IP das amostras, presente na Tabela 10, de forma a se diferenciar os solos siltosos dos argilosos. Como o índice de plasticidade está abaixo do valor limite para os solos siltosos, que é de 10%, para se determinar o grupo ao qual os materiais estão inseridos foi preciso consultar o valor de IG dos mesmos. Como o índice de grupo dos 3 solos não ultrapassou o valor 8, estes foram apontados como pertencentes ao Grupo A-4 do sistema TRB.

O grupo ao qual os solos Campo, Rodovia e Caverá foram inseridos, segundo a metodologia do sistema TRB de classificação, refere-se a um solo siltoso, ou seja, um material de granulometria fina e que apresenta baixa compressibilidade.

4.3 Classificação dos solos pela Metodologia MCT

Para a classificação das amostras de solo por meio da Metodologia MCT foram executados os ensaios de compactação Mini-MCV e Perda de massa por imersão. Os resultados oriundos da realização dos devidos ensaios para os solos Campo, Rodovia e Caverá estão apresentados na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15, respectivamente.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de Mini-MCV e Perda de massa por imersão do solo Campo

ENSAIO MINI MCV																								
Cilindro nº	Cilindro_6				Cilindro_1				Cilindro_2				Cilindro_3				Cilindro_4				Cilindro_5			
Peso do solo úmido a compactar (g)	200				200				200				200				200				200			
Peso do solo seco compactado (g)	159,26				162,67				167,04				170,71				175,30				180,33			
Umidade (%)	25,58				22,95				19,73				17,16				14,09				10,91			
Aferição (mm)	45,70				46,00				46,05				45,94				45,92				45,88			
nº de golpes	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)
zero	31,1				14,71				10,2				4,94				4,76				14,53			
Golpe1	39,77	55,46	2,38	1,46	33,57	61,51	9,570	1,35	28,01	66,72	13,56	1,28	24,16	70,14	12,13	1,24	21,25	72,81	10,16	1,23	20,9	73,078	9,080	1,26
Golpe2	41,72	53,66	0,73	1,51	39,5	56,02	3,94	1,48	35	60,24	10,16	1,41	30,06	64,69	12,17	1,34	26,24	68,20	10,51	1,31	25,51	68,819	7,04	1,33
Golpe3	42,07	53,34		1,52	42,25	53,47	1,31	1,55	38,88	56,65	6,31	1,50	34,66	60,43	10,52	1,44	29,15	65,50	10,54	1,36	27,5	66,981	7,16	1,37
Golpe4	42,15	53,27		1,52	43,14	52,65		1,57	41,57	54,15	3,39	1,57	36,29	58,93	8,34	1,48	31,41	63,42	10,12	1,41	29,98	64,690	6,02	1,42
Golpe6	42,32	53,11		1,53	43,43	52,38		1,58	44,5	51,44	0,65	1,65	39,89	55,60	7,31	1,56	34,54	60,52	9,24	1,48	31,04	63,710	6,62	1,44
Golpe8	42,45	52,99		1,53	43,44	52,37		1,58	45,16	50,82		1,67	42,23	53,43	4,920	1,63	36,75	58,48	8,35	1,53	32,55	62,315	6,12	1,47
Golpe12					43,56	52,26		1,59	45,19	50,80		1,67	45,18	50,70	1,87	1,71	39,69	55,76	6,92	1,60	34,66	60,366	5,22	1,52
Golpe16									44,96	51,01		1,67	44,63	51,21		1,70	41,53	54,06	5,79	1,65	36,0	59,128	4,56	1,55
Golpe24									45,15	50,83		1,67	47,2	48,83		1,78	43,78	51,98	4,21	1,72	37,66	57,594	3,72	1,59
Golpe32													47,15	48,88		1,78	45,1	50,76	3,18	1,76	38,67	56,661	3,03	1,62
Golpe48													47,05	48,97		1,78	46,61	49,36	1,87	1,81	39,88	55,543	2,18	1,65
Golpe64																	47,32	48,71		1,83	40,56	54,915	1,7	1,67
Golpe96			-				-				-				-		47,99	48,09	-	1,86	41,38	54,157	-	1,70
Golpe128			-				-				-				-		48,28	47,82	-	1,87	41,7	53,862	-	1,71
Golpe192			-				-				-				-		48,48	47,63	-	1,87	42,06	53,529	-	1,72
Golpe256			-				-				-				-				-		42,26	53,344	-	1,72

ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO						
Cápsula nº	6	1	2	3	4	5
Comprimento saliente (cm)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Volume (cm³)	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
Peso do solo saliente (g)	30,05	31,13	32,86	34,86	36,80	33,81
Peso do solo seco + cápsula (g)	390,15	413,58	414,22	341,66	435,70	393,85
Peso da cápsula (g)	312,92	346,92	361,66	339,38	385,01	345,04
Peso do solo seco (g)	77,23	66,66	52,56	2,28	50,69	48,81
Pi (%)	256,98	214,15	159,96	6,54	137,74	144,38

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de Mini-MCV e Perda de massa por imersão do solo Rodovia

ENSAIO MINI MCV																								
Cilindro_nº	Cilindro_1				Cilindro_2				Cilindro_3				Cilindro_4				Cilindro_5				Cilindro_6			
Peso do solo úmido a compactar (g)	200				200				200				200				200				200			
Peso do solo seco compactado (g)	173,99				175,65				177,29				179,10				180,10				181,85			
Umidade (%)	14,95				13,86				12,8100				11,67				11,05				9,98			
Aferição (mm)	46,05				46,20				46,26				46,20				46,27				46,12			
GolpeNº	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)
zero	15,26				10,77				6,80				8,58				5,63				3,70			
Golpe1	36,47	58,88	10,51	1,50	30,91	64,21	13,91	1,39	26,80	68,11	14,90	1,33	26,50	68,31	13,43	1,34	23,33	71,35	13,44	1,29	20,22	74,03	12,66	1,25
Golpe2	42,25	53,52	5,34	1,66	38,42	57,23	10,07	1,56	34,54	60,90	12,79	1,48	33,30	61,99	12,38	1,47	30,02	65,12	12,85	1,41	26,42	68,28	12,81	1,36
Golpe3	45,22	50,77	2,37	1,75	42,31	53,62	6,03	1,67	38,89	56,86	10,28	1,59	37,24	58,33	10,94	1,56	34,03	61,39	11,75	1,49	30,19	64,78	12,41	1,43
Golpe4	46,98	49,14	0,57	1,80	44,82	51,28	3,39	1,74	41,70	54,24	7,70	1,66	39,93	55,83	9,42	1,63	36,77	58,84	10,66	1,56	32,88	62,29	11,70	1,49
Golpe6	47,55	48,61		1,82	47,65	48,65	0,50	1,84	45,28	50,91	3,79	1,77	43,49	52,52	6,57	1,74	40,53	55,34	8,62	1,66	36,62	58,82	10,21	1,57
Golpe8	47,59	48,57		1,82	48,49	47,87		1,87	47,33	49,00	1,64	1,84	45,68	50,48	4,35	1,81	42,87	53,16	7,15	1,73	39,23	56,39	8,86	1,64
Golpe12	47,59	48,57		1,82	48,34	48,01		1,86	49,17	47,29		1,91	48,18	48,16	1,74	1,89	45,78	50,46	4,58	1,82	42,60	53,27	6,83	1,74
Golpe16	47,55	48,61		1,82	48,21	48,13		1,86	49,40	47,08		1,92	49,35	47,07		1,94	47,43	48,92	2,97	1,87	44,58	51,43	5,57	1,80
Golpe24					48,15	48,19		1,86	49,07	47,39		1,91	50,06	46,41		1,97	49,15	47,32	1,35	1,94	46,83	49,34	3,71	1,88
Golpe32									48,97	47,48		1,90	50,03	46,44		1,96	50,02	46,51		1,97	48,09	48,17	2,55	1,92
Golpe48													49,92	46,54		1,96	50,36	46,19		1,99	49,43	46,93	1,21	1,97
Golpe64																1,99	50,40	46,16		1,99	50,15	46,26		2,00
Golpe96			-				-				-				-		50,50	46,06	-	1,99	50,54	45,90	-	2,02
Golpe128			-				-				-				-				-		50,64	45,81	-	2,02
Golpe192			-				-				-				-				-		50,64	45,81	-	2,02
Golpe256			-				-				-				-				-				-	
ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO																								
Cápsula nº	1				2				3				4				5				6			
Comprimento saliente (cm)	1,0				1,0				1,0				1,0				1,0				1,0			
Volume (cm³)	19,63				19,63				19,63				19,63				19,63				19,63			
Peso do solo saliente (g)	35,79				36,45				37,34				38,48				39,11				39,70			
Peso do solo seco + cápsula (g)	442,16				438,06				377,79				403,86				345,03				363,41			
Peso da cápsula (g)	346,89				361,60				339,32				384,97				344,97				312,88			
Peso do solo seco (g)	95,27				76,46				38,47				18,89				0,06				50,53			
Pi (%)	266,17				209,76				103,02				49,09				0,15				127,28			

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Mini-MCV e Perda de massa por imersão do solo Caverá

ENSAIO MINI MCV																								
Cilindro nº	Cilindro_1				Cilindro_2				Cilindro_3				Cilindro_4				Cilindro_5				Cilindro_6			
Peso do solo úmido a compactar (g)	200,00				200,00				200,00				200,00				200,00				200,00			
Peso do solo seco compactado (g)	174,03				175,73				177,16				178,86				180,67				181,74			
Umidade (%)	14,92				13,81				12,89				11,82				10,70				10,05			
Aferição (cm)	46,10				46,15				46,06				46,10				46,11				46,02			
nº de golpes	Extensômetro (mm)	Altura (cm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)	Extensômetro (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	M.E.A.S. (g/cm³)
zero	11,89				15,60				12,31				9,69				7,35				6,11			
Golpe1	31,79	63,27	13,44	1,40	32,08	63,06	12,10	1,42	29,17	65,66	12,95	1,37	26,46	68,22	13,22	1,34	24,48	70,07	12,49	1,31	22,28	71,99	11,77	1,29
Golpe2	39,03	56,56	8,09	1,57	38,35	57,24	9,70	1,56	35,81	59,50	11,57	1,52	33,27	61,90	12,20	1,47	30,74	64,26	12,18	1,43	28,13	66,57	11,77	1,39
Golpe3	42,87	53,00	4,15	1,67	41,95	53,90	5,98	1,66	39,50	56,08	9,29	1,61	37,04	58,40	10,99	1,56	34,40	60,86	11,34	1,51	31,55	63,40	12,47	1,46
Golpe4	45,23	50,81	1,87	1,74	44,18	51,83	3,71	1,73	42,12	53,65	6,51	1,68	39,68	55,96	9,54	1,63	36,97	58,48	10,37	1,57	34,05	61,09	10,76	1,52
Golpe6	47,04	49,13		1,80	47,06	49,16	0,97	1,82	45,44	50,57	3,02	1,78	43,20	52,69	6,58	1,73	40,63	55,08	8,47	1,67	37,51	58,48	9,44	1,58
Golpe8	47,12	49,05		1,81	48,05	48,24		1,86	47,38	48,78	1,05	1,85	45,47	50,58	4,14	1,80	42,92	52,96	6,97	1,74	39,90	55,96	8,21	1,65
Golpe12	47,02	49,15		1,80	47,93	48,35		1,85	48,79	47,47		1,90	48,03	48,21	1,38	1,89	45,74	50,34	4,58	1,83	44,02	53,65	5,36	1,73
Golpe16	47,10	49,07		1,81	47,89	48,38		1,85	48,63	47,62		1,89	49,22	47,11		1,93	47,34	48,86	3,06	1,88	44,81	51,83	5,22	1,79
Golpe24					48,03	48,25		1,85	48,46	47,78		1,89	49,78	46,59		1,96	49,10	47,23	1,25	1,95	46,95	50,81	3,58	1,82
Golpe32									48,43	47,80		1,89	49,61	46,74		1,95	49,89	46,49		1,98	48,11	48,06	2,50	1,93
Golpe48													49,41	46,93		1,94	50,32	46,09		2,00	49,38	46,89	1,26	1,97
Golpe64																	50,40	46,02		2,00	50,03	46,29		2,00
Golpe96			-				-				-				-		50,35	46,07	-	2,00	50,53	45,82	-	2,02
Golpe128			-				-				-				-				-		50,61	45,75	-	2,02
Golpe192			-				-				-				-				-		50,64	45,72	-	2,02
Golpe256			-				-				-				-				-				-	
ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO (Pi)																								
Cápsula Nº	11				22				33				44				55				66			
Comprimento saliente (cm)	1,0				1,0				1,0				1,0				1,0				1,0			
Volume (cm³)	19,63				19,63				19,63				19,63				19,63				19,63			
Peso do solo saliente (g)	35,47				36,42				37,06				38,11				39,22				39,75			
Peso do solo seco + cápsula (g)	245,35				258,40				412,37				391,73				264,63				374,91			
Peso da cápsula (g)	145,75				166,19				331,24				350,60				264,46				334,47			
Peso do solo seco (g)	99,60				92,21				81,13				41,13				0,17				40,44			
Pi (%)	280,84				253,21				218,91				107,92				0,43				101,74			

Fonte: Autoria própria

Com os dados provenientes do ensaio Mini-MCV, foram obtidos os gráficos constituídos pelas curvas de deformabilidade (Mini-MCV x Δh) e compactação (MEAS x Teor de umidade). Do gráfico Mini-MCV x Δh , obteve-se o coeficiente c' . Já por meio do gráfico MEAS x Teor de umidade foi obtido o coeficiente d' . Enquanto com os dados do ensaio de Perda de massa por imersão foi confeccionado o gráfico P_i x Mini-MCV, do qual obteve-se o valor de Perda de massa por imersão do solo. Já o coeficiente e' de cada solo foi encontrado através da Equação 7 que relaciona a P_i com o coeficiente d' .

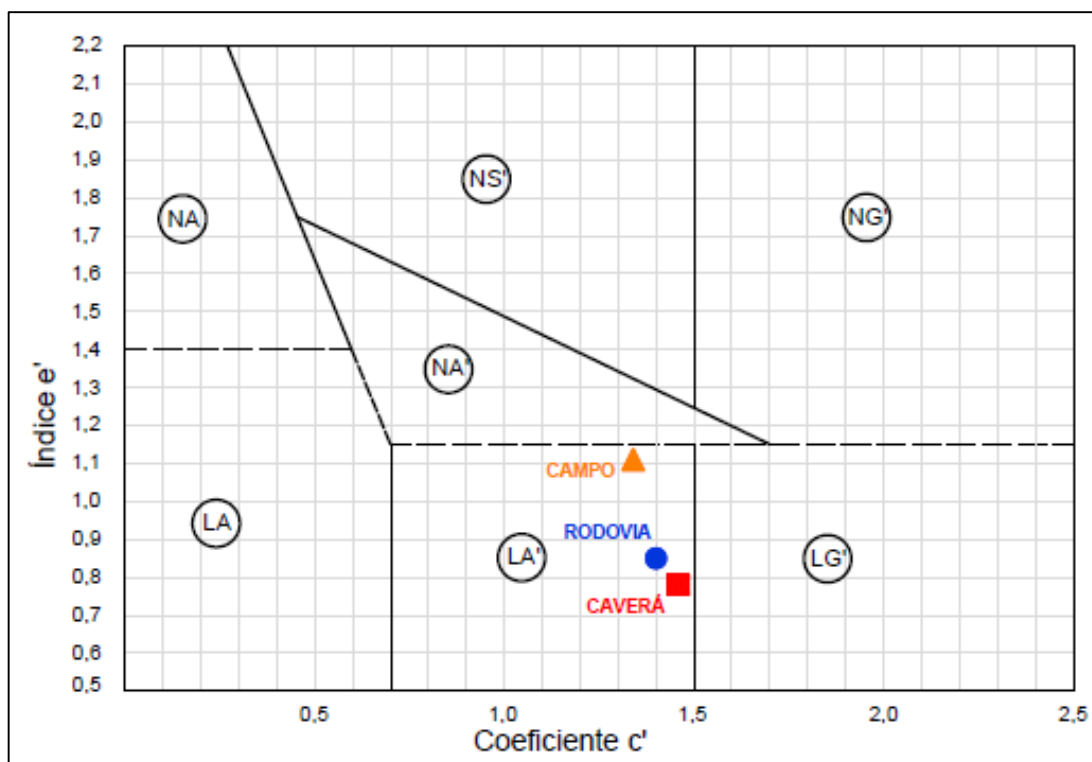
A Tabela 16 traz os valores obtidos para os coeficientes c' , d' e e' , bem como a Perda de massa por imersão dos solos Campo, Rodovia e Caverá, além da classificação dos mesmos por meio da Metodologia MCT. Já a Figura 37 apresenta o ábaco empregado para a classificação MCT, sendo possível visualizar os solos locados segundo seus coeficientes.

Tabela 16 - Parâmetros para a classificação pela Metodologia MCT

Solo	Coeficiente c'	Coeficiente d'	P_i (%)	Coeficiente e'	Classificação MCT
Campo	1,34	35,83	80	1,11	LA'
Rodovia	1,40	112,90	44	0,85	LA'
Caverá	1,46	153,85	35	0,78	LA'

Fonte: Autoria própria

Figura 37 - Ábaco para a classificação dos solos pela Metodologia MCT



Fonte: Autoria própria

Com relação aos corpos de prova submetidos ao ensaio de perda de massa por imersão, os mesmos apresentaram desprendimento normal de solo. Em decorrência do apresentado, o fator de correção (F_c) igual a 1,0 foi empregado no cálculo da perda de massa por imersão dos solos em estudo.

O coeficiente c' é um indicativo da argilosidade do solo, uma vez que valores contidos no intervalo entre 1,0 e 1,5 como é o caso dos solos Campo, Rodovia e Caverá podem representar areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas e argilas siltosas como materiais constituintes.

O coeficiente e' é o responsável por fazer a separação dos solos de comportamento laterítico (L) dos solos de comportamento não laterítico (N). O coeficiente e' de 1,15 é empregado para fazer a separação dos materiais de diferentes comportamentos, sendo que valores acima do referenciado denotarão ao solo a sigla N, caso contrário receberão a sigla L. Através da Tabela 16 constata-se que os solos em estudo apresentam comportamento laterítico (L), uma vez que os coeficientes estão abaixo de 1,15.

Ao término da confecção e análise dos gráficos, bem como da realização dos cálculos necessários, atribuiu-se aos solos em estudo as devidas siglas referentes à

classificação por meio da Metodologia MCT. Como mostra a Figura 37, os solos Campo, Rodovia e Caverá receberam a sigla LA', denotando aos mesmos a classificação de solo arenoso laterítico.

4.4 Permeabilidade dos solos

As leituras referentes ao nível do menisco, assim como os valores calculados de coeficiente de permeabilidade (k), encontram-se na Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19, sendo as mesmas referentes aos solos Campo, Rodovia e Caverá, respectivamente.

Tabela 17 - Resultado do ensaio de permeabilidade para o solo Campo

SOLO CAMPO						
Tempo (min)	Permeâmetro_1		Permeâmetro_2		Permeâmetro_3	
	Nível do menisco (cm)	k (m/s)	Nível do menisco (cm)	k (m/s)	Nível do menisco (cm)	k (m/s)
ZERO	220,50	-	220,40	-	219,70	-
10	220,45	7,55095E-10	220,30	1,51105E-09	219,65	7,57845E-10
20	220,40	7,55181E-10	220,20	1,51139E-09	219,60	7,57931E-10
30	220,40	5,03454E-10	220,10	1,51173E-09	219,60	5,05287E-10
40	220,35	5,66450E-10	220,0	1,51208E-09	219,60	3,78966E-10
60	220,35	3,77633E-10	219,85	1,38654E-09	219,55	3,79009E-10
80	220,30	3,77676E-10	219,70	1,32397E-09	219,50	3,79052E-10
120	220,25	3,14766E-10	219,40	1,26178E-09	219,50	2,52701E-10
240	220,05	2,83418E-10	218,60	1,13768E-09	219,40	1,89569E-10
300	219,90	3,02415E-10	218,20	1,11342E-09	219,25	2,27561E-10
	Média	4,70676E-10	Média	1,36329E-09	Média	4,25324E-10
				K _{médio} = 7,53098E-10 (m/s)		

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 - Resultado do ensaio de permeabilidade para o solo Rodovia

SOLO RODOVIA						
Tempo (min)	Permeâmetro_4		Permeâmetro_5		Permeâmetro_6	
	Nível do menisco (cm)	k (m/s)	Nível do menisco (cm)	k (m/s)	Nível do menisco (cm)	k (m/s)
ZERO	206	-	206,45	-	207,8	-
10	205,9	1,61670E-09	206,35	1,61317E-09	207,7	1,60269E-09
20	205,8	1,61709E-09	206,25	1,61356E-09	207,6	1,60308E-09
30	205,7	1,61748E-09	206,15	1,61396E-09	207,5	1,60346E-09
40	205,65	1,41547E-09	206,1	1,41238E-09	207,45	1,40320E-09
60	205,55	1,21356E-09	205,95	1,34562E-09	207,3	1,33686E-09
80	205,4	1,21400E-09	205,8	1,31245E-09	207,1	1,40438E-09
120	205,2	1,07964E-09	205,65	1,07728E-09	206,7	1,47268E-09
240	204,55	9,79971E-10	204,95	1,01167E-09	205,6	1,47661E-09
300	204,25	9,46873E-10	204,6	9,99033E-10	205,1	1,45153E-09
	Média	1,30009E-09	Média	1,33324E-09	Média	1,48383E-09
$K_{\text{médio}} = 1,37238E-09 \text{ (m/s)}$						

Fonte: Autoria própria

Tabela 19 - Resultado do ensaio de permeabilidade para o solo Caverá

SOLO CAVERÁ						
Tempo (min)	Permeâmetro_7		Permeâmetro_8		Permeâmetro_9	
	Nível do menisco (cm)	k (m/s)	Nível do menisco (cm)	k (m/s)	Nível do menisco (cm)	k (m/s)
ZERO	201,4	-	199,15	-	201	-
10	201,4	0,00000E+00	199,15	0,00000E+00	201	0,00000E+00
20	201,4	0,00000E+00	199,1	4,18028E-10	200,95	4,14180E-10
30	201,4	0,00000E+00	199,1	2,78685E-10	200,95	2,76120E-10
40	201,4	0,00000E+00	199,05	4,18080E-10	199,9	4,56792E-09
60	201,35	1,37786E-10	199,05	2,78720E-10	199,9	3,04528E-09
80	201,35	1,03339E-10	199	3,13600E-10	200,85	3,10712E-10
120	201,3	1,37803E-10	198,9	3,48532E-10	200,8	2,76223E-10
240	201,05	2,41305E-10	198,65	3,48751E-10	200,6	2,76361E-10
300	201,05	1,93044E-10	198,5	3,62838E-10	200,45	3,04110E-10
	Média	1,62655E-10	Média	3,45904E-10	Média	1,18386E-09
$K_{\text{médio}} = 5,6414094E-10 \text{ (m/s)}$						

Fonte: Autoria própria

Com relação ao tempo decorrido entre o posicionamento do permeâmetro ligado à mangueira de alimentação, estando a mesma preenchida com água, e a verificação de que o líquido havia extravasado pelo canudo contido na face superior do permeâmetro, foi de cerca de 45 dias para o solo Campo, e aproximadamente 15 dias para os solos Rodovia e Caverá. Após a troca da mangueira, do canudo inferior para o canudo superior, a mesma foi novamente preenchida com água, sendo que para a execução do ensaio de permeabilidade foram aguardados alguns dias, visando que a água percolasse pela maior área possível do CP.

Os valores de coeficiente k , em metros/segundo, obtidos para os permeâmetros alusivos ao solo Campo, que se encontram na Tabela 17, apresentaram valores com considerável proximidade entre si. Desta forma, o coeficiente de permeabilidade médio retornou valor similar aos coeficientes obtidos para cada permeâmetro. O mesmo ocorreu com os solos Rodovia e Caverá, cujos dados do ensaio de permeabilidade encontram-se na Tabela 18 e na Tabela 19.

Os coeficientes de permeabilidade ($K_{\text{médio}}$) calculados para os solos Campo, Rodovia e Caverá, apresentam valores inferiores a 1×10^{-9} (m/s). Desta forma, para essa metodologia de estudo da permeabilidade, que engloba a avaliação da permeabilidade com carga constante, a forma de compactação da amostra que foi por impacto pelo procedimento da metodologia MCT, com energia normal de compactação, e com a realização do ensaio de permeabilidade no próprio molde onde foi feita a compactação, baseado na Tabela 1, verifica-se que os três solos estudados, apresentaram valores de permeabilidade característicos de uma argila.

A Tabela 20 traz os dados necessários para o cálculo do índice de vazios, assim como o grau de saturação das amostras de solo.

Tabela 20 - Índice de vazios, grau de saturação e dados para o cálculo

Solo	Campo	Rodovia	Caverá
Massa específica do solo (g/cm ³)	2,71	2,71	2,52
Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³)	1,67	1,88	1,88
Teor de Umidade (%)	20,08	13,42	13,71
Massa específica da água à 4°C (g/cm ³)		1	
Índice de vazios (e)	0,62	0,44	0,34
Grau de saturação (S) (%)	87,38	82,38	101,49

Fonte: Autoria própria

O índice de vazios (e) representa a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos de um solo, sendo que para um mesmo volume de sólidos, quanto menor for o volume de vazios menor será o índice de vazios e por consequência ocorrerá uma redução da permeabilidade do material. Os dados referentes ao índice de vazios dos solos Campo, Rodovia e Caverá, presentes na Tabela 20, demonstram que o volume de sólidos é maior que o volume de vazios, uma vez que o “ e ” referente a cada amostra retornou valor abaixo de 1. Com base no apresentado, é possível afirmar que com relação ao índice de vazios os corpos de prova submetidos ao ensaio de permeabilidade retornarão valores baixos para o coeficiente de permeabilidade.

Com relação ao grau de saturação dos solos, percebe-se por meio da Tabela 20 que o solo Caverá encontra-se inteiramente saturado, enquanto os solos Campo e Rodovia não apresentam saturação total. Como a percolação de água no interior de um solo não saturado não é capaz de remover todo o ar contido no mesmo, ocorre a formação de bolhas de ar que representam obstáculos para o fluxo de água. Com base no apresentado, o coeficiente de permeabilidade dos solos Campo e Rodovia, cujo grau de saturação é inferior a 100%, poderia sofrer um acréscimo caso estivesse totalmente saturado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao término da análise dos resultados, os solos Campo, Rodovia e Caverá receberam as denominações de silte de baixa compressibilidade (ML), areia argilosa (SC) e areia argilosa (SC), respectivamente conforme o sistema SUCS, e foram alocados no grupo A-4 (solos siltosos) do sistema TRB. Enquanto a Metodologia MCT apontou o grupo de solo arenoso laterítico (LA') como classificação para os 3 solos trabalhados, já com relação ao coeficiente de permeabilidade os materiais apresentam comportamento condizente com uma argila.

Com o intuito de correlacionar entre si as classificações obtidas por meio dos sistemas SUCS e TRB, foram empregados o Quadro 2 e o Quadro 3, presentes no item 2.3.3, que fazem a comparação entre os sistemas TRB e SUCS, e SUCS e TRB, respectivamente. No Quadro 2 vemos que o grupo A-4, classificação atribuída aos 3 solos por meio do sistema TRB, tem o silte de baixa compressibilidade (ML), classificação atribuída ao solo Campo, como solo de maior possibilidade de comparação, enquanto a areia argilosa (SC), classificação dada aos solos Rodovia e Caverá, como solos com possibilidade de comparação no sistema SUCS. Analogamente, no Quadro 3 tem-se que o silte de baixa compressibilidade (ML) apresenta como comparação mais provável os materiais oriundos do grupo A-4 do sistema TRB, já a areia argilosa (SC) apresenta o grupo A-4 do sistema TRB como comparação possível. Com base no apresentado, pode-se constatar que a classificação atribuída a cada solo estudado, por meio dos sistemas SUCS e TRB, são classificações que possuem correlação.

Consultando Nogami e Villibor (1994), verifica-se que os materiais que receberam a classificação de solo arenoso laterítico (LA') pela Metodologia MCT, como é o caso dos solos Campo, Rodovia e Caverá, apresentam como solo correspondente no sistema SUCS a areia argilosa (SC), sigla atribuída aos solos Rodovia e Caverá, assim como no sistema TRB é compatível com o grupo A-4 (solos siltosos). Apesar do solo siltoso de baixa plasticidade (ML), referente ao solo Campo, não apresentar correspondência direta como o grupo LA' da Metodologia MCT, o mesmo apresenta compatibilidade com o grupo A-4 do sistema TRB, sendo possível correlaciona-lo, mesmo que de forma indireta, ao solo arenoso laterítico (LA').

Com base no ensaio de permeabilidade dos solos Campo, Rodovia e Caverá, chegou-se à conclusão, por meio de cálculos, que o coeficiente de permeabilidade médio encontrado para cada material, denota solos com baixíssima permeabilidade. Já com relação as classificações oriundas da Metodologia MCT, é possível atestar com base em Villibor et al. (2009) que o coeficiente de permeabilidade para o solo LA' apresenta valores menores que 1×10^{-8} (m/s), denotando aos materiais permeabilidade baixa. Com base no apresentado, percebe-se que houve compatibilidade entre os mesmos, quando analisada a permeabilidade, sendo esta denotada através de cálculos e por meio de informações encontradas na literatura especializada.

Com base no trabalho de Emmert e Pereira (2016), presente no item 2.6.2, constata-se que o solo denominado pelos pesquisadores como SL recebeu classificação final, segundo o sistema TRB e a Metodologia MCT, como pertencente aos grupos A-4 e LA', respectivamente. Os resultados alcançados por Emmert e Pereira (2016) vem a corroborar com as classificações obtidas para os solos Campo, Rodovia e Caverá, ao que tange aos referidos sistemas de classificação.

Desta forma, é possível concluir que ao se analisar os solos Campo, Rodovia e Caverá com base nas classificações oriundas da Metodologia MCT, apresentam excelente desempenho quando empregados como aterro compactado, base de pavimento, reforço de subleito, subleito compactado e revestimento primário. Além disso, com relação à permeabilidade, tanto através do ensaio quanto por meio de dados encontrados na literatura, pode-se afirmar que os solos apresentam características satisfatórias quando o objetivo é a construção de alguma estrutura que tenha como requisito baixa permeabilidade.

6 CONCLUSÕES

- O grupo A-4 do sistema TRB tem no sistema SUCS o solo ML como material de maior possibilidade de comparação, enquanto o solo SC apresenta-se como material com possibilidade de comparação.
- Analogamente, o solo ML apresenta-se como material com maior possibilidade de comparação com o grupo A-4, já o solo SC apresenta o referido grupo do sistema TRB como possível comparação.
- O solo arenoso laterítico (LA') oriundo da Metodologia MCT apresenta correspondência direta com o grupo A-4 do sistema TRB e com o grupo SC do sistema SUCS. Mesmo que de forma indireta, ainda é possível correlacionar o grupo ML, pertencente ao sistema SUCS com o referido grupo da Metodologia MCT.
- Com base no ensaio de permeabilidade, houve compatibilidade entre os dados encontrados em Villibor et al. (2009) e os valores decorrentes dos ensaios e cálculos, realizados para os 3 solos.
- Os resultados da pesquisa realizada por Emmert e Pereira (2016), com relação ao sistema TRB e à Metodologia MCT, vem a corroborar com o obtido no presente trabalho.
- Com base nas classificações oriundas da Metodologia MCT, os solos apresentam excelente desempenho quando empregados como aterro compactado, base de pavimento, reforço de subleito, subleito compactado e revestimento primário. Além disso, com relação à permeabilidade os solos apresentam características satisfatórias quando o objetivo é a construção de alguma estrutura que tenha como requisito baixa permeabilidade.

7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Realizar a avaliação de solos provenientes de outras regiões, de forma a se trabalhar com materiais apresentando propriedades com significativas diferenças;
- Realizar estudos dos solos visando um emprego específico para o mesmo, como por exemplo a utilização em barragens de terra.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ALMEIDA, G.C.P. de. **Caracterização física e classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos Solos**: volume 1. São Carlos/Viçosa: Universidade de São Paulo/Escola de Engenharia de São Carlos, 1979.

CAMPOS, C.de O. **Elementos de Geologia**. 2. ed. Petrolina: [s.n.], 2009.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**: fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CONCIANI, W.; BURGOS, P.C.; BEZERRA, R.L. **Solos não saturados no contexto geotécnico**: capítulo 2. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CRAIG, R.F. **Mecânica dos Solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. 278 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 28 de agosto de 2016.

EMATER/DIT-UFRGS/DEP.SOLOS. Classificação dos solos - RS (2005?). Disponível em <http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu_filho=819&cod_menu=817&tipo_menu=ECONOMIA&cod_conteudo=1484>. Acesso em: 11 de abril de 2017.

EMMERT, F.; PEREIRA, R.S. Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 601-613, abr-jun, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Manual sobre pequenas barragens de terra**. Roma, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - DIRETORIA DE GEOCIÊNCIAS. Manuais Técnicos em Geociências – **Manual Técnico de Pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2007.

JARBAS, T.; SÁ, I.B.; PETRERE, V.G; TAURA, T.A. ÁRVORE DO CONHECIMENTO Bioma Caatinga: **Planossolos** (2018). Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g5twggzh02wx5ok01edq5s189t6ux.html> Acesso em: 10 de março de 2018.

KÄMPF, N.; STRECK, E.V. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**: capítulo 4. Porto Alegre: CPRM, 2010.

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

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LUCHESE, E.B.; FAVERO, L.O.B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001.

MACHADO, S.L.; VILAR, O.M. **Solos não saturados no contexto geotécnico: capítulo 4**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. Berkley/ EUA: John Wiley & Sons, Inc., 1976.

MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 256/94**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Mato Grosso, 1994.

_____. **DNER-ME 258/94**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Mato Grosso, 1994.

_____. **DNER-CLA 259/96**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Mato Grosso, 1996.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Identificação Expedita dos Grupos da Classificação MCT para Solos Tropicais**. Anais do X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.4, p. 1293-1300, Foz do Iguaçu, 1994.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

NUNES, M. S. **Fundamentos de Mecânicas dos Solos**. 15. ed. Belo Horizonte, 2010.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos: em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, H.G. dos et al. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Brasília: SPI, 1995.

SANTOS, H.G dos; ZARONI, M.J. **ÁRVORE DO CONHECIMENTO Solos tropicais: Neossolos** (2018). Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_16_2212200611542.html> Acesso em: 10 de março de 2018.

SILVA, T. O. et al. Sistemas de classificações geotécnicas de solos: estudo de caso aplicado à rodovia não pavimentada VCS 346, Viçosa, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 313-321, 2010.

SUGUIO, K. **Rochas sedimentares**: propriedades, gênese, importância econômica. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1980.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B. de.; MELFI, A. J. **Decifrando a Terra**: capítulo 8. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

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

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J.R.; SERRA, P.R.M.; ZUPPOLINI NETO, A. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**: Bases alternativas com Solos Lateríticos, Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.