

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**CAMPUS DO SERTÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

MARIA DE FÁTIMA DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DE DELMIRO GOUVEIA – AL**  
**APLICADO NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Delmiro Gouveia – AL

2017

MARIA DE FÁTIMA DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DE DELMIRO GOUVEIA – AL  
APLICADO NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, *Campus* do Sertão, como pré-requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> DSc. Rafaela Faciola Coelho de Souza.

Delmiro Gouveia - AL

2017

O48c Oliveira, Maria de Fátima de  
Caracterização geotécnica do solo de Delmiro Gouveia - AL  
aplicado na pavimentação rodoviária / Maria de Fátima de  
Oliveira – 2017.  
66f.: il.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de  
Alagoas, Delmiro Gouveia, 2017.

Orientação: Prof. Dra. Rafaela Faciola Coelho de Souza.

1. Caracterização do solo. 2. Pavimentação rodoviária.  
I. Título. II. Memorial Delmiro Gouveia

CDU 528.271.1 (813.5)

## Folha de Aprovação

MARIA DE FÁTIMA DE OLIVEIRA

(Caracterização geotécnica do solo de Delmiro Gouveia – AL aplicado na pavimentação rodoviária / trabalho de conclusão de curso em engenharia civil, da Universidade Federal de Alagoas, na forma normalizada de uso obrigatório)

Trabalho de conclusão de curso submetida a banca examinadora do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus do Sertão, e aprovado dia 06 de dezembro de 2017.

*Rafaela Fátima C. de Souza*

Prof.<sup>a</sup> DSc. Rafaela F. C. de Souza – UFAL Campus do Sertão (Orientadora)

### Banca Examinadora:

*Rafaela Fátima C. de Souza*

Prof.<sup>a</sup> DSc. Rafaela F. C. de Souza – UFAL Campus do Sertão (Orientadora)

*Vinicius Costa Correia*

Prof. MSc. Vinicius Costa Correia - UFAL Campus do Sertão (Examinador Interno)

*Karlisson André Nunes da Silva*

Prof. MSc. Karlisson André Nunes da Silva - UFAL Campus do Sertão (Examinador Interno)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida e amor que sempre demonstrou por mim, me guiando e orientando nas decisões que deviam ser tomadas ao longo desta caminhada.

Aos meus pais Maria Helena e Cicero Venâncio, que são a base da minha vida. Obrigado por todo o empenho, dedicação e carinho para que eu pudesse chegar até aqui. As minhas irmãs e meu irmão por toda ajuda durante esses anos, não teria conseguido sem vocês.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial a minha orientadora Rafaela Faciola Coelho de Souza pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Ao meu namorado, melhor amigo e companheiro de todas as horas, Iago Henrique, pelo amor, carinho e compreensão.

A todos os meus amigos e colegas, em especial a Leandra uma grande amiga que encontrei durante minha formação e que com certeza vai continuar presente em minha vida.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida.

A toda minha família, em especial a minha mãe Maria Helena por toda colaboração e incentivo na busca da realização desse grande sonho.

## RESUMO

Neste presente trabalho são aplicadas as metodologias da classificação geotécnica tradicional ao solo da região no sertão do estado de Alagoas, mais precisamente na cidade de Delmiro Gouveia, com o objetivo de identificar sua aplicação na pavimentação rodoviária, através de resultados de ensaios geotécnicos. O solo analisado foi utilizado em um trecho da obra do anel viário na mesma cidade da coleta do material. O estudo também possibilitou determinar características do material quanto à granulometria, compactação e a resistência do material relacionado ao valor de CBR. Dessa forma, os resultados dos ensaios possibilitaram definir as características do solo como areia bem graduada, com variações apenas na porcentagem de pedregulhos e nas partículas finas de algumas amostras, respectivamente. As amostras também foram classificadas na SUCS de acordo com sua granulometria e apresentou resultados similares como sendo uma areia siltosa, ou seja, mistura de areia com partículas finas. Além disso, apresentou uma ótima resistência para uso na pavimentação, podendo ser utilizado em diversas camadas como também em qualquer tipo de pavimento, sendo ele flexível ou rígido. Por fim, este trabalho permitiu a caracterização geotécnica do solo local com indicações de quais tipos de camadas podem ser aplicados na pavimentação rodoviária. Além disso, é importante citar que esse tipo de material pode ser utilizado em obras na região, considerando a boa qualidade e distância das jazidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Classificações Do Solo, Pavimentação Rodoviária, Ensaio Geotécnicos.

## **ABSTRACT**

In this work the methodologies of the traditional geotechnical classification to the soil of the region in the hinterland of the state of Alagoas, more precisely in the city of Delmiro Gouveia, are applied, with the objective of identifying its application in the road paving, through geotechnical test results. The analyzed soil was used in an excerpt of the work of the ring road in the same city of the material collection. The study also made it possible to determine the characteristics of the material in terms of granulometry, compaction and resistance of the material related to the CBR value. Thus, the results of the tests made it possible to define the soil characteristics as well graded sand, with variations only in the percentage of boulders and in the fine particles of some samples, respectively. The samples were also classified in the SUCS according to their granulometry and presented similar results as a silt sand, that is, mixing sand with fine particles. In addition, it presented an excellent resistance for use in the paving, being able to be used in several layers as well as in any type of pavement, being it flexible or rigid. Finally, this work allowed the geotechnical characterization of the local soil with indications of which types of layers can be applied to the road paving. In addition, it is important to mention that this type of material can be used in works in the region, considering the good quality and distance of the deposits.

**KEYWORDS:** Soil Classifications, Road Paving, Geotechnical Tests.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Sistema de várias camadas.....	18
<b>Figura 2</b> - Cargas aplicadas em um pavimento.....	19
<b>Figura 3</b> - Esquema de seção transversal do pavimento.....	21
<b>Figura 4</b> - Diagrama triangular generalizado para a determinação dos cinco principais grupamentos texturais do solo.....	26
<b>Figura 5</b> - Esquema de um perfil de solo com os principais horizontes e sub-horizontes.....	26
<b>Figura 6</b> - Gráfico da classificação MCT.....	35
<b>Figura 7</b> - Classificação resiliente de solos granulares.....	38
<b>Figura 8</b> - Classificação Resiliente De Solos Finos.....	40
<b>Figura 9</b> - Localização da coleta das amostras.....	45
<b>Figura 10</b> - Peneiras granulométricas.....	46
<b>Figura 11</b> - Aparelhos do ensaio de consistência.....	48
<b>Figura 12</b> - Aparelhagem para Compactação.....	51
<b>Figura 13</b> - Aparelho Prensa para cálculo do ISC.....	52

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1</b> - Decomposição de rochas.....	24
<b>Tabela 2</b> - Classificação do solo quanto a granulometria.....	25
<b>Tabela 3</b> - Classificação dos solos TRB (Transportation Research Board) .....	32
<b>Tabela 4</b> - Terminologia do sistema unificado.....	33
<b>Tabela 5</b> - Sistema unificado de classificação de Solos.....	34
<b>Tabela 6</b> - Classificação dos solos finos (Método indireto) .....	39
<b>Tabela 7</b> - Estaca de Coleta da Amostra.....	53
<b>Tabela 8</b> - Resultado da Análise Granulométrica por Peneiramento.....	53
<b>Tabela 9</b> - Resultado do ensaio de compactação.....	55
<b>Tabela 10</b> - Resultado do Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	56
<b>Tabela 11</b> - Resultados da Classificação TRB.....	58
<b>Tabela 12</b> - Resultados da Classificação SUCS.....	59
<b>Tabela 13</b> – Inter-relações entre a classificação TRB e a unificada.....	59

## LISTA DE MAPA

<b>Mapa 1</b> - Localização da jazida.....	43
--	----

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Curva Granulométrica.....	54
<b>Gráfico 2</b> - Curva de Compactação.....	56
<b>Gráfico 3</b> - Curva Tensão – Penetração.....	57

## **LISTA DE SIGLAS**

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

**ASSHTO** – American Association Of State Highway And Transportation Officials.

**CBR** – Índice de Suporte Califórnia.

**CEPSA** – Companhia Portuguesa Petróleo.

**CPRM** – Cadastro de Fontes de Abastecimento Por Água Subterrânea do Serviço Geológico do Brasil.

**DNER** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

**DNIT** – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

**HRB** – Highway Research Board.

**IP** – Índice de Plasticidade

**ISC** – Índice de Suporte Califórnia.

**LL** – Limite de Liquidez.

**LP** – Limite de Plasticidade.

**MCT** – Miniatura Compactado Tropical.

**MR** – Módulo de Resiliência

**NBR** – Norma Brasileira.

**TRB** – Transportation Research Board.

**SUCS** – Sistema Unificado de Classificação de Solos.

**USP** – Universidade de São Paulo.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1.	Objetivos.....	16
1.1.1.	Geral.....	16
1.1.2.	Específicos.....	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.	Características dos Solos para Aplicação na Pavimentação.....	17
2.2.	Origem e Formação dos solos.....	22
2.1.1.	Tipos de solos.....	23
2.1.2.	Perfil Típicos do solo.....	24
2.3.	A Escolha de Materiais Naturais para a Pavimentação Rodoviária.....	27
2.3.1.	Sistemas de Classificação dos Solos.....	28
2.3.1.1.	Sistema rodoviário de classificação.....	29
2.3.1.2.	Sistema Unificado de Classificação do solo.....	33
2.3.1.3.	O Sistema de Classificação MCT.....	35
2.3.1.4.	O Sistema de Classificação Resiliente.....	36
2.4.	Trabalhos Realizados Com Classificações Geotécnica.....	41
3.	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS EM ESTUDO.....	43
4.	METODOLOGIA.....	45
4.1.	Caracterização Geotécnica.....	45
4.1.1.	Ensaio de Granulometria.....	46
4.1.2.	Ensaio de Limites de Consistência.....	46
4.1.2.1.	Preparação das Amostras.....	47
4.1.2.2.	Limite de Liquidez.....	48
4.1.2.3.	Limite de Plasticidade.....	49
4.1.3.	Ensaio de Compactação.....	49
4.2.	Caracterização para Pavimentação Rodoviária.....	51
4.2.1.	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1.	Análise Granulométrica.....	53
5.2.	Limites de Consistência.....	55
5.3.	Teor de Umidade Ótima e Densidade Máxima.....	55
5.4.	Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	56

5.5. Classificação para Pavimentação Rodoviária (TRB).....	58
5.6. Classificação Geotécnica dos Materiais (SUCS).....	59
5.7. Relação entre Classificações.....	60
5.8. Análise das amostras .....	61
6. CONCLUSÃO.....	62
6.1. Sugestões Para Trabalhos Futuros .....	62
7. REFERÊNCIAS .....	63

## 1. INTRODUÇÃO

Para obras de implantação de estradas, o estudo sobre as características dos materiais utilizados na pavimentação é de extrema importância, uma vez que existe uma grande variação nos tipos e características de solos. Por esse motivo, é necessário analisar suas propriedades em relação a resistência, deformabilidade e permeabilidade, tanto no seu estado natural quanto em seu estado compactado.

Este trabalho consiste em determinar e classificar características geotécnicas do solo da região do sertão de Alagoas, mais precisamente no município de Delmiro Gouveia em diferentes classificações, além de fazer comparações entre as principais classificações existentes, como também apresenta a finalidade do solo em análise para uso nas construções dos pavimentos de estradas.

As propriedades do solo em estudo foram determinadas pelos ensaios geotécnicos de laboratório, baseados nos resultados obtidos foram classificados nas duas classificações geotécnicas mais difundidas, a classificação para fins rodoviários TRB (Transportation Research Board) e o SUSC – (Sistema Unificado de Classificação dos Solos). A análise dos dados de cada amostra obtidos através dos ensaios, possibilita a caracterização do solo, bem como sua indicação do solo para pavimentação. As informações analisadas foram escolhidas de acordo com a amostra que continham todos os ensaios referentes a caracterização geotécnica, as mesmas foram reunidas em planilhas e organizadas de acordo com a coleta do material. Após definição de todos os resultados dos ensaios, foram realizadas as classificações geotécnicas, e consequentemente, as comparações entre si.

Este trabalho é uma primeira análise do solo localizado no alto sertão do estado de Alagoas, no qual pode-se observar uma região com variedade de tipos de solo, em especial a presença abundante de material grosseiro.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Geral**

O objetivo deste trabalho é classificar o solo da região de Delmiro Gouveia no Estado de Alagoas por meio de ensaios geotécnicos, e identificar seu uso na pavimentação através das classificações existentes na literatura.

### **1.1.2. Específicos**

- a) Apresentar os tipos de solos das amostras através da análise granulométrica;
- b) Comparar a análise do solo de acordo com as classificações geotécnicas;
- c) Verificar o uso dos solos em estudos, aplicados na pavimentação rodoviária;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A geologia envolve-se com a engenharia na mesma área de conhecimento para a solução de problemas relacionados a construção de rodovias e ferrovias, implantação de barragens, aberturas de túneis e canais, projetos de fundação, e outras áreas que também necessitam do conhecimento das características do solo. (CHIOSSI, 1979)

O solo tem variadas definições a depender de qual área será empregado, isto é, na engenharia, geologia ou pedologia, as comparações entre as mesmas se tornam diferentes nos termos de conceito tradicional, nas práticas relacionando a classificação e definição do tipo de solo (BALBO, 2007).

Na área da pedologia a importância se resume no fato da presença de matéria orgânica na superfície do solo o que é de interesse para agricultura. No entanto, para a geologia o solo não é apenas superficialmente, mas também as camadas que sofreram com a ação do intemperismo. Na engenharia civil, o solo é compreendido com maior abrangência sendo considerado qualquer depósito de material que seja solto ou fofo, decorrente do intemperismo, degradação da rocha e até mesmo a decomposição da matéria orgânica (BALBO, 2007).

### 2.1. Características dos Solos para Aplicação na Pavimentação

Pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a Norma Brasileira NBR 7.207 (1982) define o pavimento como a estrutura construída após o processo de terraplenagem e seu conjunto tem como funções econômicas e simultâneas de:

- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006, p. 95) o pavimento pode ser definido como:

“O pavimento, por injunções de ordem técnico-econômicas é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocadas em contato resultando daí um elevado grau de complexidade no que respeita ao cálculo de tensões e deformações e atuantes nas mesmas resultantes das cargas impostas pelo tráfego”.

De acordo com Bernucci *et al* (2008), a estrutura do pavimento é construída sobre a superfície de terraplenagem, composta por múltiplas camadas finitas, com função técnica e

econômica de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, além de garantir aos usuários melhoria nas condições de rolamento com conforto, economia e segurança.

Conforme Balbo (2007) o princípio da função do pavimento é de suportar todos os esforços causados pelas cargas proveniente do tráfego e das ações climáticas, desde que não manifeste nenhum tipo de danificação precoce.

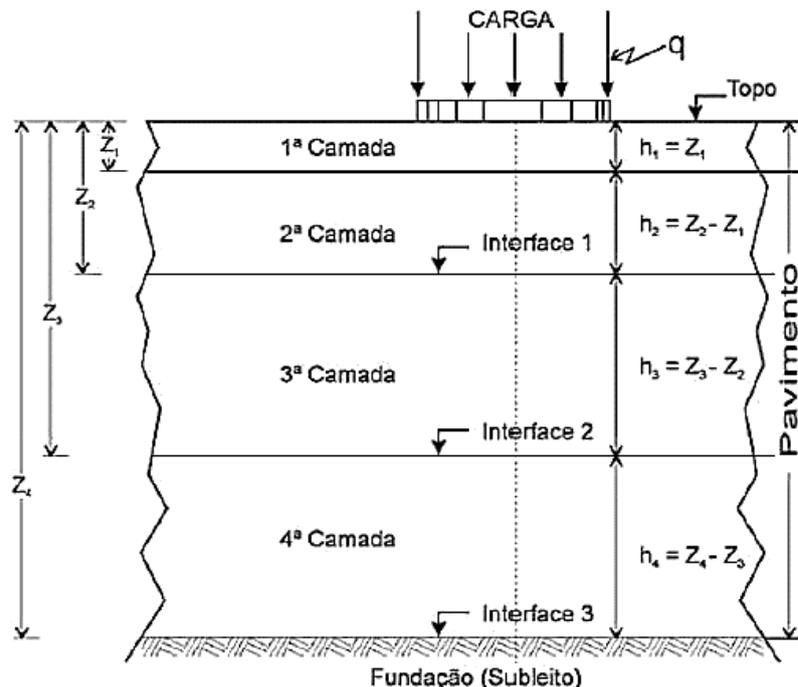
Ainda de acordo com Balbo (2007) a meta da pavimentação se deve em:

“Propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, a um mínimo custo, ou seja, buscando, sempre que possível, o aproveitamento de matérias locais para as obras, garantindo um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos de serviço desta infraestrutura social”.

Segundo Santana (1993) e Souza (1980), citado por Muller (2005), o pavimento deve ser considerado uma estrutura construída sobre a superfície do solo, após os serviços de terraplenagem com uma função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, obtido através da utilização de materiais com diferentes características no que diz respeito a resistência e deformabilidade.

A estrutura do pavimento é apresentada na Figura 1 como sendo um sistema com camadas finitas, ou seja, com alturas pré-determinadas que são assentadas sobre um semi-espaço infinito e desempenha a função de fundação da estrutura, conhecida como subleito (SENÇO, 2007).

Figura 1 – Sistema de várias camadas



Fonte: Senço, 2007

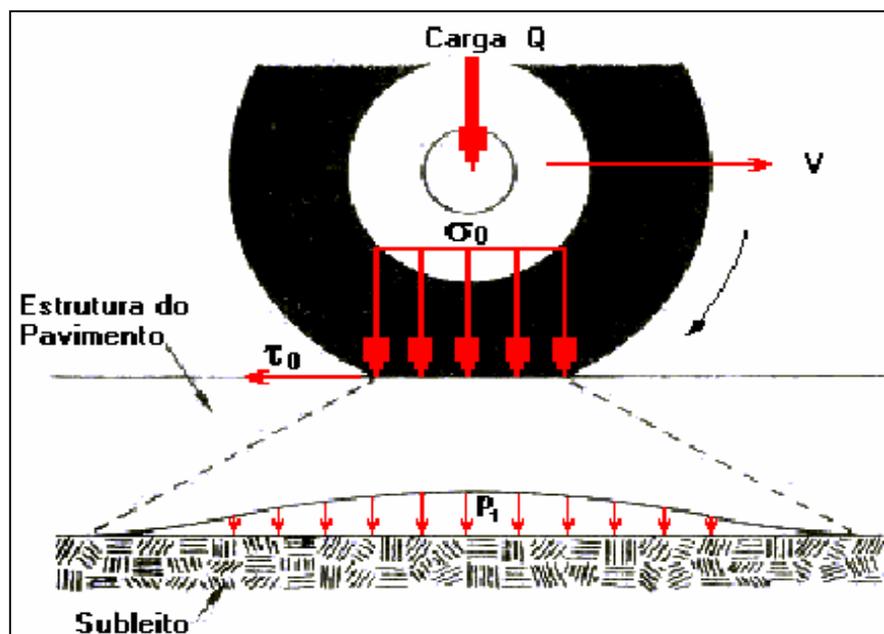
Senço (2007) comenta, também, que o dimensionamento do pavimento pode ser realizado considerando que a carga aplicada gere uma pressão de contato uniformemente distribuída. Além disso, consideram, ainda, que as pressões que atuam na interface entre as camadas e o subleito estejam de acordo com a capacidade de suporte dos mesmos.

O sistema de camadas do pavimento que está sujeita às cargas dos veículos é estudado pela área da engenharia civil conhecida com a mecânica dos pavimentos, no qual se determina as tensões, deformações e deslocamentos através dos parâmetros de deformabilidade (MEDINA e MOTA, 2005).

A distribuição das pressões no pavimento ocorre de acordo com a profundidade, sendo que as camadas superiores estão sujeitas a sofrer as maiores cargas, e desta forma exigem um material com qualidade superior às demais (SENÇO, 2007).

De acordo com Santana (1993), citado por Muller (2005) no momento que um pavimento é solicitado por uma carga de veículo  $Q$ , que se desloca sobre o revestimento com uma velocidade  $V$ , o mesmo fica sujeito a uma tensão normal na direção vertical  $\sigma_0$  (de compressão) e uma tensão cisalhante na direção horizontal  $\tau_0$  (de cisalhamento), como mostra a Figura 2. A estrutura de um pavimento é composta por variadas camadas que têm a função de dissipar a tensão vertical aplicada na superfície, possibilitando que o subleito receba uma parcela muito inferior desta tensão. A tensão horizontal aplicada na superfície exige que o revestimento possua uma coesão mínima para suportar a parcela do esforço de cisalhamento.

Figura 2 - Cargas aplicadas em um pavimento



Fonte: Muller, (2005) *apud* Santana, (1993)

Para Medina e Mota (2005) a análise de um pavimento levando em consideração o sistema de camadas a fim de determinar as tensões e deformações do mesmo, deixa de existir o sentido de analisar as camadas separadamente com funções específicas e distintas. Outro fato a observar é que os esforços oriundos das cargas dos pneus aplicados no pavimento são absorvidos em espessuras de poucos centímetros, ou seja, as camadas de concreto asfáltico seriam as responsáveis pela absorção dos esforços de tração, como também de repassar esses esforços às camadas do subleito.

A classificação tradicional do pavimento pode ocorrer de uma forma geral como flexível, semi-rígido e rígido (DNIT, 2006).

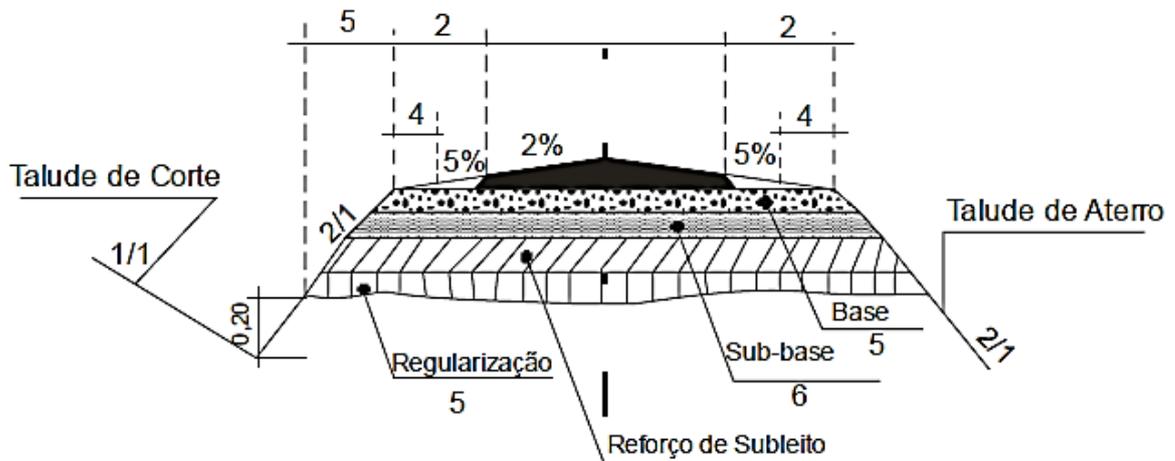
- **Flexível:** aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui por camadas superpostas em parcelas aproximadamente equivalentes entre as mesmas, sendo que as primeiras terão o solo com mais resistência e assim respectivamente.
- **Rígido:** distingue-se dos demais por possuir uma camada de revestimento com elevada rigidez em relação às inferiores, ou seja, ela suporta grande parte das tensões resultantes do carregamento aplicado e pouco deforma-se.
- **Semi-Rígido:** caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, ou seja, uma situação intermediária entre os outros dois tipos.

As camadas que compõem a seção transversal típica de um pavimento possuem nomenclaturas e definições específicas por norma, consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos inúmeros métodos de dimensionamento (SENÇO, 2007).

De acordo com Bernucci *et al* (2008) o subleito é a fundação da estrutura de camadas do pavimento. O desempenho estrutural está vinculado a espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) e as normas que determinam as especificações do serviço, as camadas do pavimento representado na Figura 3 são definidas como:

Figura 3 - Esquema de seção transversal do pavimento



Fonte: DNIT, 2006

**Subleito** - é o terreno de fundação do pavimento, o material que o compõe deve possuir um valor de CBR  $>2\%$ , caso contrário o mesmo deverá ser substituído.

**Leito** - é a superfície obtida pela terraplenagem ou obra de arte e conformada ao seu greide e perfis transversais;

**Greide do leito** - é o perfil do eixo longitudinal do leito;

**Regularização** - é a camada posta sobre o leito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações; não se trata de uma camada do pavimento, mais sim uma operação utilizada para nivelamento do terreno, no qual pode ser reduzida em corte do leito implantado ou em sobreposição a este, de camada com espessura variável;

**Reforço do subleito** - é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da de regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito, podendo ser utilizado para aprimorar as qualidades do subleito e regularizar a espessura da sub-base, além disso o material utilizado nessa camada deverá possuir um valor de CBR  $>2\%$  e uma expansão inferior ou igual a  $1\%$ .

**Sub-base** - é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre regularização ou reforço do subleito, o material de solo para ser utilizado nessa camada deverá possuir algumas características como o valor de CBR  $>20\%$  e uma expansão  $\leq 1\%$ , além do índice de grupo ser igual a zero.

**Base** - é a camada destinada a resistir os esforços oriundos do tráfego, distribuir as camadas subjacentes e sobre a qual se constrói o revestimento, essa é a camada que possui o solo de melhor qualidade, o mesmo deve possuir um valor de CBR  $\geq 60\%$  com uma expansão  $\leq 0,5\%$ .

**Revestimento** - é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança, além de resistir aos esforços atuantes fazendo com que a superfície seja mais durável e resistente ao desgaste.

O valor de CBR representa a relação entre a pressão necessária para a penetração de um pistão em um corpo de prova de solo e a penetração em um corpo de prova com brita padronizada, ou seja, ele expressa uma porcentagem a resistência do solo para determinar seu uso na pavimentação (DNIT, 2006)

Segundo Braja (2007) a análise do solo para ser empregado na pavimentação precisa também determinar qual o valor do índice de grupo (IG). Esse valor é determinado pela equação (2.1) apresentada a seguir. Ainda de acordo com Senço (2007) esse índice só caracteriza as características dos solos com fração fina, por causa dos valores de limites de consistência.

$$IG = (F_{200} - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01(F_{200} - 15) (IP - 10) \quad (2.1)$$

Sendo que:

$F_{200}$  = Porcentagem que passa na peneira N° 200

LL = Limite de liquidez

IP = Índice de Plasticidade

De acordo com Balbo (2007) é de fundamental importância o estudo de solo para a pavimentação, seja no ponto de vista de análise de materiais ou como análise de projeto. No entanto, no Brasil esse estudo para finalidades rodoviárias demanda um conhecimento além do comportamento da mecânica dos solos tradicional, devido a existência dos solos nas regiões com clima tropical úmido terem comportamentos diferentes. Essa área de estudos foi fundada nos trabalhos do professor Job Shuji Nogami, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## 2.2. Origem e Formação dos Solos

De acordo com Bueno e Vilar (1998) a palavra solo tem diferentes significados para cada ciência. No entanto, segundo Villibor (1995) o solo para Engenharia Civil é um:

“Material não consolidado, isto é, constituído de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos relativamente suaves, como dispersão em água com o uso de aparelho dispersor de laboratório, e que podem ser escavados com equipamentos”.

Em termos gerais, a definição de solo segundo a ABNT NBR 6.502 (1995) ocorre através da ação dos agentes físicos e químicos na decomposição das rochas, independente se há ou não presença de material orgânico.

Esse processo que dá origem ao solo por meio da desagregação e decomposição das rochas é denominado como intemperismo, ele ocorre através de mecanismos modificadores das propriedades físicas dos minerais e rochas, além de suas características químicas (TEIXEIRA, 2000).

A formação do solo através do intemperismo ocorre com a expansão e contração das rochas devido as repetidas variações de temperatura (CHIOSSI, 1979). Esse processo causa a destruição das rochas e sua consequente desagregação.

De acordo com Grotzinger e Jordan (2013), os fatores que modificam o intemperismo são a rocha matriz, o clima, a presença ou a ausência de solo, o tempo de exposição das rochas à atmosfera. Para esses autores o intemperismo físico acontece quando a rocha sólida sofre algum tipo de fragmentação que não varia na sua composição química, ou seja, por meio do processo mecânico. Dessa forma, o processo físico ocorre sem alterar as características minerais da rocha, ao contrário do intemperismo químico que acontece quando os minerais da rocha são alterados.

Segundo Teixeira (2000), o principal agente do intemperismo químico é a água da chuva. Quanto maior for sua disponibilidade e frequência de renovação, mais completas serão as reações químicas.

As ações do intemperismo são muito mais atuantes em climas quentes do que em climas frios, esse processo leva a formação dos solos que, em consequência, são misturas de partículas pequenas que se diferenciam pelo tamanho e sua composição química (PINTO, 2006).

Para Teixeira (2000), o solo encontrado na superfície da terra pode apresentar características e propriedades físicas, químicas e físico-química variadas a depender das condições ambientais e nos fatores que influenciam na sua formação, e desta forma podem ter variações de texturas e cor, podem ser ricos ou pobres em matéria orgânica, podem ser espessos ou rasos, e ainda homogêneos ou nitidamente separados por horizontes.

Segundo Lepsch (2010), o solo começa a se formar a partir do conjunto de ações físicas, químicas e biológicas, porém essas ações não são uniformes ao longo de uma rocha em transformação, sendo com mais intensidade na parte superior. E por esse motivo o solo da superfície da terra varia muito em relação a sua espessura, pois os fatores que influenciam as transformações sofridas pelas rochas durante o processo de formação do solo ocorrem com

maior veemência na parte superficial a mais profunda, em função disso o solo resulta em camadas empobrecidas que sobrepõem sobre as outras.

### 2.2.1. Tipos de Solos

Os solos podem ser classificados pela sua origem em dois grupos: o residual e transportado. Os solos residuais são aqueles que sofrem o processo de decomposição das rochas e permanecem no seu local de origem, ou seja, o transporte do solo ocorre com uma menor velocidade que a decomposição da rocha (PINTO, 2006).

O solo residual pode ser formado a partir de todos os tipos de rocha, porém o tipo e a composição do solo vão depender da rocha a qual deu origem (CHIOSSI, 1979). A Tabela 1 apresenta exemplos dos tipos de solos formados a partir da decomposição das rochas.

Tabela 1 – Decomposição de rochas

<b>Tipo de rocha</b>	<b>Composição mineral</b>	<b>Tipo de solo</b>	<b>Composição</b>
Basalto	Plagioclásio Piroxênios	argiloso (pouca areia)	argila
Quartzito	Quartzo	arenoso	quartzo
Filitos	Micas (sericita)	argiloso	argila
Granito	quartzo feldspato mica	areno-argiloso (micáceo)	quartzo e argila (micáceo)
Calcário	Calcita		argila

Fonte: Chioffi, 1979

Os solos transportados são aqueles que sofrem com agentes transportadores, portanto são formados em um local diferente da sua origem. Geralmente, esses solos são menos estáveis, mais fofos e com uma profundidade variável (CHIOSSI, 1979).

### 2.2.2. Perfis Típicos do Solo

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2006), o perfil do solo é a unidade básica de estudo para sua classificação, no qual será avaliado em duas dimensões e perfazendo um volume mínimo que possibilite estudar a variabilidade dos atributos, propriedades e características dos horizontes ou camadas do solo

Para Pinto (2006) o tamanho das partículas do solo é a principal característica que os diferencia. Para a definição de partículas do solo a ABNT adota os valores e denominações específicas apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do solo quanto a granulometria

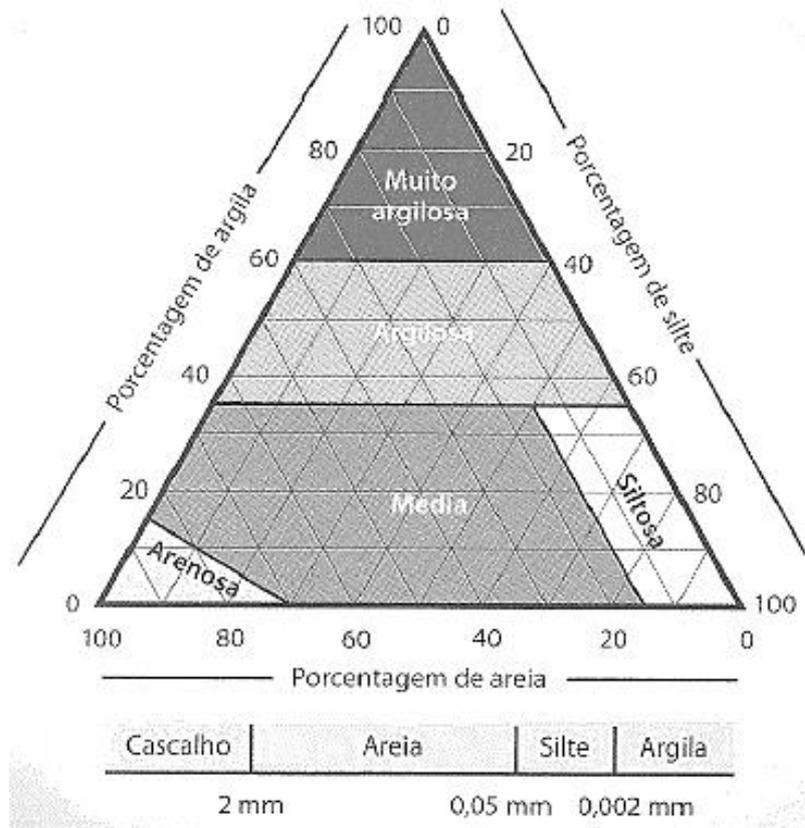
<b>Fração</b>	<b>Limites definidos pela ABNT</b>
Matação	200mm e 1m
Pedra-de-mão	60mm a 200mm
Pedregulho	2,0mm a 60mm
Areia	0,06mm a 2mm
Silte	0,002mm a 0,06mm
Argila	Inferior a 0,002mm

Fonte: ABNT (Rochas e Solos - NBR 6502,1995).

Para Chiossi (1979), é muito raro encontrar na natureza um solo totalmente puro, ou seja, que sua composição tenha apenas uma granulometria, o mais comum é encontrar um solo que apresente uma certa porcentagem de argila, silte, areia e cascalho.

De acordo com Lepsch (2010), para estudo das partículas de solo as mesmas são classificadas em frações. No Brasil, os limites mais utilizados estão apresentados no diagrama triangular da Figura 4, que mostra a porcentagem presente para os solos do tipo areia, silte e argila. Analisando a linha do diagrama correspondente à porcentagem do solo e cruzando até os outros lados, pode-se observar a quantidade referente aos outros tipos. O autor comenta que existem outras classificações texturais para o solo, como exemplo a de Atterberg, a qual define o silte com tamanho de partículas diferentes e ainda separa as areias em fina e grossa.

Figura 4 – Diagrama triangular generalizado para a determinação dos cinco principais grupamentos texturais do solo.



Fonte: Lepsch, 2010

Segundo Pinto (2006), a constituição mineralógica das partículas de solo que sofreram com o processo de desagregação das rochas no seu processo de formação depende da composição da rocha matriz. O autor afirma que as maiores partículas são constituídas de minerais distintos, porém o mais comum ainda é que a partícula seja constituída de um único mineral.

De acordo com Pinto (2006), o mineral responsável pela formação das partículas de silte e areia é o quartzo, por ser o mais presente na rocha, e também resistente à sua desagregação. Já o feldspato são os minerais mais atacado pela natureza e dão origem aos argilominerais, que constituem a fração mais fina do solo.

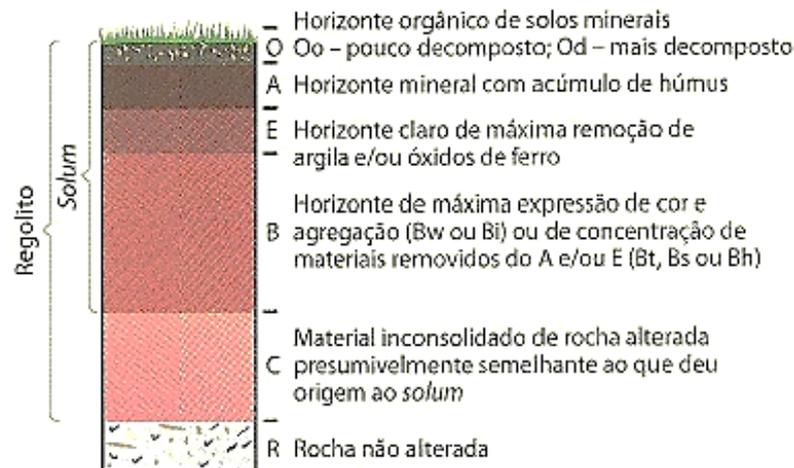
O comportamento do solo está diretamente influenciado ao perfil de solo que é definido pelo conjunto de todos os horizontes genéticos e/ou camadas, acrescidos do material mineral subjacente pouco ou nada e do manto superficial de resíduos orgânicos (LEMOS & SANTOS, 1996).

Para Lepsch (2010), horizontes são as camadas mais ou menos paralelas à superfície do solo que tem aspecto e constituição diferentes, podendo ser observadas através de um corte

transversal de um maciço de solo que mostra a sequência de camadas que formam o perfil do solo. De acordo com Zimbarck (2003), a formação dos horizontes de um perfil do solo está associada à intensidade como ocorre os processos de adição, perdas, transformações e translocações, processos esses referentes aos materiais que começa a se decompor.

De acordo com Lepsch (2010), o estudo da aparência do solo no meio ambiente natural é definido como morfologia, levando em consideração a descrição segundo as características que sejam mais perceptíveis, visíveis a olho nu ou sensíveis ao tato. Ainda, segundo o autor, as características morfológicas constituem a base fundamental para identificar o solo, tanto da sua parte interna como externa, dentre os quais são a cor, textura, estrutura, consistência, espessura e transição dos horizontes, além disso afirma que um perfil de solo completo possui cinco diferentes tipos de horizontes principais, apresentados na Figura 5, reconhecidos através das letras maiúscula O, A, E, B e C.

Figura 5 – Esquema de um perfil de solo com os principais horizontes e sub-horizontes



Fonte: Lepsch, 2010

De acordo com Teixeira (2010) a formação do perfil do solo dá-se por meio de horizontes com tonalidades diferentes, sendo que as mais escuras se refere a maior presença de matéria orgânica e tem maior presença na superfície do solo, os horizontes mais profundos possuem tonalidade mais clara devido a maior concentração de argilominerais e oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio.

### 2.3. A Escolha de Materiais Naturais para a Pavimentação Rodoviária

Na construção de um pavimento é necessário o conhecimento acerca dos materiais constituintes das camadas desse pavimento, como também dos materiais constituintes do

subleito e dos materiais que possam interferir na construção dos drenos, acostamentos, cortes e aterros (SENÇO, 2007).

De acordo com o Manual de Pavimentação da Companhia Portuguesa de Petróleo (CEPSA), os materiais que são aplicados na execução do processo de terraplenagem têm variação conforme as exigências e tipo, observando o local onde será aplicado. Um mesmo solo pode ser utilizado em várias camadas da fundação do pavimento, dependendo da qualidade apresentada e um eventual tipo de tratamento.

Para serem utilizados na pavimentação os materiais devem passar por métodos de seleção e de caracterização de propriedades, ou seja, devem ser verificados a disponibilização do material analisando quanto a sua natureza para que não haja interferência de propriedades geotécnicas do solo no estado de compactação. No pavimento, dentre os materiais utilizados, estes são basicamente compostos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros (BERNUCCI et al, 2008).

Bernucci *et al* (2008) afirma que os materiais utilizados na execução de camadas de base, sub-base e reforço do subleito podem ser classificados relacionando o comportamento frente ao esforço: materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e materiais asfálticos.

Os autores comentam que dentre os materiais classificados pode-se, ainda, apresentar os mais empregados na pavimentação de acordo com cada classe, sendo:

**Granulares e solos:** brita graduada simples e bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente; solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal.

**Cimentados:** brita graduada tratada com cimento; solo-cimento; solo-cal; solo-cal-cimento; concreto rolado.

**Misturas asfálticas:** solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado.

A melhor classificação para o solo consiste em relacionar o seu potencial quanto à uma dada aplicação em camada de pavimento, ou seja, não é apenas as propriedades físicas que interferem, mais sim o comportamento observado quando empregado no pavimento (BALBO, 2007).

### **2.3.1. Sistemas de Classificação dos Solos**

A classificação do solo pode ser feita por diferentes critérios, porém Teixeira (2010) afirma que essa não é uma tarefa fácil. Isso se deve ao fato de que o solo forma um meio contínuo ao longo do relevo, sendo que a mudança de um solo para outro acontece de forma gradual, ou seja, não ocorre de forma brusca, e por esse motivo não é possível definir o local exato da mudança de solo.

O solo é bastante utilizado na área da Engenharia, seja como suporte ou como material de construção. A sua classificação é importante e essencial, porém a diferença de comportamento dos variados tipos de solos existentes dificulta o conhecimento a seu respeito. Pinto (2006) comenta que os sistemas de classificação do solo surgiram a partir da diferença de comportamento dos diversos solos perante as solicitações de interesse da Engenharia, e com o objetivo de poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.

Apesar das divergências sobre os sistemas de classificação do solo, eles são indispensáveis para todas as áreas que utilizam como objeto de estudo, isso se deve pela necessidade de uma referência para se apresentar os resultados baseado em algum tipo de solo. Segundo Terzaghi, conforme citado por Pinto (2006) a classificação de um solo deve ter limites bem definidos, para que todos tenham um entendimento análogo, sem essa definição de limite a classificação seria totalmente inútil.

Na engenharia os sistemas de classificações mais utilizados são Highway Research Board (HRB), oriundos da American Association Of State Highway And Transportation Officials (ASSHTO) e o sistema unificado. Ambos os sistemas se baseiam nas características granulométricas do solo e os limites de Atterberg, sendo que o primeiro deles é mais empregado para finalidades rodoviárias, enquanto o segundo é o mais utilizado na área geotécnica (BRAJA, 2007).

#### **2.3.1.1. Sistema rodoviário de classificação**

Um dos sistemas de classificação do solo mais empregado no seu reconhecimento para construção de pavimentos rodoviário é o do Highway Research Board (HRB). Esse sistema de classificação foi lançado em 1945, e é resultante de alterações da classificação do antigo sistema da Public Roads Administration apresentado em 1929. O sistema de classificação HRB leva em consideração a granulometria, o limite de liquidez, limite de plasticidade e o índice de grupo,

entretanto o dimensionamento de pavimentos está diretamente ligado ao índice de grupo (DNIT, 2006).

O índice de grupo é um elemento que auxilia na definição da capacidade de suporte do terreno de fundação do pavimento. É um número inteiro com variação entre 0 e 20 e seus extremos representam solos ótimos ou ruins respectivamente, ou seja, a determinação dos melhores tipos de solos para utilização em pavimentos. O cálculo leva em consideração os valores dos índices LL e IP, além da porcentagem do material que passa na peneira N° 200 (SANTOS, 2006).

Nesse sistema de classificação o solo é agrupado de acordo com a porcentagem de material que passa na peneira n° 200, os que tem no máximo 35% retido na peneira são considerados solos grossos, trata-se dos solos dos grupos A-1, A-2 e A-3. Os solos finos apresentam mais de 35% de material retido na peneira e são denominados A-4, A-5, A-6 e A-7 (PINTO, 2006).

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), as características dos solos de cada um dos grupos e subgrupos apresentados na Tabela 3 em relação a este sistema de classificação, são listados logo abaixo.

**Grupo A-1** - O solo característico deste grupo é formado de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico.

**Subgrupo A-1-a** – Encontra-se os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.

**Subgrupo A-1-b** – Estão incluídos os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.

**Grupo A-2** - Este grupo inclui uma grande variedade de materiais. Está incluído todos os solos com 35% ou menos passando na peneira n° 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contêm, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os outros grupos.

**Subgrupos A-2-4 e A-2-5** – Neste subgrupo está incluso os solos que contém 35% ou menos, passando na peneira n° 200, com uma porção menor retida na peneira n° 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.

**Subgrupos A-2-6 e A-2-7** – O material característico desse subgrupo é semelhante aos descritos anteriormente, exceção feita da porção de finos que contem argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10 e percentagem passando na peneira nº 200, maiores que 15, estão refletidos nos valores dos índices do grupo de 0 a 4.

**Grupo A-3** – O tipo de solo presente nesse grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositados pelas correntes.

**Grupo A-4** – O material característico desse grupo é o siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira nº 200. Inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8.

**Grupo A-5** – O material desse grupo é semelhante ao que foi descrito no grupo anterior, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez e das percentagens decrescentes de material grosso.

**Grupo A-6** – O tipo de solo presente nesse grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira nº 200. O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 16.

**Grupo A-7** - O solo característico deste grupo é semelhante ao descrito no grupo anterior, porém possui as características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume. O aumento dos valores de índices de grupo que vão de 1 a 20 nesse grupo, é em função do crescimento dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos.

**Subgrupo A-7-5** – Nesse subgrupo estão presentes os materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.

**Subgrupo A-7-6** – o solo típico desse subgrupo possui elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

Tabela 3 - Classificação dos solos TRB (Transportation Research Board)

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	
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	50 máx.										
N° 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
N° 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 N° 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

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

Fonte: DNIT, 2006

### 2.3.1.2. Sistema Unificado de Classificação do solo

O Sistema de Classificação Unificado foi proposto por Casagrande para aplicação em obras de aeroportos, porém sua utilização na engenharia ocorreu de forma generalizada, sendo muito utilizado atualmente pelos engenheiros geotécnicos (PINTO, 2006).

De acordo com o DNIT (2006) a identificação do sistema unificado é baseada nas suas qualidades de textura e plasticidade, além de serem agrupados de acordo com o comportamento quando são usados em obras como estradas, aeroportos, aterros e fundações.

As características do solo de acordo com esse Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) são determinadas a partir da granulometria e os limites de Atterberg (LL e LP), além da presença de matéria orgânica. Nesse sistema, todos os solos são representados pelo conjunto de duas letras, como apresentado na Tabela 4. A primeira letra indica o tipo de solo segundo sua classificação granulométrica, e a segunda corresponde aos dados de plasticidade, sendo que essas informações do solo são reunidas em quinze grupos distintos (SANTOS, 2006).

Tabela 4 - Terminologia do sistema unificado

<b>G</b>	Pedregulho
<b>S</b>	Areia
<b>M</b>	Silte
<b>C</b>	Argila
<b>O</b>	Solo orgânico
<b>W</b>	Bem graduado
<b>P</b>	Mal graduado
<b>H</b>	Alta compressibilidade
<b>L</b>	Baixa compressibilidade
<b>Pt</b>	Turfas

Fonte: Pintos, 2006

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a Tabela 5 do sistema SUCS apresenta a classificação do solo levando em consideração a porcentagem que passa na peneira nº200, em vista disso o solo possui três divisões principais: solos de granulação grossa (fica retido mais de 50% do seu peso na peneira nº 200), solos de granulação fina (fica retido menos de 50% do seu peso na peneira nº 200) e solos altamente orgânicos (DNIT, 2006).

Tabela 5 - Sistema unificado de classificação de solos.

<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA:</b>  mais de 50% retido na peneira n° 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira n° 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped. com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. areia e argila
	Areias: 50% ou mais de fração graúda passando na peneira n° 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas – Misturas de areias e silte.
			SC	Areias argilosas – Misturas de areia e argila.
<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA:</b>  50% ou mais passando na peneira n° 200	SILTES E ARGILAS com $LL \leq 50$		ML	Siltes inorgânicos – Areias muito finas – Areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade – Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
			OL	Siltes orgânicos – Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.
	SILTES E ARGILAS com $LL > 50$		MH	Siltes – Areias finas ou siltes micáceos – Siltes elásticos.
			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.
			OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros altamente orgânicos.

Fonte: DNIT, 2006

### 2.3.1.3. O Sistema de Classificação MCT

A criação dessa nova sistemática de classificação do solo se deve principalmente pelo fato da deficiência e delimitação das outras classificações tradicionais para o comportamento dos solos tropicais, visto que essas consideram fundamentais a granulometria, o limite de liquidez (LL) e o índice de plasticidade (IP). Já a metodologia MCT não se utiliza desses métodos tradicionais para classificação do solo, por considerar que esses índices são incapazes e insuficiente para distinguir os principais tipos de solos tropicais, como também retratam de maneira inapropriada sua utilização em pavimentos (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

Esse modelo de classificação do solo foi apresentado na Tese de Doutorado “Pavimentos econômicos: Novas considerações”, defendida por Villibor em 1981. O autor apresentou o desenvolvimento de um novo estudo geotécnico dos solos finos, que ajuda no esclarecimento desse tipo de solo para aplicações em rodovias (VILLIBOR E NOGAMI, 2009).

De acordo como Nogami e Villibor (2009), o sistema de classificação do solo MCT tem como finalidade a melhor caracterização dos solos tropicais e baseada em propriedades mecânicas e hídricas obtidas de corpos de prova compactados de dimensões reduzidas.

A metodologia de classificação do solo MCT apresenta duas classes distintas de solo tropicais, os de comportamento laterítico (L) e os de comportamento não laterítico (N), subdividido em três e quatro grupos, respectivamente. A classificação desses solos de acordo com essa metodologia é apresentada no gráfico da Figura 6, em que os comportamentos do solo são separados pela linha tracejada. (VILLIBOR E NOGAMI, 1995).

Os solos lateríticos e saprolíticos, segundo a classificação MCT, podem pertencer aos seguintes grupos (VILLIBOR et al., 2009).

√ Solos de comportamento laterítico, designados pela letra “L”, subdivididos em 3 grupos:

LA: areia laterítica quartzosa

LA': solo arenoso laterítico

LG': solo argiloso laterítico

√ Solos de comportamento não laterítico (saprolíticos), designados pela letra “N”, subdivididos em 4 grupos:

NA: areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico

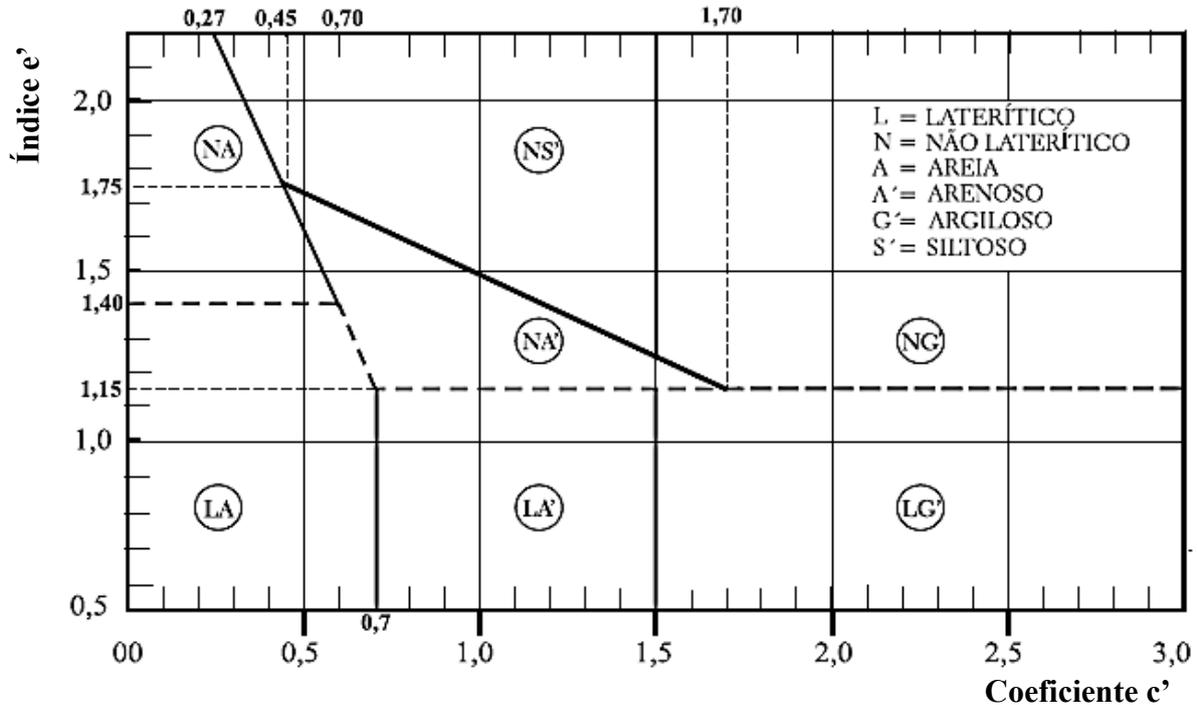
NA': misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solos arenosos)

NS': solo siltoso não laterítico

NG': solo argiloso não laterítico

O gráfico da classificação MCT apresentado na Figura 6, relaciona o coeficiente  $c'$  que indica a argilosidade do solo, representado no eixo das abscissas, e o coeficiente  $e'$  que reflete o caráter laterítico do solo e corresponde ao eixo das ordenadas (SANTOS, 2006).

Figura 6 - Gráfico da classificação MCT



#### 2.3.1.4. O Sistema de Classificação Resiliente

Os estudos da resiliência de materiais aplicáveis em pavimentos, teve início após a década de 70, sendo então possível classificar os materiais levando em consideração comportamento mecânico em termos de deformabilidade elástica, isso devido as malhas rodoviárias da época apresentarem uma degradação precoce (DNIT, 2006).

De acordo com Medina (2005) na década de 50 Hveem entendia que as deformações resilientes nas camadas inferiores eram as responsáveis por causar trincamento no revestimento dos pavimentos asfálticos. Hveem ainda propôs o termo resiliência para representar as deformações do solo ao invés de elásticas com a justificativa que são muito maiores que as dos sólidos usados nas obras civis.

Um pavimento pode ser analisado de acordo com sua deformabilidade, por meio da relação tensão-deformação ou os módulos de resiliência dos materiais de solo das camadas que compõe o mesmo (NETO, 2004).

Segundo Senço (2007, p. 185) a definição do módulo resiliente ( $M_R$ ) do solo decorre da relação entre a tensão-desvio ( $\sigma_d$ ) aplicada sobre a amostra de solo de forma repetida e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente ( $\epsilon_r$ ), observada no procedimento do ensaio”, determinado pela expressão 2.2:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.2)$$

Os valores do módulo de resiliência ( $M_R$ ) são determinados pelo ensaio triaxial de cargas repetidas para várias tensões aplicadas. Isto é, aplica-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Os procedimentos para definição dos valores de  $M_R$  no Brasil são preconizados pela norma DNIT 134/2010 (DNIT, 2006).

Existem inúmeros fatores que afetam o comportamento resiliente dos solos, sendo que esses podem ser classificados em três categorias, sendo: a) condição de carregamento e estado de tensão; b) natureza do solo: origem, composição, textura, estrutura; c) estado físico do solo, expresso pelo teor de umidade e massa específica seca (NETO, 2004).

O comportamento resiliente é variável de acordo com o tipo de solo. Segundo Medina (2005) o módulo resiliente para solos granulares é influenciado principalmente pela tensão de confinamento  $\sigma_3$ , sendo definida pela equação 2.3.

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \quad (2.3)$$

Sendo que:

$M_R$  = módulo de resiliência;

$\sigma_3$  = tensão de confinamento;

$K_1$  e  $K_2$  = constantes experimentais.

Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) a classificação do solo para uso na pavimentação quanto a resiliência do material granular, ou seja, que apresentam menos de 35% em peso de material passando na peneira nº 200 (0,075 mm), é definida pelo modelo da equação 2 e representado pela Figura 7, que apresenta os grupos de solos A, B e C.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) classifica os grupos como:

Os solos do **Grupo A** possuem o valor de resiliência elevado, em vista disso não deve ser utilizado na estrutura do pavimento, além de constituir subleitos de péssima qualidade.

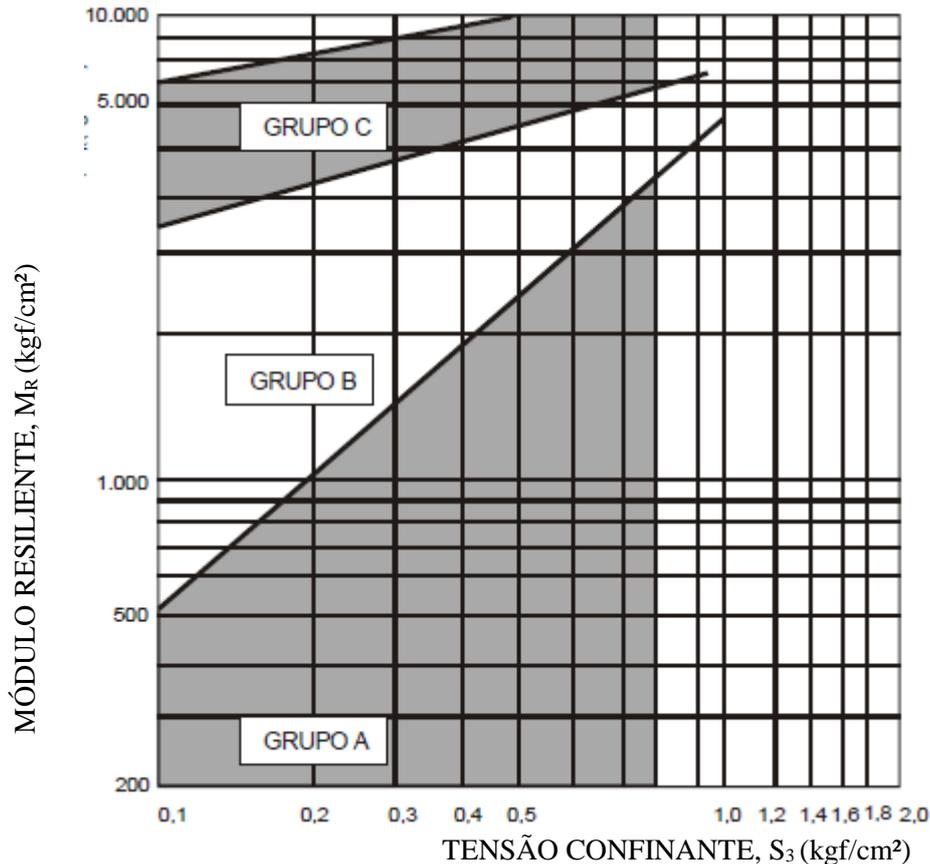
O solo pertencente ao **Grupo B** apresenta um valor intermediário de resiliência, por esse motivo pode ser empregado em estrutura de pavimentos como base, sub-base e reforço do subleito, no entanto seu comportamento *fica* dependente das seguintes condições:

$K_2 \leq 0,50$ ; bom comportamento;

$K_2 > 0,50$ ; comportamento dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito.

O **Grupo C** possui um material de solo com baixo grau de resiliência, portanto podem ser usados em todas as camadas do pavimento, resultando em estruturas com baixas deflexões.

Figura 7 - Classificação resiliente de solos granulares



Fonte: DNIT, 2006

De acordo com Bernucci et al. (2008), os solos coesivos possuem o módulo resiliente que depende principalmente da tensão-desvio aplicada, isto é, os solos utilizados nas camadas inferiores que sofrem um menor valor de carga aplicada possuem maior valor resiliente em relação ao usado nas primeiras camadas do pavimento. Além disso, para solos granulares o módulo resiliente aumenta de acordo com a tensão de confinamento que o solo sofrerá, ou seja, quanto menos confinamento maior deformação, e conseqüentemente, menor resiliência.

Os valores do módulo resiliente para solos coesivos são definidos pelas equações 2.4 e 2.5, representadas a seguir (DNIT, 2006).

$$MR = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d) \text{ para } \sigma_d < K_1 \quad (2.4)$$

$$MR = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1) \text{ para } \sigma_d > K_1 \quad (2.5)$$

Em que:

MR = módulo de deformação resiliente

$(\sigma_1 - \sigma_3)$  = tensão-desvio aplicada repetidamente

K1, K2, K3, K4 = constantes determinadas experimentalmente

A classificação resiliente considera que os solos finos são aqueles que apresentam mais de 35% em peso de material passando na peneira nº 200 (0,075mm), os mesmos podem ser classificados para fins na pavimentação baseados nos valores do módulo de resiliência que determina em qual grupo de solo ele se enquadra, apresentados na Figura 8 podem ser do Tipo I, Tipo II e Tipo III (DNIT, 2006).

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) classifica os grupos dos solos finos como:

O Solo classificado do **Tipo I** pode ser usado como subleito e reforço do subleito devido ao seu bom comportamento quanto à resiliência, podendo ser utilizado também como camada de sub-base.

O Solo pertencente ao grupo do **Tipo II** possui um comportamento regular quanto à resiliência como subleito e reforço do subleito.

O Solo do **Tipo III** apresenta um péssimo comportamento quanto à resiliência, por esse motivo o mesmo não deve ser empregado em camadas do pavimento, no entanto para o subleito são necessários cuidados e estudos especiais.

Quando não se há possibilidade de definir os valores de MR por meio do método tradicional para os solos finos, é possível estimar uma classificação indiretamente, com base nos valores obtidos da percentagem de silte na fração que passa na peneira nº 200, S% e relacionado com os valores de CBR, apresentados na tabela 6, no qual, podemos notar que o solo que possui valores de CBR menores que 5% apresentam péssimo comportamento no solo, além disso os solos com muita presença de material siltoso também apresentaram o mesmo comportamento, os demais tiveram comportamento regular, sendo o que mostrar menores valores de silte e maior valor de CBR ser o mais recomendável para pavimentação (DNIT, 2006).

Tabela 6 - Classificação dos solos finos (Método indireto)

CBR	S %		
	≤ 35	35 - 65	≥ 65
≤ 5	III	III	III
6 - 9	II	II	III
≥ 10	I	II	III

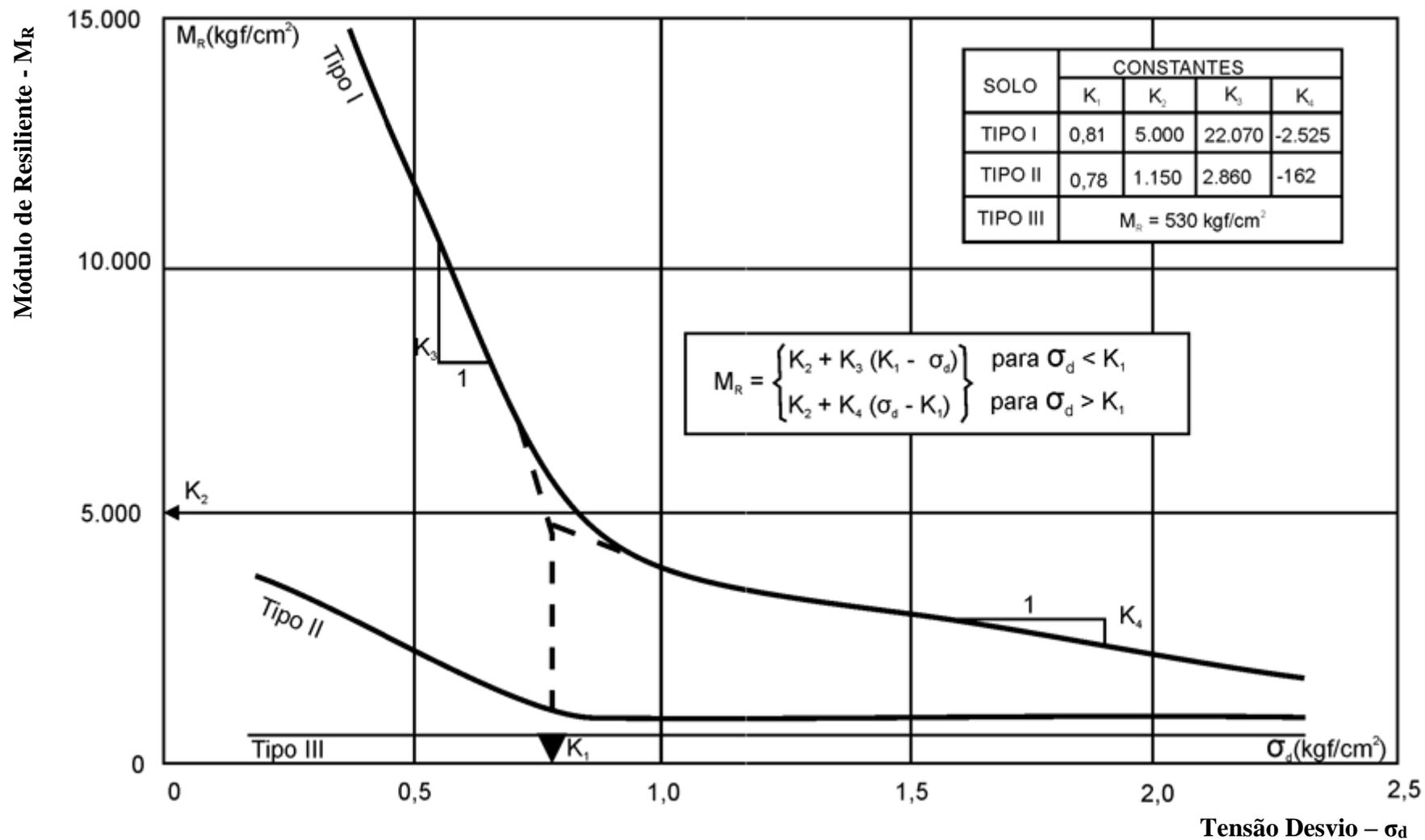
Fonte: DNIT, 2006

Solo Tipo I:  $MR = 4874 \sigma_d - 1,129$

Solo Tipo II:  $MR = 1286 \sigma_d - 0,5478$

Solo Tipo III:  $MR = 530 \text{ kgf/cm}^2$

Figura 8 - Classificação Resiliente De Solos Finos



Fonte: DNIT, 2006

## 2.4. Trabalhos Realizados Com Classificações Geotécnicas

Wallen (2009) realizou uma pesquisa para o estudo sobre as características geotécnicas do solo da região do norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias. Para a realização desse estudo foram analisados os ensaios com amostras de solos colhidas da região em dois laboratórios diferentes, sendo que os resultados destes ensaios foram posteriormente comparados entre si. As classificações empregadas para análise dos resultados foram o sistema tradicional TRB, no entanto, como o autor considera que o mesmo dispersa muito seus resultados, também foi feita análise para o sistema de classificação MCT e o módulo resiliente. O estudo apresenta como objetivo principal o incentivo aos órgãos a utilização dos sistemas de classificações do solo MCT e o módulo de resiliência em seus projetos futuros.

Wayhs (2004) desenvolveu um estudo de materiais alternativos utilizados em pavimentação de baixo custo na região noroeste do Rio Grande do Sul, visto que a região tem escassez de materiais tradicionais. Os materiais analisados na pesquisa foram solos tropicais, e o objetivo foi caracterizar os materiais para sua utilização nas estruturas de pavimentos. Para a análise desses materiais foram realizados vários ensaios de caracterização do solo as classificações tradicionais, MCT e o módulo de resiliência. A análise dos resultados foi realizada por meio de diversas comparações entre as classificações e com tipos de solos semelhantes.

Venturini (2015) realizou um trabalho que envolveu a classificação de alguns solos e rochas da região de Santa Maria aplicados a metodologia MCT. Neste estudo foram coletadas amostras de solos tropicais mais abundantes na região para serem analisadas através de ensaios de caracterização do solo. O principal objetivo dessa pesquisa foi classificar as amostras pela classificação MCT e comparar os resultados com as classificações tradicionais. O resultado final da pesquisa identificou o método da classificação MCT como o mais eficiente por ser o único a retratar o comportamento dos solos tropicais no campo.

Emmert e Pereira (2016) realizaram uma pesquisa de estudo de caso que teve como tema central a caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais. O estudo envolveu a análise de amostras de solo através de ensaios geotécnicos apropriados para obras rodoviárias, sendo classificados através dos sistemas TRB e MCT. O objetivo principal do estudo foi a classificação do solo analisado para uso na pavimentação de estradas florestais. O resultado final foi comparado entre os sistemas de classificações utilizados no estudo,

concluindo que os solos apresentaram comportamento satisfatório à excelente para aplicação em estradas florestais quando compactados corretamente.

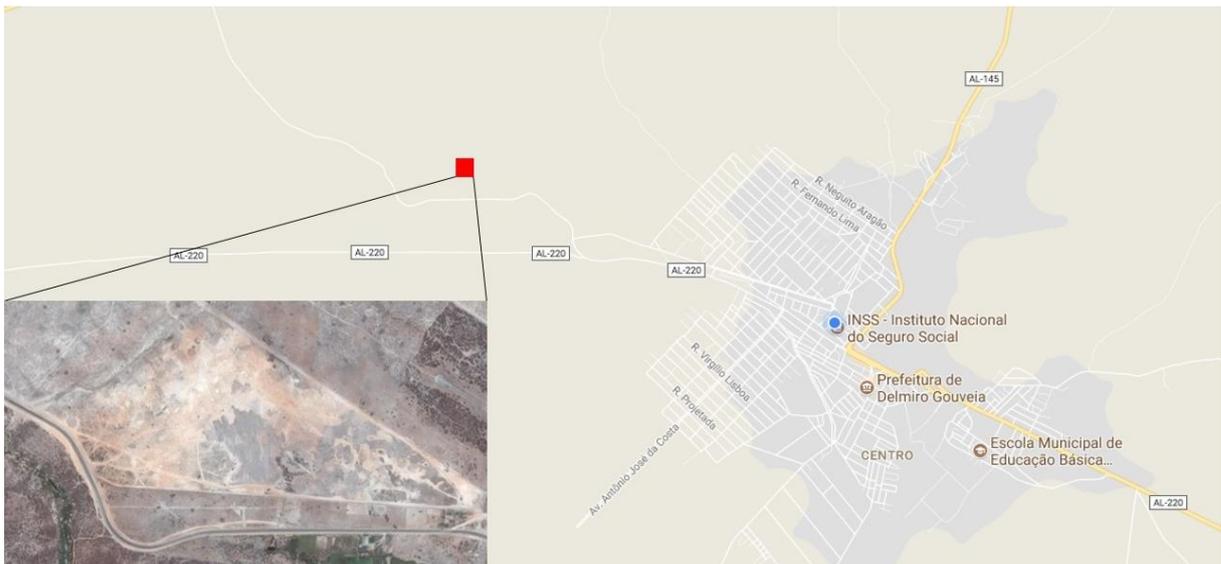
Silva *et al* (2009) realizaram um trabalho de estudo de caso analisando os sistemas de classificações geotécnicas de solos aplicado à rodovia não pavimentada VCS 346, Viçosa, Minas Gerais. O estudo possibilitou o levantamento de um banco de dados geotécnico sobre classificações de solos tropicais, além da verificação de possíveis agrupamentos entre os sistemas geotécnicos tradicionais de classificação e a metodologia MCT. Os resultados dos ensaios de laboratórios nas amostras coletadas identificaram um tipo de solo comum entres os sistemas, no entanto como os procedimentos de cada sistema de classificação analisados nessa pesquisa são distintos entre si, a relação entre os sistemas foi realizada através das propriedades granulométricas do solo.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS EM ESTUDO

As amostras do material de solo utilizado para a realização desse estudo são provenientes da extração de uma jazida localizada na região do sertão de Alagoas, mais precisamente na cidade de Delmiro Gouveia. Esse material foi aplicado na obra de pavimentação da 1ª etapa da implantação do anel viário, que interliga a AL-220 a BR-423.

O mapa 1 mostra a região da jazida onde o material procedente do empréstimo foi coletado. A jazida está localizada no sítio poço das onças zona rural de Delmiro Gouveia, em Alagoas. O solo é transportado até o local da terraplanagem em caminhão basculante, o material da amostra só é coletado no ato da homogeneização, e levado até o laboratório para a realização dos ensaios de caracterização. O laboratório responsável pelos ensaios foi a CETERA – Consultoria e Projetos Ltda.

Mapa 1 – Localização da jazida



Fonte: Google maps

O município de Delmiro Gouveia está situado na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, sendo banhado apenas tributários secundários da sub-bacia do Rio do Maxixe, que atravessa a sede do município. Esses dados estão baseados nos dados do projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do Serviço Geológico do Brasil CPRM (2005).

De acordo com o projeto do CPRM (2005), em relação ao relevo, a região do município está inserida na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja que representa a paisagem típica do semiárido nordestino, ou seja, suas características estão relacionadas a uma superfície de

pediplanação que ocorreu sempre da mesma forma, com relevo predominantemente suave-ondulado, cortada por vales estreitos, com vertentes dissecadas.

Ainda baseado no projeto CPRM (2005) sobre o diagnóstico do município de Delmiro Gouveia o clima encontrado nessa região é o tipo tropical semiárido, suas características principais é a escassez de chuva na maioria do ano, sendo que o período chuvoso se resume ao início de novembro com término em abril, e tendo uma precipitação média anual é de 431,8mm, além de ter uma temperatura sempre elevada.

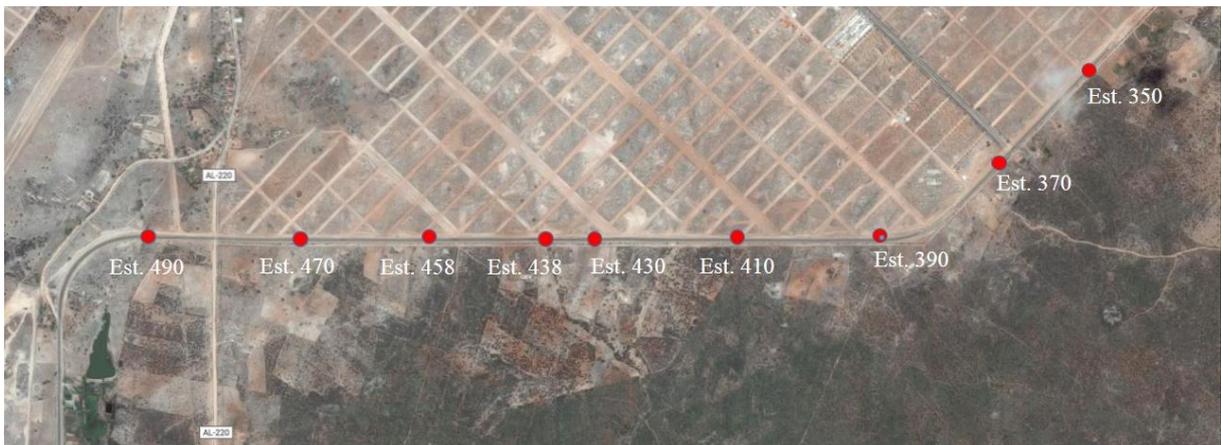
#### 4. METODOLOGIA

Este trabalho utilizou amostras de material provenientes da jazida, e que também foi utilizado na 1ª camada de reforço do subleito no ato da homogeneização, entre as estacas 350 e 490. Vale ressaltar, que o material já aplicado na pavimentação da rodovia em questão apresentava características de boa qualidade, o que permitiu identificá-las e sugeri-las para aplicação em outros tipos de camadas de diferentes pavimentos.

A coleta foi realizada de forma aleatória, sendo os locais escolhidos, então, a cada 200 m. Para cada amostra coletada em cada ponto, foram realizados os ensaios de caracterização e compactação. Já o ensaio de Índice de Suporte Califórnia e o ensaio de expansão foram realizados a cada 400 m. Neste trabalho, considerou-se apenas os pontos de coleta de amostras a cada 400 m, o que permitiu a análise de todos os ensaios.

A Figura 9 apresenta o local entre as estacas 350 a 490, onde foram coletadas as amostras do material utilizados na 1ª camada do pavimento.

Figura 9 - Localização da coleta das amostras



Fonte: Google maps

A campanha de ensaios contemplou as seguintes etapas: caracterização geotécnica para analisar o tipo de solo presente nas amostras coletadas; e a caracterização para a pavimentação rodoviária, que permitiu determinar as características de resistência para a aplicação rodoviária. Os ensaios de caracterização geotécnica foram de granulometria por peneiramento, de limite de liquidez e plasticidade, compactação, já os ensaios de caracterização para a pavimentação foram o Índice de Suporte Califórnia para determinação do CBR, e o ensaio de expansão.

## 4.1. Caracterização Geotécnica

### 4.1.1. Ensaio de Granulometria

O ensaio de granulometria por peneiramento é definido pela norma técnica do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) ME 80/1994. O peneiramento do solo tem como função separar a porcentagem do material retido em cada peneira da maior para menor, ou seja, separar o solo pelo tamanho das suas partículas.

O procedimento do ensaio inicia com a coleta do material e sua secagem, em seguida são desmanchados os torrões almofariz com a mão de gral. Depois disso, é feito o quarteramento da amostra e separado uma porção de 1500 g para o ensaio, e com o mesmo material também é possível calcular a umidade higroscópica. Logo após essa etapa pesa-se o material seco e coloca-se o mesmo nas peneiras com abertura de 2,7 - 9,5 - 4,8 - 2,00 - 0,42 e 0,075 mm, em cima da peneira com a maior abertura é colocada uma tampa para que não haja perda do material, como também embaixo da última deverá ser fechada. Com as peneiras apresentadas na Figura 10, são colocadas todas em ordem de forma decrescente, logo depois é feito o processo de agitação, podendo ser manual ou mecânico. Em seguida, pesa-se o material retido em cada peneira, ou seja, encontra-se a porcentagem do material que passa (DNER-ME 80, 1994).

Figura 10 – Peneiras granulométricas



Fonte: Autor

#### **4.1.2. Ensaio de Limites de Consistência**

Algumas características físicas do material de solo são definidas pelos índices de consistência ou limites de Atterberg. Para cada limite existe uma norma específica para sua definição, os quais são determinados pelos ensaios de limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). A norma técnica DNER-ME 41/1994 define o procedimento de preparação das amostras para os ensaios de caracterização.

Do ponto de vista da caracterização da pavimentação, os ensaios de consistência são realizados para caracterizar o tipo de solo, ou seja, através desses dados é possível determinar o caráter argiloso de um material. Os valores dos limites indicam a quantidade de argila presente no solo, e para casos onde não há presença de argila os solos são considerados não plásticos, como as areias (DNIT, 2006).

##### **4.1.2.1. Preparação das Amostras**

A amostra de solo deve passar pelo processo de secagem e desmanche dos torrões com o auxílio do almofariz e a mão de gral com o cuidado de não desmanchar o tamanho das partículas. Logo após essa etapa é feita a separação da amostra representativa para o ensaio que poderá ser realizado pelo método quartejamento ou com auxílio do repartidor de amostra. O tamanho da amostra depende do tipo de solo a ser ensaiado, sendo 1500 g para argilosos ou siltosos, e 2000 g para arenosos ou pedregulhosos (DNER-ME 41, 1994).

Em seguida, o material selecionado para o ensaio deve ser passado na peneira com abertura de 2 mm. Essa amostra é recolhida, e novamente passada em outra peneira com abertura de 0,42 mm, e sempre observando para que todos os torrões tenham sido desmanchados, caso contrário é realizado o procedimento com almofariz e a mão de gral novamente para desmanches dos mesmos. Após esse procedimento, é realizada a separação das amostras para os ensaios de caracterização. Da quantidade de solo recolhido é separado cerca de 70 g para o ensaio de limite de liquidez e 50 g para o limite de plasticidade. A Figura 11 mostra os aparelhos utilizados para realização dos ensaios de consistência (DNER-ME 41, 1994).

Figura 11 – Aparelhos do ensaio de consistência



Fonte: Autor

#### 4.1.2.2. Limite de Liquidez

O procedimento para execução e os critérios para obtenção dos resultados são definidos pela norma técnica do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem- DNER-ME 122/94. O limite de liquidez é definido como o estágio de transição do solo entre os estados líquido e plástico.

A partir do material da amostra pronto para o ensaio, cerca de 70 g de solo, inicia-se com o procedimento de homogeneização em uma cápsula de porcelana com água destilada em torno de 15 a 20 cm<sup>3</sup>. A água deverá ser colocada aos poucos, e sempre fazendo a mistura com o solo, até que todo o material esteja homogeneizado. Logo após, pega-se uma parte da mistura e coloca-se sobre a concha do aparelho Casagrande, de tal maneira que cubra 2/3 da superfície da concha. Em seguida, com ajuda do cinzel é feita uma ranhura no centro da massa abrindo um espaço de 1 cm. Imediatamente inicia-se o processo de golpes da concha na base do próprio aparelho, através do acionamento da manivela a uma velocidade de duas voltas por segundo. Conta-se o número de golpes até que se constate o fechamento da ranhura em uma extensão de 1cm. Após esse processo é recolhido a parte do solo que se fechou para a análise do teor de umidade. O processo deverá ser repetido outras três vezes no mínimo, e depois os valores serão colocados em um gráfico com eixos ortogonais, sendo que na ordenada será representado os números de golpes na escala logarítmica e na abscissa a umidade com escala aritmética. Após

isso, é traçado uma reta tão próxima for possível dos pontos, o valor será da abcissa quando a ordenada for 25 golpes (DNER-ME 122, 1994).

#### **4.1.2.3. Limite de Plasticidade**

Esse ensaio é determinado pela norma técnica DNER-ME 82/94 que delimita o procedimento e execução do ensaio. O limite de plasticidade do solo representa o menor teor de umidade com a qual se permite moldar um corpo de prova cilíndrico com 3mm de espessura.

Após a separação da amostra inicia-se o processo do ensaio com a mistura das 50 g do material de solo com água destilada até obter uma massa totalmente homogeneizada. Logo depois é separado cerca de 20 g da massa para ser moldada com os dedos sobre uma placa de vidro com face esmerilhada em formato de cilindro comprido. Esse cilindro deve apresentar fissuras ao atingir 3mm de espessura, e em seguida corta-se esse cilindro em pedaços menores e coloca-se em cápsulas para serem levados a estufa a fim de determinar o teor de umidade. Esse processo é repetido outras vezes. O resultado do ensaio é a média dos valores encontrados do teor de umidade (DNER-ME 82, 1994).

#### **4.1.3. Ensaio de Compactação**

O ensaio de compactação é baseado na norma do DNIT-ME 164/2013 que definem os procedimentos para a sua execução. O grau de compactação do solo é a relação do teor de umidade de solo e sua massa específica aparente seca. A determinação ocorre quando uma fração do solo em amostra é passada na peneira com abertura de 19 mm e compactada nas energias normal, intermediária e modificada (DNIT-ME 164, 2013).

De acordo com Pinto (2011) a escolha da energia de compactação é determinada pelo efeito de compactação que se espera ter, a energia de compactação padronizada para as principais camadas do pavimento é o Ensaio Modificado de Compactação por ser empregado maior quantidade de energia.

Neste trabalho o ensaio realizado foi a Energia Intermediária de Compactação, por se tratar de camadas para reforço do subleito não sendo necessário o uso de uma grande quantidade de energia.

O procedimento do ensaio inicia-se com a coleta do material e desmanche dos torrões no almofariz com a mão de gral. Em seguida, coloca-se para secar ao ar, e após é feito a separação de parte do material coletado cerca de 6 a 7 kg dependendo do tipo de solo. Em

seguida, esse material é passado na peneira de 19 mm e retido na 4,8 mm. Logo após, acrescenta-se uma porcentagem de água na amostra deixando uma mistura homogênea até verificar consistência e só depois coleta-se amostra do solo para análise do teor de umidade. (DNIT-ME 164, 2013).

Para este ensaio, é utilizado o corpo de prova com altura de 12,5 cm, sendo que o mesmo possui um cilíndrico complementar. O número de golpes varia com a energia, no caso do intermediário são 26. Com o corpo de prova pronto, inicia-se colocando a camada de solo, que no total serão cinco. Após cada camada é aplicado com um soquete de aproximadamente 4,5 kg um total de 26 golpes uniformemente. Em seguida, é retirado a parte complementar, e pesa-se o restante. Como o peso do cilíndrico é conhecido determina-se o peso do solo úmido compactado ( $P_h$ ). Esse processo deverá ser repetido para todo corpo de prova. Nesse ensaio o valor mínimo é cinco vezes e para cada nova repetição necessitará ser acrescentado cerca de 2% de água a mais que o primeiro (DNIT-ME 164, 2013).

A norma DNIT 164/2013-ME prescreve que a massa específica aparente do solo úmido ( $\gamma_h$ ) deve ser determinada pelo peso do solo úmido compactado ( $P_h$ ) sobre o volume do cilindro ( $V$ ), ou seja, do solo compactado, como apresentado na Fórmula 4.1:

$$\gamma_h = \frac{P_h}{V} \quad 4.1$$

Em seguida é possível determinar a massa específica aparente do solo seco compactado ( $\gamma_s$ ) para cada corpo de prova, pela Fórmula 4.2:

$$\gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100+h} \quad 4.2$$

O resultado final do ensaio é expresso em uma curva de compactação em um gráfico no sistema ortogonal, sendo na ordenada a massa específica aparente do solo seco compactado ( $\gamma_s$ ) e na abscissa o teor de umidade correspondente. O valor da densidade máxima encontrado será o máximo da ordenada e a umidade ótima o valor correspondente na abscissa. A Figura 12 apresenta o soquete e o corpo de prova com cilindro utilizado para a realização do ensaio.

Figura 12 – Aparelhagem para Compactação



Fonte: Autor

## **4.2. Caracterização para Pavimentação Rodoviária**

### **4.2.1. Ensaio do Índice de Suporte Califórnia**

O ensaio é padronizado pela norma DNER-ME 049/94 que determina um valor referente ao suporte do solo, ou seja, a capacidade de suporte do solo compactado pode ser medida através do ensaio “Índice de Suporte Califórnia – ISC” representado pelo valor de CBR.

Para o ensaio, são aproveitados os corpos de prova utilizados no de compactação, uma vez que os procedimentos iniciais da amostra do solo são iguais, sendo necessário apenas da continuidade ao mesmo. Com as moldagens dos corpos de prova prontos retira-se o disco espaçador e inverte os moldes para serem fixados nos pratos-base. Em seguida coloca-se uma haste de expansão com pesos anelares, referentes ao peso do revestimento, e adapta-se um extensômetro sobre essa haste para medir a expansão do solo a cada 24 horas. Logo após essa etapa, os corpos de prova são imersos em água durante 4 dias.

Após os 4 dias retira-se os moldes da imersão observando o valor do extensômetro e então inicia-se o processo de penetração do pistão no solo através de uma prensa seguindo os métodos determinados em norma. Anota-se os valores correspondentes a cada penetração. A seguir, calcula-se os valores de densidade do solo compactado da massa úmida e seca como na compactação para cada amostra, a Figura 13 mostra o aparelho de prensa utilizado para realizar o ensaio.

Figura 13 – Aparelho Prensa para cálculo do ISC



Fonte: Autor

A expansão é determinada pela diferença da leitura no extensômetro durante os 4 dias. Os valores do Índice de Suporte Califórnia – ISC são definidos através do gráfico traçado com curva tensão *versus* penetração com os dados obtidos durante a penetração do pistão. São observados os valores da tensão quando a penetração atingiu 0,1 e 0,2 polegadas. Em seguida, é possível determinar a porcentagem do ISC através da Fórmula 4.3 apresentada abaixo e para o qual será adotado o maior valor.

$$\text{ISC} = \frac{\text{Pressão calculada ou pressão corrigida} \times 100}{\text{Pressão padrão}} \quad (4.3)$$

A pressão padrão é relacionada a um determinado tipo de pedra britada que apresenta Índice de Suporte Califórnia de 100%, no qual seus valores definidos na norma são 70 kgf/cm<sup>2</sup> para 0,1 de penetração e 105 kgf/cm<sup>2</sup> para 0,2.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises foram realizadas com nove amostras ensaiadas em laboratório respeitando os procedimentos determinados por normas e recomendações citados no Capítulo de Metodologias. As amostras foram identificadas conforme numeração de acordo com o número das estacas em campo, como apresenta a Tabela 7.

Tabela 7 – Identificação das Amostras

		<b>Amostra De Solo</b>							
<b>Número</b>	01	02	03	04	05	06	07	08	09
<b>Estaca</b>	350	370	390	420	430	438	458	470	490

Fonte: Autor

### 5.1. Análise Granulométrica

Os resultados das análises granulométricas das amostras ensaiadas estão apresentados na Tabela 8 com as porcentagens indicadas de cada tipo de material presente em cada uma das amostras. As curvas granulométricas estão representadas no Gráfico 1, o qual relaciona a porcentagem que passa nas peneiras de acordo com a abertura das mesmas. É possível observar que as amostras apresentam boa graduação, com uma variação nas porcentagens de material que as constitui.

De acordo com os ensaios realizados, as amostras de solo possuem o valor do índice de grupo igual a zero, por não possuírem valores para os limites de consistência, e se tratarem de material com fração grossa.

Tabela 8 – Resultado da Análise Granulométrica por Peneiramento

	<b>Composição Granulométrica (%)</b>				
	<b>Pedregulho</b>	<b>Areia</b>			<b>Silte e Argila</b>
		<b>Grossa</b>	<b>Média</b>	<b>Fina</b>	
<i>Am. 01</i>	32	12	18	16	22
<i>Am. 02</i>	8	13	20	23	36
<i>Am. 03</i>	9	12	20	23	36
<i>Am. 04</i>	10	12	19	23	36
<i>Am. 05</i>	32	13	18	16	21
<i>Am. 06</i>	20	11	21	19	29
<i>Am. 07</i>	14	10	21	22	33
<i>Am. 08</i>	33	12	19	16	20
<i>Am. 09</i>	6	15	19	25	35

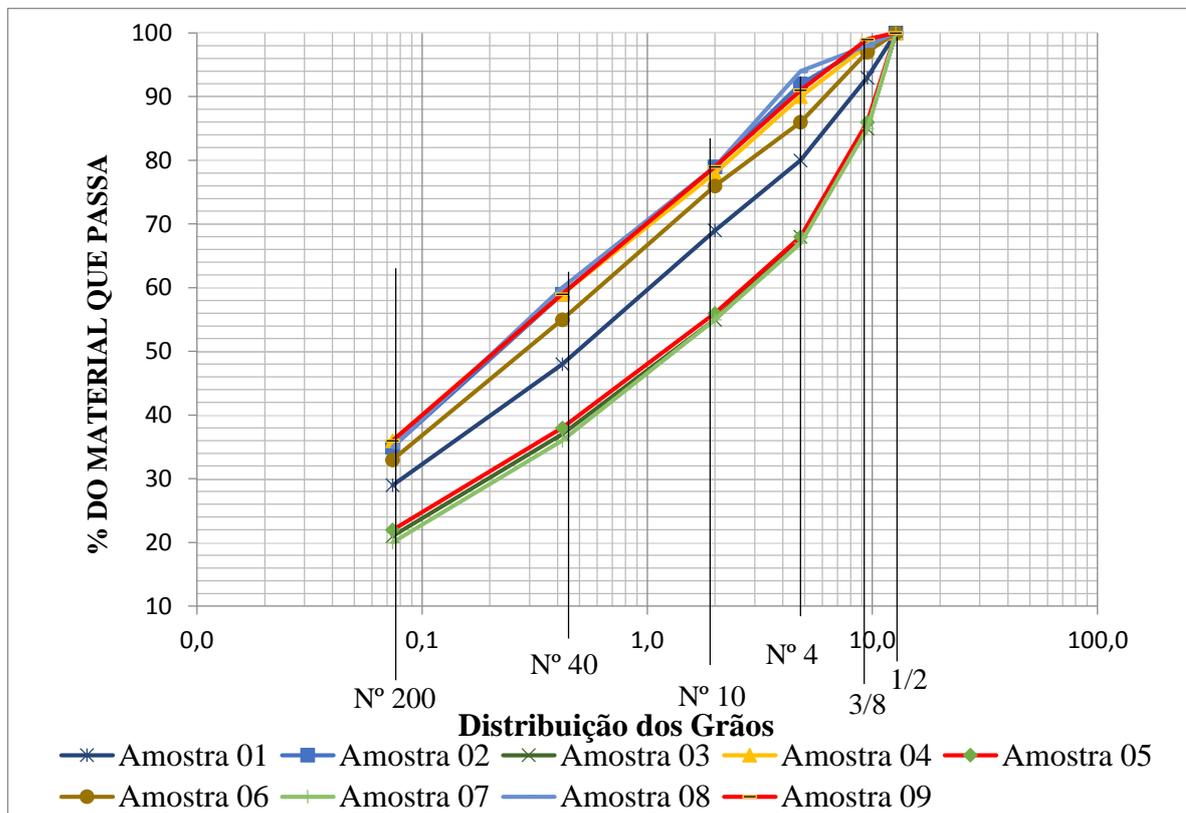
Fonte: Autor

Como citado anteriormente, as amostras de solo em estudo foram retiradas da mesma jazida, e por isso podem apresentar características geotécnicas semelhantes. No entanto, Pinto (2006) comenta que mesmo que o solo seja da mesma origem, podem apresentar uma variação na constituição granulométrica. Em relação à composição granulométrica em si, pode-se afirmar que as amostras 01, 05 e 08 apresentaram porcentagens de materiais bem semelhantes, sendo valores de composição de pedregulhos acima de 30%, de areia em torno de 12% para areia grossa, 19% para areia média, 16% para areia fina, e para silte e argila com valores entre 20 a 22%. No entanto, as amostras 02, 03, 04 e 09 diferiram das amostras 01, 05 e 08. No entanto, entre si, essas amostras também demonstraram valores semelhantes, como visto na Tabela 8.

As amostras 06 e 07 tiveram um resultado semelhante aos outros com valores ficando dentro da média das amostras supracitadas. Isto é, porcentagens de 14 a 20% de pedregulhos e uma presença de 29 a 33% de material fino.

Dentre todas as composições granulométricas apresentadas pelas amostras, é possível destacar que os solos ensaiados possuem granulação grosseira como pequena variação na presença de fração fina, sendo que há predominância de partículas da fração areia com características bem graduadas com presença de todos os tamanhos de partículas.

Gráfico 1 – Curvas de Distribuição Granulométrica



Fonte: Autor

## 5.2. Limites de Consistência

Os limites de consistência são aplicados para análise em solos finos, por ser uma característica peculiar desse tipo de material. Apesar disso, as curvas granulométricas permitiram identificar que as amostras analisadas neste trabalho não apresentaram porcentagens significativas de material argiloso. Dessa forma, os ensaios de Limites de Consistência ficaram impossibilitados de serem realizados, uma vez que, os materiais não apresentaram consistência, ou seja, as amostras foram consideradas como não plásticas.

## 5.3. Teor de Umidade Ótima e Densidade Seca Máxima

Para o ensaio de compactação realizado nessas amostras deste trabalho foi utilizado a energia intermediária de compactação, por representar um valor no intermédio entre os ensaios de compactação. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 9, e representados pelo Gráfico 2 por meio das curvas de compactação.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de compactação.

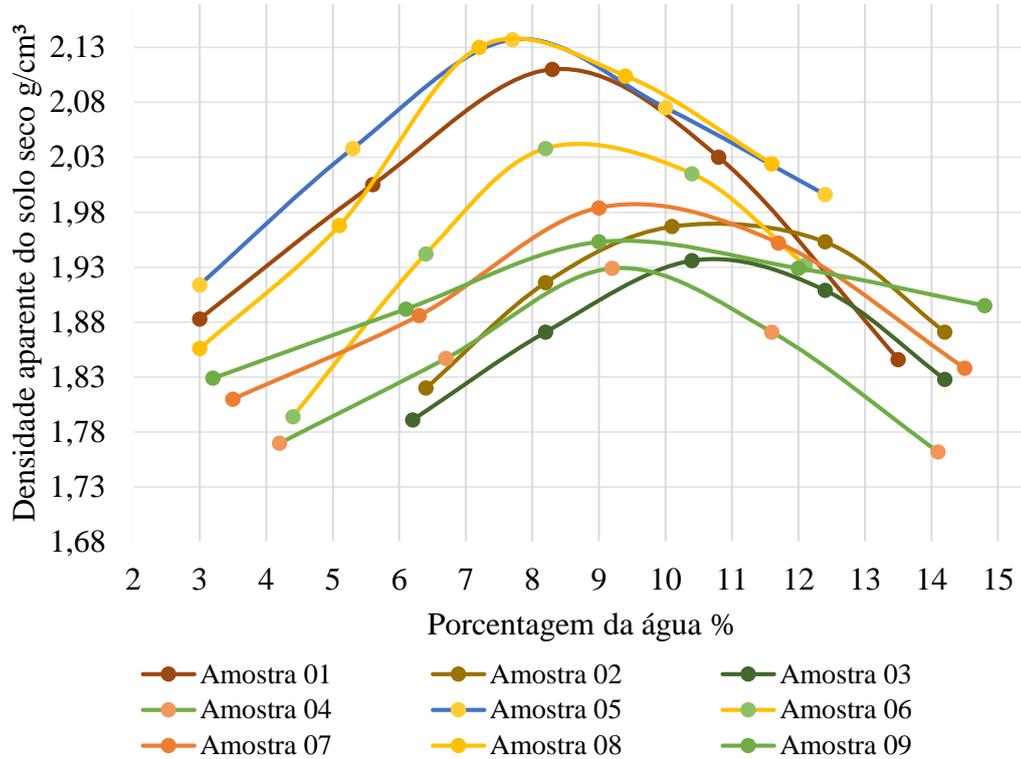
<b>Amostras</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>
<b>W<sub>ótima</sub> (%)</b>	8,9	11	10,9	9,8	8,4	9,0	10	8,0	10,2
<b>Dens. Seca. máx.(g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,13	1,98	1,94	1,94	2,15	2,05	2,00	2,145	1,97

Fonte: Autor

Os resultados dos ensaios de compactação mostraram valores maiores para a densidade seca máxima nas amostras 01, 05, 06 e 08. Essas amostras apresentaram maior porcentagem de pedregulhos, e conseqüentemente menor partículas finas, como também menores teores de umidade ótima. A variação entre os valores se deu em torno de 2,05 a 2,15 g/cm<sup>3</sup> e 8,4 a 9,0% para densidade seca máxima e umidade ótima, respectivamente.

Para as amostras que tiveram maior presença de material fino os valores de porcentagem de água foram maiores para umidade ótima variando em torno de 9,8 a 10,9%, e os de densidade seca máxima menores, em torno de 1,94 à 2,00 g/cm<sup>3</sup>. Este fato é explicado por Pinto (2006), o qual afirma que os solos com maior presença de argila têm valores de umidade ótima elevado e densidade seca máxima baixo.

Gráfico 2 – Curvas de Compactação.



Fonte: Autor

#### 5.4. Índice de Suporte Califórnia (CBR)

A capacidade de suporte do solo é definida pelos valores de CBR através do ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Esses resultados são apresentados na Tabela 10, o qual é possível perceber alguns valores com variações significativas e excedentes ao mínimo exigido pela norma DNIT – ES 138/2010 para camada de reforço do subleito e superiores também para camada de sub-base pela norma DNIT – ES 139/2010.

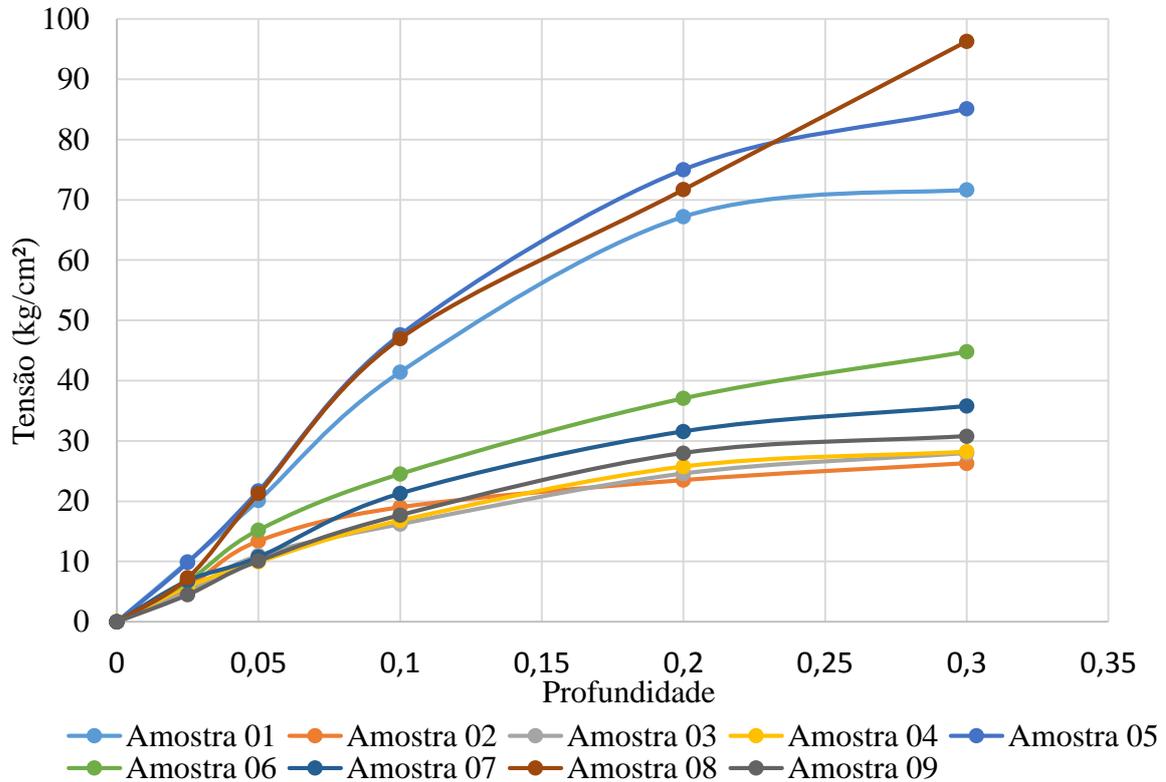
Tabela 10 – Resultados do Índice de Suporte Califórnia (CBR).

<i>Amostras</i>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>
<i>CBR (%)</i>	64	27	23	25	71	35	30	68	27

Fonte: Autor

Os resultados dos ensaios mostraram solos com resistências bem superiores ao mínimo exigido por norma DNIT – ES 138/2010 para utilização no reforço do subleito. O Gráfico 3 apresenta as curvas do Índice de Suporte Califórnia das amostras de solo.

Gráfico 3 – Curva Tensão - Penetração



Fonte: Autor

A partir dos dados apresentados no Gráfico 3, pode-se afirmar que as amostras com os maiores valores de CBR foram aquelas que apresentaram maior porcentagem de material granular, e conseqüentemente os menores valores para as amostras com maior presença de material fino. Em relação à aplicação na pavimentação, as amostras que apresentaram valores de CBR acima de 60% podem ser utilizadas em qualquer camada do pavimento, seja ele flexível ou rígido. Isto se deve ao fato de que a norma DNIT 141/2010 determina o valor mínimo de CBR para a camada de base, ou seja, a camada que mais sofre com os esforços do tráfego seja um valor maior ou igual 60%. No entanto, as demais amostras podem ser empregadas até a camada de sub-base, pois apresentaram o valor mínimo de CBR maior ou igual a 20%.

As amostras de solo em estudo 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08 e 09, foram classificadas para uso na pavimentação utilizando duas principais classificações a TRB e SUCS. Ao analisar os resultados dos ensaios e seguindo as normas do DNIT, é possível determinar em quais camadas do pavimento o solo poderá ser usado.

### 5.5. Classificação para Pavimentação Rodoviária (TRB)

Analisando a Tabela 3 de classificação do solo TRB da esquerda para direita como determina o DNIT (2006), o primeiro a se encaixar nas exigências impostas será o grupo correto. Seguindo essas análises e observando a tabela de classificação foi possível determinar o grupo de solo das amostras em estudo de acordo com as características apresentadas por cada uma nos ensaios.

As amostras 01 e 08 foram classificadas quanto à granulometria com material grosseiro por ter menos de 35% passando na peneira nº 200, bem como o que passa na peneira nº 40 foi menor que 50%. O valor do índice de grupo e dos limites de consistência foi igual a zero, sendo assim classificam-se no grupo A-1-b.

As amostras 06, 07 e 09 classificaram-se como materiais granulares por terem 35% ou menos passando na peneira nº 200, e pertence ao grupo A-2-4 por terem 35% no máximo passando na peneira nº 200. Essas amostras, também, não apresentaram consistência e nem os índices de grupo.

As amostras 02, 04 e 05 foram classificadas como materiais finos por terem mais de 35% passando na peneira de nº 200, no entanto o índice de grupo calculado apresentou um valor igual a zero. Essas amostras também tiveram seus limites de consistência nulos, por esse motivo considerou-se as amostras pertencente ao grupo A-2-4, com variação de erro de apenas 1% a mais de material fino. O resultado dessa classificação está apresentado na Tabela 11 com os grupos referentes a cada amostra de solo ensaiada e classificada no sistema TRB.

Tabela 11 – Resultados da Classificação TRB

<b>Amostras</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>
<b>TRB</b>	A-1-b	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-1-b	A-2-4	A-2-4	A-1-b	A-2-4

Fonte: Autor

Analisando as amostras de acordo com a classificação TRB, pode-se classificá-las para uso nas camadas de pavimentação e reforço baseando-se no Índice de Suporte Califórnia mais conhecido como CBR, como também através das diretrizes estabelecidas pelo DNIT nas normas técnicas.

De acordo com a classificação dos materiais quanto à aplicação na pavimentação rodoviária, todas as amostras analisadas podem ser utilizadas em pavimentos do tipo rígido e flexível devido ao seu valor de resistência ser superior ao exigido por norma, ou seja, todas as

amostras possuem um índice superior ao mínimo exigido e atendem aos padrões estabelecidos para utilização na infraestrutura de pavimentos.

Entretanto, as características de resistência reveladas pelo CBR apontam que os materiais podem ser aplicados em diferentes camadas dentro dos pavimentos, sendo as amostras 01, 05 e 08 podendo ser utilizadas em todas as camadas do pavimento, devido o valor do CBR obtido através do ensaio Índice de Suporte Califórnia. Este fato é justificado pela norma do DNIT que determina um valor mínimo de 60% de CBR para a camada que sofre a maior pressão, e conseqüentemente menores para outras camadas.

O ensaio das amostras 02, 03, 04, 06, 07 e 09 determinaram valores de CBR maiores que 20% e menores de 60%, sendo que a porcentagem mínima para a camada de sub-base era igual ou maior a 20%, podemos então utilizar esse material no pavimento da sub-base e camadas inferiores.

### 5.6. Classificação Geotécnica dos Materiais (SUCS)

A classificação do solo no Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS) é realizada através da análise dos valores da composição granulométrica, ou seja, a porcentagem do solo que passa nas peneiras de nº 200 identifica as características do solo. Seguindo a tabela de classificação da esquerda para direita e analisando os valores de porcentagem exigidos em cada peneira, o grupo será aquele que atender todos os requisitos.

Todas as amostras analisadas foram classificadas como solo de graduação grossa por reter mais de 50% na peneira nº 200. Na sequência também tem mais de 50% passando na peneira nº4, se tratando, então, de uma areia bem graduada pertencente então ao grupo SM, por possui mais de 12% passando na peneira nº 200. Esses resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados da Classificação SUCS

<b>Amostras</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>
<b>SUCS</b>	SM								

Fonte: Autor

Os resultados obtidos foram iguais devido ao fato de todas as amostras terem um material bem graduado com presença de partículas grossas, mas também de uma porcentagem significativa de partículas finas. Sendo assim, as amostras se enquadram no tipo de areia bem

graduada, por haver a presença de partículas com tamanhos variados, e também, de silte devido não haver a separação da argila no ensaio.

### 5.7. Relação entre Classificações

A classificação unificada dos solos é mais adequada a uma descrição de solos com finalidade gerais, enquanto a classificação TRB é mais voltada para uso na pavimentação por ser melhor à avaliação do suporte destes materiais (DNIT, 2006).

De acordo com os dados obtidos nas duas classificações TRB e unificada, cada uma das amostras apresentou um resultado específico. A Tabela 13 apresenta uma inter-relação entre esses sistemas de classificações.

Tabela 13 – Inter-relações entre a classificação TRB e a unificada

Classificação TRB	Classificação Unificada		
	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 – SM – GC – SC
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: DNIT, 2006

Baseado nos dados mostrados na Tabela 13, a comparação com os prováveis grupos da classificação unificada de acordo com Manual de Pavimentação do DNIT (2006) permite observar que todos os grupos da classificação TRB atenderam a relação dos grupos mais prováveis ou possíveis da SUCS.

De acordo com Nogami e Villibor (1995) não é possível comparar os sistemas de classificações tradicionais com o MCT devido ao fato de que essas terminologias foram

elaboradas para solos e condições ambientais prevalentes em regiões de climas frios e temperados e não para os tropicais, daí surgiu a necessidade de um estudo aprofundado nessa área.

Segundo os estudos de Silva *et al* (2009) nos meios geotécnicos e rodoviários brasileiros tem sido muito criticado pela prática de classificar solos tropicais através dos Sistemas tradicionais SUCS e TRB, tendo em vista que eles se baseiam apenas nas propriedades físicas (Granulometria e Limites de Consistência), enquanto na classificação MCT foram investigadas as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos.

No entanto, os estudos indicam que existe alguma semelhança nas características das classificações tradicionais, assim como as classificações resiliente e MCT que foram criadas principalmente na busca de se obter resultados mais reais nas obras de pavimentação. No que diz respeito ao comportamento mecânico e para os solos tropicais, respectivamente, também pode existir uma certa relação entre as mesmas (DNIT, 2006).

Ainda de acordo com Manual de Pavimentação do DNIT (2006) o solo possui comportamento diferentes a depender das suas características granulométrica e da carga nele aplicada, neste sentido é possível destacar que os solos granulares e finos possuem comportamentos totalmente contrários, enquanto um possui grande resistência a penetração e deformação elástica o outro tem baixa, respectivamente.

### **5.8. Aplicação das Amostras na Pavimentação**

As amostras analisadas mostraram resultados diferente nos ensaios de acordo com as suas características geotécnicas e características de resistência para a pavimentação. No geral, os resultados apresentaram materiais de ótima qualidade para uso na pavimentação rodoviária, baseados no sistema rodoviário de classificação mais difundida para essa finalidade.

As amostras 01, 05 e 08 revelaram valores no ensaio de CBR que possibilitam o uso em todas as camadas do pavimento rodoviário por ser maior que o mínimo exigido para as rodovias com baixo volume de tráfego, ou seja, é notório que as características desse material analisado têm elevada resistência e um comportamento excelente para uso na pavimentação. As amostras 02, 03, 04, 06, 07 e 09 podem ser aplicadas na pavimentação rodoviária em camadas de reforço, subleito e sub-base, em razão dos seus valores de CBR serem maior que 20% e seus valores de expansão serem baixos.

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou ensaios geotécnicos realizados com amostras de solo da região de Delmiro Gouveia no estado de Alagoas para avaliar em que tipo ou camada da pavimentação rodoviária poderia ser utilizado, bem como classificar em outras classificações geotécnicas.

Em relação a granulometria do solo houve algumas divergências apesar de serem da mesma região. Entretanto as amostras apresentaram características de material grosseiro com areia em torno de 46 a 59% com distinções bem graduadas, diferenciando apenas na quantidade de pedregulhos e material fino. Em decorrência da granulometria o solo se mostrou não plástico. A respeito dos ensaios de compactação a divergência de valores ocorreu, justamente, por causa dos solos com maior presença de finos. Esses materiais revelaram maiores teores de umidade ótima e menor densidade seca máxima. Além disso, o ensaio do CBR mostrou todos os valores acima de 20% e algumas até com valores maiores que 60%, podendo ser avaliados como um excelente material como suporte para pavimentos.

No que se refere a classificação tradicional TRB as amostras de solo foram classificadas como pertencentes aos grupos A-1-b e A-2-4, identificadas pela quantidade menor e maior de material fino passante na peneira Nº 200, respectivamente. A classificação unificada apresentou um resultado de um solo arenoso com menor presença de material fino, mas com aparência bem graduada.

O estudo realizado com material foi de grande importância e possibilitou identificar um material com boa eficiência para a aplicação em obras rodoviárias, podendo ser utilizado em qualquer tipo de pavimento. Desta forma, pode-se concluir que o material analisado tem uma excelente resistência e pode ser empregado na pavimentação rodoviária, tanto para reforço, como para material do pavimento.

### 6.1. Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- √ Estudo comparativo entre outros tipos de solo que podem ser coletados de jazidas diferentes na região a fim de analisar as características e indicar se podem ser utilizados na pavimentação;
- √ Analise das características das amostras deste trabalho para outras atividades da construção civil e ou em obras geotécnicas;
- √ Estudo da resistência ao cisalhamento e à fluência desses materiais após vida útil nas rodovias.

## 7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

BALBO, Jose Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo; Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 1ªed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A., 2008.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos Solos**. São Carlos: EESC/USP, 1984. 131p.

CHIOSSI, N. J. **Geologia aplicada à engenharia**. 2 ed. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1979.

COMPANHIA PORTUGUESA DE PETRÓLEOS – CEPSA. **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Lisboa, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Pavimentação**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 080/94**: Solos – análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 041/94**: Solos – preparação de amostras para ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 049/94**: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 122/94**: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 082/94**: Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 719. **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 137/2010**: Pavimentação – Regularização do subleito - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ES 138/2010**: Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ES 139/2010**: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ES 141/2010**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 164/2013**: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

EMMERT, Fabiano; PEREIRA, Reginaldo Sérgio. Caracterização Geotécnica E Classificação De Solos Para Estradas Florestais: Estudo De Caso. **Ciência Florestal**. Santa Maria, RS, vol. 26, núm. 2, pp. 601-613, abril-junio, 2016, Universidade Federal de Santa Maria.

GROTZINGER, John; THOMAS, Jordan. **Para Entender a Terra** – 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

HVEEM, Francis N. **Pavement deflection and fatigue failures**, *Bulletin n. 114*, HRB (TRB) Washington, D.C. 1955. p . 43 – 87.

LEMONS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta do solo no campo**. 3 ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

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

MASCARENHAS, J. C. et al. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Delmiro Gouveia, estado de Alagoas**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª edição. Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ. 2005.

MEDRADO, W. A. **Caracterização geotécnica de solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias**. 2009. 142f. Dissertação (Mestre em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

MÜLLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. 234f. Dissertação (Mestre em Ciência em Engenharia Civil) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NETO, R. S. B. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 189f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

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

TEIXEIRA, WILSON et al. **Decifrando A Terra**. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SANTANA, H. (1993a) “**Manual de Pré-Misturado a Frio**”. IBP.

SANTOS, Eliana Fernandes dos. **Estudo Comparativo De Diferentes Sistemas De Classificações Geotécnicas Aplicadas Aos Solos Tropicais**. 2006. 145 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil: Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SENÇO, WLASTERMILER. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume 1. 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, T. O. et al. Sistemas De Classificações Geotécnicas De Solos: Estudo De Caso Aplicado À Rodovia Não Pavimentada VCS 346. **Revista Árvore**. Viçosa, MG, vol.34, n.2, p.313-321, 2010.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4. ed. – Brasília, DF. Embrapa, 2014.

SOUZA, M. L. (1980). **“Pavimentação Rodoviária”**. Livros Técnicos e Científicos, Ed. AS, Rio de Janeiro – RJ.

VENTURINI, J. A., **Aplicação da metodologia MCT para classificação de alguns solos e rochas da região de Santa Maria**. 2015. 73f. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

VILLIBOR, Douglas Fadul; NOGAMI, Job Shuji. **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso de Solos Finos Lateríticos**. São Paulo: Arte e Ciência, 2009

WAYHS, C. A. **Estudos de materiais alternativos utilizados em pavimentação de baixo custo na região noroeste do Rio Grande do Sul**. 2004. 104f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ZIMBACK, C. R. L. **Formação do Solo**. Botucatu, 2003.